

Alles begann mit Sex

ROBERT D. MARTIN

Alles begann mit Sex

*Neue Fragestellungen
zur Evolutionsbiologie des Menschen*

LIBRUM Publishers & Editors, Hochwald (Schweiz)

©2015, LIBRUM Publishers & Editors LLC, Hochwald (Switzerland)

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Jede Art der Vervielfältigung ohne Genehmigung des Verlages ist unzulässig.

In Lizenz übersetzte und überarbeitete Ausgabe der englischen Originalausgabe:

How We Do It — The Evolution and Future of Human Reproduction. 2013,

Basic Books. Rechtsinhaber Perseus Books LLC, New York.

Übersetzung: Robert D. Martin

Lektorat: Rainer Vollmar, Gustl Anzenberger

Umschlaggestaltung: Fanny Oppler

Innengestaltung: Katja von Ruville

Satz: Fotosatz Amann Memmingen

Druck & Bindung: Memminger Medien Centrum Druckerei
und Verlags-AG

ISBN: 978-3-9524300-4-0

Bibliografische Informationen der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Online-Katalog im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

INHALT

	Einführung	7
KAPITEL 1	Spermien und Eier	13
KAPITEL 2	Zyklen und Jahreszeiten	55
KAPITEL 3	Von der Paarung zur Empfängnis	79
KAPITEL 4	Lange Schwangerschaften und schwierige Geburten	123
KAPITEL 5	Die Entwicklung eines großen Gehirns	161
KAPITEL 6	Babynahrung: Die Naturgeschichte des Stillens	193
KAPITEL 7	Babypflege: Ein umfassenderes Bild	231
KAPITEL 8	Menschliche Fortpflanzung auf Abwegen	253
	Danksagung	279
	Literaturverzeichnis	285

EINFÜHRUNG

Frischgebackene Mütter und Väter werden von zuvor unbekanntem Emotionen und einer ganz neuen Art der Liebe durchflutet, wenn sie zum ersten Mal mit ihrem Baby allein sind. Zwar können sie nicht wissen, was während der nächsten Wochen und Monate auf sie zukommen wird, doch haben sie am eigenen Leib das Wunder des Lebens erfahren. Für sie ist dieser Augenblick einmalig, ein unvergleichliches Ereignis in der Geschichte der Menschheit. Um an diesen Punkt zu gelangen, waren aber nicht nur neun Monate, sondern Millionen früherer Generationen notwendig. Was die Mutter in der Schwangerschaft durchmachte und wie das Muttersein sie verändern wird, was der Vater dazu beitrug, und wie dieses winzige, hilflose Baby sich allmählich zu einem Erwachsenen entwickeln wird, das ist Teil einer Geschichte, die viel bedeutender ist als die der Eltern. Es ist die Geschichte der menschlichen Fortpflanzung.

Die Fortpflanzungsbiologie des Menschen hat eine beträchtliche Geschichte hinter sich, und biologische Anpassungen mit einem derartigen Stammbaum haben auf jeden Fall unsere Aufmerksamkeit verdient. Dennoch wurde der evolutionäre Hintergrund der menschlichen Fortpflanzung nur selten gründlich untersucht. Das ist merkwürdig, zumal erfolgreiche Fortpflanzung für die Evolution entscheidend ist.

Trotz der verbreiteten Ansicht, dass es beim Kinderkriegen und -aufziehen möglichst natürlich zugehen sollte, stellen sich nur wenige die Frage, was wirklich natürlich ist: Wie verlief die Evolution unserer Fortpflanzung und Kinderaufzucht? Zur Beantwortung dieser Frage müssen wir Millionen Jahre zurückschauen. Die Merkmale unserer Fortpflanzungsbiologie — darunter die elementare Anatomie unserer Fortpflanzungsorgane, die Befruchtung im Innern, das Stillen und das Herumtragen unserer Babys — entwickelten sich schon bei unseren Vorfahren — den Säugetieren und besonders

den Primaten. Wenn wir die Evolutionsgeschichte dieser Merkmale — und der entsprechenden Umweltbedingungen — verstehen, können wir bei unserer Fortpflanzung Entscheidungen treffen, die nicht nur unsere Gesundheit und unser Wohlbefinden fördern, sondern auch die unserer Nachkommen.

In diesem Buch geht es aber keineswegs darum, zu einem primitiven Lebensstil zurückzukehren. In der heutigen Zeit wäre es völlig absurd, zu einer Art der Existenz zurückkehren zu wollen, wie sie vor langer Zeit von unseren Primatenvorfahren geführt wurde, oder auch nur die Jäger und Sammler nachzuahmen. Stattdessen liefern diese Vorbilder den dringend erforderlichen Kontext für unser gegenwärtiges Fortpflanzungsverhalten. Auf dieser Basis können wir gesundheitsschädlichen Tendenzen ein Ende bereiten und Praktiken und Technologien fördern, die mit einem tiefen Verständnis der biologischen Natur des Menschen (wie etwa die Pille zur Verhütung) einhergehen. Vor allem aber kann man die Gemüter bei solch heiklen Themen wie der richtigen Dauer des Stillens, verschiedenen Methoden der Geburtenkontrolle und bindungsorientierter Elternschaft beruhigen. Ich hoffe, dass der Leser durch die Erkundung verschiedener wissenschaftlicher Rätsel im Kontext der menschlichen Fortpflanzung zu besseren Entscheidungen gelangt. Letztlich besteht mein Ziel darin, reichere und natürlichere Erfahrungen bei der Fortpflanzung zu ermöglichen, indem ich sie mit der kompletten Geschichte des *Homo sapiens* — jener bemerkenswert ausgestatteten Primatenart — in Zusammenhang bringe.

ALLES BEGANN MIT SEX, und damit fängt auch dieses Buch an. In Kapitel 1 diskutiere ich die Evolution der menschlichen Geschlechtszellen und erkläre unter anderem, warum Spermien und Eier so unterschiedliche Größen haben. Warum sind 250 Millionen Spermien notwendig, um ein einziges Ei zu befruchten? Eine Antwort auf diese Frage ist dringend notwendig geworden, da sich die Hinweise auf abnehmende Spermienmengen weltweit häufen und die steigende Umweltbelastung durch Bisphenol A — einer der Hauptverdächtigen — als mögliche Ursache in Frage kommt. Kapitel 2 beschäftigt sich mit Zyklen und jahreszeitlichen Schwankungen. Warum kommt die Menstruation bei den Menschen, den Menschenaffen und den Affen vor, und bei fast allen anderen Säugetieren nicht? Sind Frauen pro

Menstrualzyklus tatsächlich nur einige Tage lang fruchtbar? Ich untersuche die Bedeutung jahreszeitlicher Muster bei Empfängnis und Geburt, und berücksichtige dabei vor allem den Konflikt zwischen unserer biologischen Uhr und der elektrischen Beleuchtung im modernen Zeitalter.

Kapiteln 3 und 4 führen von der Paarung zur Empfängnis. Was ist bei der menschlichen Paarung natürlich — Monogamie, Harems oder Promiskuität? Sind unsere Fortpflanzungssysteme auf direkte Konkurrenz zwischen Spermien verschiedener Männer ausgerichtet? Im Bereich Schwangerschaft und Geburt diskutiere ich mögliche Gründe für die Entstehung der gefürchteten Morgenübelkeit. Entwickelten sich Übelkeit und Erbrechen, um den Fötus vor Gefahren der mütterlichen Ernährung zu schützen? Ich untersuche auch das Rätsel, warum die menschliche Geburt eine derartige Herausforderung darstellt, dass die Unterstützung durch eine Hebamme fast unentbehrlich ist.

In Kapitel 5 geht es weiter mit der Entwicklung des Säuglings und dem wichtigen Thema des menschlichen Gehirns. Die einzigartige Größe unseres Gehirns spielte bei vielen Anpassungen unserer Fortpflanzung und der Versorgung unserer Kinder eine Schlüsselrolle. Warum kommen menschliche Babys in recht unfertigem Zustand auf die Welt, so dass sie intensive Fürsorge durch die Eltern benötigen? Kapitel 6 erzählt die Geschichte des Stillens. Ich diskutiere Belege, laut denen das Stillen — obwohl es heutzutage aus praktischen Gründen nicht immer möglich ist — nicht nur für den Säugling, sondern auch für die Mutter Vorteile bietet, die man mit Flaschenahrung bislang nicht ersetzen kann. Kapitel 7 beginnt mit einer breiten Diskussion der Kinderbetreuung. Darin wird besonders das Herumtragen der Jungen diskutiert. Bei ihm handelt es sich um eine 80 Millionen Jahre alte Anpassung der Primaten, die das Fundament für das bedarfsorientierte Stillen und die Mutter-Kind-Bindung darstellt. In Kapitel 8 schließe ich das Buch mit einer Diskussion darüber ab, wie wir unsere wissenschaftlichen Kenntnisse im Bereich der Fortpflanzung nutzen können, um sie einerseits durch Empfängnisverhütung zu beschränken und andererseits durch medizinisch unterstützte Techniken zu fördern.

BEI FAST JEDEM ÖFFENTLICHEN VORTRAG über die Evolution des Menschen fragt mich jemand im Publikum hinterher, wie die Zukunft aus-

sehen wird. Die Evolutionsbiologie ist eine vorwiegend historische Wissenschaft, daher können wir nicht zuverlässig voraussagen, wie sich die Evolution künftig weiterentwickelt. Andererseits haben zahlreiche medizinische Maßnahmen die Wirkung der natürlichen Selektion reduziert oder sogar zum Stillstand gebracht. Genetische Anlagen, die in der Vergangenheit durch negative Selektion eliminiert wurden, schlüpfen jetzt durch die Maschen des Netzes. Zum Beispiel umgehen wir vorsätzlich die natürliche Selektion, wenn wir Unfruchtbarkeit mit den Techniken der assistierten Fortpflanzung bekämpfen. Wer eine genetische Veranlagung für Unfruchtbarkeit hat, kann diese an Nachkommen weitergeben, die auf natürliche Weise nicht auf die Welt gekommen wären. Befruchtet man zum Beispiel im Labor ein Ei mit nur einem Spermium, umgeht man natürliche Filtermechanismen. Tatsächlich ist die Fortpflanzungstechnologie mittlerweile an einem Punkt ihrer Entwicklung angekommen, an dem die meisten Herausforderungen bewältigt werden können, ganz gleich, ob es sich um Unfruchtbarkeit, Frühgeburten oder andere Störungen handelt. Zwar haben wir — zur Erleichterung und Freude aller Eltern — für viele Fortpflanzungsprobleme Lösungen gefunden, doch übertüncht die Freude darüber viele grundlegende Fragen zu den langfristigen Auswirkungen.

Dieses Buch hat Wurzeln, die tief in meine wissenschaftliche Vergangenheit zurückreichen, und es brauchte mehr als 50 Jahre, um aus dem ursprünglichen Samen zu entstehen. Aber das Kernthema der Evolution hat viel, viel tiefere Wurzeln, die um mehr als drei Milliarden Jahre bis zum Anfang des Lebens auf der Erde zurückgehen. Vielleicht gibt es also eine Entschuldigung, warum die Realisierung meines Unterfangens so lange dauerte. Wie dem auch sei, hoffe ich, mit diesem Buch eine umfassende Auseinandersetzung mit der menschlichen Fortpflanzung, von den Geschlechtszellen bis zum Abstillen, zu liefern. Es handelt sich um eine ausführliche Rekonstruktion unserer evolutionären Vergangenheit, deren Ziel ist, ein besseres Verständnis unserer Gegenwart und Zukunft zu ermöglichen.

Meine Absicht ist nicht, dem Leser unumstößliche Antworten auf die Fragen zu liefern, die ich gestellt habe. Stattdessen möchte ich aufzeigen, wie weit sich unsere Kenntnisse über die natürlichen Hintergründe der menschlichen Fortpflanzung im Laufe der 150 Jahre — also seitdem begonnen wurde, die Evolution und unsere Ursprünge wissenschaftlich zu erkunden — entwickelt haben. Eine der wichtigsten Lehren, die ich aus meinen

Untersuchungen der Natur gezogen habe, ist die ungeheure Hochachtung vor den komplexen Systemen, deren Evolution während Millionen oder sogar Milliarden von Jahren stattfand. Durch dieses Buch möchte ich jenes starke Gefühl mit allen anderen Menschen, und besonders Eltern — ehemaligen, gegenwärtigen und künftigen — teilen.

KAPITEL I

Spermien und Eier

»Woher kommen die Babys?« Viele Eltern weichen einer ehrlichen Antwort auf diese unschuldige kindliche Frage aus und erzählen stattdessen Geschichten vom Storch. Bis vor dreihundert Jahren wäre aber jegliche Antwort ein Märchen gewesen. In der Antike glaubte man, eine Schwangerschaft sei die Folge einer Vermischung von Samenflüssigkeit und Menstrualblut. Forscherberichten zufolge kannten auch einige Völker, wie der Arunta-Stamm in Australien und die Bewohner der Trobrian-Inseln in Ozeanien, bis zu ihrer Entdeckung nicht die Verbindung zwischen Geschlechtsverkehr und Schwangerschaft. Später stellte sich heraus, dass auch die Trobriander glaubten, Schwangerschaften entstünden durch eine Vermischung von Samenflüssigkeit mit Menstrualblut. Wir wissen nicht, wann und wie der Zusammenhang von Sex und Schwangerschaft zuerst erkannt wurde, aber man muss wahrscheinlich nicht sehr weit zurückgehen. Die Domestizierung bestimmter Säugetierarten, die vor etwa 10.000 Jahren ihren Anfang nahm, lieferte erste aufschlussreiche Hinweise. Das erste grobe Verständnis der Fortpflanzungsbiologie war dabei zweifellos ein frühes Nebenprodukt der Tierzucht. Praktiken wie die Kastration, die weitverbreitet war, um die Aggressivität bei männlichen Säugetieren zu senken, ermöglichten weitere Erkenntnisse. Zwischen Empfängnis und Geburt beim Menschen liegen aber neun Monate, daher war ein großer Durchbruch notwendig, um den Zusammenhang zu erkennen. Und selbst danach hielten sich lange wilde Fantasien über unsere Fortpflanzungsmechanismen.

Die Geschlechtszellen — die wesentlichen Bestandteile der Empfängnis — wurden erst im 17. Jahrhundert entdeckt. Der niederländische Händ-

ler und Wissenschaftler Anton van Leeuwenhoek war der erste, der unter dem Mikroskop Spermien erkannte. Zunächst hielt er sie fälschlicherweise für winzige Parasiten, die die Samenflüssigkeit verunreinigt hatten. Da die Spermien der Säugetiere mit bloßem Auge nicht erkennbar sind, konnte man ihre Rolle bei der Befruchtung unmöglich verstehen, bevor van Leeuwenhoek und andere Pioniere Mikroskope entwickelten, die stark genug waren, um sie sichtbar zu machen. Obwohl die Eier der Säugetiere dreißigmal größer als Spermien (d. h. ungefähr so groß wie der Punkt am Ende dieses Satzes) und für das bloße Auge gerade noch sichtbar sind, wurden sie erst viel später entdeckt. Der deutsche Biologe Karl Ernst von Baer, der die Embryologie begründete, veröffentlichte 1827 den ersten Bericht über das menschliche Ei und die Eier verschiedener anderer Säugetiere. Von Baer war es auch, der im selben Jahr das Wort »Spermatozoon« aus dem altgriechischen *sperma* für »Samen« und *zoon* für »Lebewesen« prägte.

Überdies dauerte es einige Zeit, bis man die Bedeutung der Geschlechtszellen erkannte. Jahrhunderte lang glaubte man, dass Organismen mittels Urzeugung (Abiogenese) direkt von lebloser Materie entstünden, zum Beispiel wie Maden aus verwesendem Fleisch. Erst im achtzehnten Jahrhundert lieferte der italienische Priester und Naturwissenschaftler Lazzaro Spallanzani durch eine Reihe ausgefallener Experimente den ersten klaren Beweis gegen die Urzeugung. Er bewies auch, dass Spermien für die Befruchtung der Eier notwendig sind. In den 1760er Jahren zog Spallanzani männlichen Fröschen eng anliegende Hosen aus Taft an, um nachzuweisen, dass sich aus den Eiern nur dann Kaulquappen entwickeln, wenn Spermien ins umgebende Wasser ausgeschieden werden. Soweit bekannt ist, war das zugleich der erste experimentelle Nachweis mechanischer Empfängnisverhütung. Zur Befruchtung kam es nur, wenn Spallanzani ausgeschiedene Samenflüssigkeit aus der Taft hose entfernte und Eier damit bestrich. Damit demonstrierte er gleichzeitig das Prinzip der künstlichen Besamung.

Die Mechanismen der sexuellen Fortpflanzung wurden also erst recht spät entdeckt. Obwohl wir heutzutage ziemlich viel über die Zeugung von Babys wissen, verstehen wir bei weitem nicht alle Einzelheiten und Gründe. Ständig tauchen Fragen zum Sex und zu den Geschlechtszellen des Menschen auf. Vor allem ist nicht klar, warum es überhaupt zur sexuellen Fortpflanzung kommt. Wäre die Selbstreplikation nicht um einiges einfacher,

zuverlässiger und weniger heikel? Überdies, warum sind die männlichen und weiblichen Geschlechtszellen des Menschen so verschieden?

Um Hinweise auf Antworten zu diesen Fragen zu bekommen, müssen wir unsere Perspektive erweitern und untersuchen, wie und warum die sexuelle Fortpflanzung bei unseren Urahnen entwickelt wurde. Wir sind daran gewöhnt, uns mit anderen Primaten zu vergleichen, aber einige der grundlegendsten Fortpflanzungsmerkmale können bis zu Stadien der tierischen Evolution zurückverfolgt werden, die tief in der geologischen Vergangenheit liegen. In diesem Kapitel nehme ich einige sehr frühe Stadien der Evolution des Lebens unter die Lupe, um so dem vollen Verständnis der menschlichen Geschlechtszellen näher zu kommen.

EINE GRUNDLEGENDE FRAGE, DIE EVOLUTIONS BIOLOGEN lange vor ein Rätsel stellte, ist, warum es Sex überhaupt gibt? Die sexuelle Fortpflanzung ist besonders unter den Organismen, die uns am meisten vertraut sind, extrem verbreitet. Trotzdem sind wir mit einem evolutionären Rätsel konfrontiert. Wenn ein Organismus sich ohne Sex vermehrt — zum Beispiel durch Teilung oder Knospung — haben alle Nachkommen dieselben Gene. Vermehrt sich ein Organismus dagegen sexuell, besteht jeder Nachkomme aus einem Gemisch von Genen, das zu je einer Hälfte von beiden Elternteilen stammt. Ohne einen Ausgleich dafür, seine Nachkommen zur Hälfte mit Genen eines anderen Individuums zu produzieren, müsste die sexuelle Fortpflanzung innerhalb der natürlichen Auswahl erheblich im Nachteil sein. Da die sexuelle Fortpflanzung unter Tierarten aber so weit verbreitet ist, sollte man davon ausgehen können, dass sie irgendeinen großen systematischen Vorteil mit sich bringt. Und das stimmt auch. Die wahrscheinlichste Erklärung für die weite Verbreitung der sexuellen Fortpflanzung ist, dass die Verschmelzung von zwei Geschlechtszellen, die von zwei verschiedenen Individuen stammen, Gene vermischt und damit Vielfalt erzeugt. Im Englischen gibt es den Spruch: »Vielfalt ist die Würze des Lebens.« Aber für die Evolution ist Vielfalt viel mehr; sie ist die Essenz des Lebens. Die natürliche Selektion ist ohne Variation einfach nicht möglich, und evolutionäre Veränderungen wären ausgeschlossen. Die Fortpflanzung ohne Sex, auch Klonen genannt, hat einen bedeutenden Nachteil: Ohne eine Befruchtung, bei der die Gene durchmischt werden, kann Variation nur durch die — sehr langsame — Kumulie-

rung von Mutationen stattfinden. Die Frage ist, ob der Vorteil der zusätzlichen Vielfalt, der durch sexuelle Fortpflanzung entsteht, ausreicht, um den Nachteil zu kompensieren, der durch die Produktion von Nachkommen verursacht wird, bei der die Hälfte der Gene vom Geschlechtspartner stammen. Verschiedene Versuche mit einfachen Organismen haben gezeigt, dass die sexuelle Fortpflanzung tatsächlich einen Vorteil mit sich bringt. Sie gestattet eine schnellere Reaktion auf neuen Selektionsdruck unter veränderten Umweltbedingungen. Mit anderen Worten gestattet sie Arten, besser auf externe Veränderungen reagieren zu können — und wir Menschen sind ohne Zweifel besonders anpassungsfähig.

Diese Vermischung der Gene ist für die Fähigkeit eines Individuums, wirksam auf Bedrohungen von anderen Organismen zu reagieren, sehr wichtig. Wenn die natürliche Selektion zum Beispiel Raubtiere begünstigt, die schneller laufen können, um ihre Beute zu fangen, wird sie auch die Evolution schneller laufender Beutetiere begünstigen, die bessere Chancen haben, den Raubtieren zu entkommen. Der Evolutionsbiologe Leigh Van Valen beschrieb dieses andauernde Wettrennen zwischen interagierenden Arten in seiner heutzutage berühmten Red-Queen-Hypothese. Hintergrund dieses Begriffs ist das berühmte Kinderbuch *Alice hinter den Spiegeln* von Lewis Carroll. In diesem Roman wird Alice von der Roten Königin weisgemacht: »Hierzulande musst du so schnell rennen, wie du kannst, wenn du am selben Fleck bleiben willst.« Mit anderen Worten muss eine Art einfach deshalb schnell evolvieren können, um ihre Nische in der natürlichen Umgebung behalten zu können. Und eine größere Evolutionsgeschwindigkeit wird durch die sexuelle Fortpflanzung ermöglicht. Das klingt recht einleuchtend, doch Van Valen — ein berühmter Professor an der University of Chicago, der bei seinen Studierenden sehr beliebt war — erntete beträchtlichen Widerstand von etablierten Fachzeitschriften, als er versuchte, seine Arbeit über die Red-Queen-Hypothese zu veröffentlichen. Als Reaktion gründete er seine eigene Zeitschrift *Evolutionary Theory* und veröffentlichte seine zukunftsträchtige Idee in einem Artikel mit dem Titel »Ein neues Gesetz der Evolution« in der ersten Ausgabe 1973. Dieser Begriff, der damals bei der akademischen Begutachtung als »publikationsunwürdig« zurückgewiesen wurde, gilt heute als Grundprinzip der Evolutionsbiologie.

Unabhängig von ihrer Entstehung ist die sexuelle Fortpflanzung bei Lebewesen vorherrschend und bei Wirbeltieren — Fischen, Amphibien, Repti-

lien, Vögeln und Säugetieren — praktisch universell. Es darf also mit Sicherheit angenommen werden, dass die sexuelle Fortpflanzung bereits vor etwa 500 Millionen Jahren bei unseren gemeinsamen Vorfahren etabliert war. Mit der Evolution der auf dem Land lebenden Reptilien, Vögel und Säugetiere entstand aber eine wichtige Neuerung: die innere Befruchtung. Fische und Amphibien können ihre Eier und Spermien einfach im umgebenden Wasser freisetzen, worauf die Befruchtung in der äußeren Umgebung stattfindet. Dagegen war beim gemeinsamen Vorfahren der auf dem Land lebenden Wirbeltiere die innere Befruchtung die entscheidende Veränderung für ein Leben außerhalb des Wassers. Der Wechsel auf das Festland führte zu speziellen Anpassungen, die dem Schutz der Jungtiere dienen. Die meisten Reptilien, Vögel und die ursprünglichsten Säugetiere (Kloakentiere wie Schnabeltiere und Schnabeligel) legen Eier mit Schalen, die das Austrocknen verhindern. Beuteltiere und Höhere Säugetiere gingen einen Schritt weiter, indem sie Lebendgeburten (Viviparie) entwickelten.

UM DIE EVOLUTION DER GESCHLECHTSZELLEN ZU VERSTEHEN, müssen wir in der Vergangenheit allerdings viel weiter zurückgehen. Ein grundlegender Schritt in der frühen Evolution fand vor etwa 1,5 Milliarden Jahren statt, als die einzelligen Organismen mit einem richtigen Zellkern entstanden. Innerhalb des Kerns befanden sich Chromosomen, die einen Großteil des genetischen Materials in der Desoxyribonukleinsäure (DNS) transportierten. Im Zuge einer außergewöhnlichen Entwicklung, die mit der Evolution von Zellen einherging, wurden einst freilebende Bakterien ständige Bewohner außerhalb des Kerns in der Zellsubstanz. Diese Entwicklung hatte weitreichende Auswirkungen auf die Evolution sämtlicher Tiere und Pflanzen.

Im Laufe der Zeit verwandelten sich die ansässigen Bakterien in Mitochondrien. Mitochondrien werden häufig als Kraftwerke der Zelle bezeichnet, weil sie eine direkte Rolle bei der Energieproduktion spielen. Interessanterweise zeigten DNS-Vergleiche, dass Mitochondrien mit dem *Rickettsia*-Bakterium eng verwandt sind, das Fleckfieber beim Menschen auslöst. Wir wissen nicht, ob Mitochondrien ursprünglich ein gegenseitig vorteilhaftes Arrangement mit der Wirtszelle hatten, oder ob sie einfach gefangen genommen und zu Sklaven gemacht wurden. Klar ist aber, dass die Wirtszelle ihr als

Gegenleistung für die permanente Energieproduktion Unterkunft, Nahrung und Schutz bot. Die Bakterien verloren nur ihre Freiheit.

Die Evolution von Mitochondrien ist also das Ergebnis vereinfachter Bakterien. Als Überbleibsel der freilebenden Vorfahren behält jedes Mitochondrium einige ringförmige Gensätze. Diese Ringe werden unabhängig von den Genen von den Chromosomen im Zellkern weitergegeben. Daher haben alle Zellen mit einem Kern, auch die des Menschen, zwei verschiedene Gensätze: ein Kerngenom und ein mitochondriales Genom. In beiden Fällen bestimmen vorwiegend individuelle Gene den Aufbau spezifischer Proteine. In den Millionen von Jahren, während derer Mitochondrien ständige Bewohner von Zellen mit einem Kern sind, wurden ihre Gensätze jedoch allmählich weniger. Bei Säugetieren zum Beispiel sind bei jedem Mitochondrium aus einem ursprünglichen Satz von etwa fünfzig nur noch dreizehn proteinkodierende Gene übrig. Die von diesen dreizehn Genen erzeugten Proteine sind ausschließlich Enzyme, die in Zusammenhang mit dem Energiefluss stehen. Und genau das ist der Grund, weshalb Mitochondrien als Kraftwerke der Zelle bezeichnet werden.

Ein weiterer Meilenstein bei der Fortpflanzung von Tieren, aber auch von Pflanzen, war die Evolution des mehrzelligen Körpers. Dieser Übergang fand vor mehr als 600 Millionen Jahren statt. Die Anwesenheit vieler Zellen in einem Körper führte bald zu einer Arbeitsteilung: die Spezialisierung verschiedener Zellen für verschiedene Funktionen. Der menschliche Körper besitzt etwa zweihundert verschiedene Zelltypen, darunter unterschiedliche Geschlechtszellen für die Fortpflanzung. Viele Tiere, zum Beispiel alle Wirbeltiere, entwickelten eine getrennte, immer gleichbleibende Gründerzelllinie (die Keimbahn) für die Produktion der Geschlechtszellen. Ungeachtet, was mit dem übrigen Körper passiert, gewährleistet eine eigenständige Keimbahn die Kontinuität von Generation zu Generation. Aus dieser Perspektive ist der Körper eine vorübergehende Struktur, die der Keimbahn die Erfüllung ihrer grundlegenden Aufgabe der Fortpflanzung in jeder Generation gestattet. Daher hat die Evolutionsbiologie eine überzeugende Antwort auf die uralte Frage: »Was war zuerst da, das Huhn oder das Ei?« Das Ei war selbstverständlich zuerst da. Hühner wie Menschen haben sich so entwickelt, dass ein Ei zum nächsten Ei führen kann.

In einem weiteren Schritt, der mit dem Ursprung der Keimbahnen in Zusammenhang steht, wurde bei den meisten (obwohl nicht allen) mehrzel-

ligen Organismen eine sexuelle Arbeitsteilung entwickelt, bei der Weibchen Eier und Männchen Spermien erzeugen. Bei einigen Arten produziert das Individuum sowohl Spermien als auch Eier. In Anlehnung an den altgriechischen Mythos des *Hermaphroditos* werden sie Hermaphroditen genannt. Beim Menschen hingegen findet man das Standardmuster vor, bei dem Frauen Eier und Männer Spermien erzeugen. Aus diesem grundlegenden Unterschied gehen alle physiologischen und anatomischen Differenzen zwischen den Geschlechtern hervor.

FÜR UNS IST ES SELBSTVERSTÄNDLICH, dass kleine Spermien in Riesmengen produziert werden, während Eier bedeutend größer sind und in bescheidenen Mengen erzeugt werden. Ein Mann produziert eine Vielzahl winziger Spermien, die kleinsten Zellen in seinem Körper, während eine Frau in jedem Zyklus gewöhnlich nur ein einziges Ei, die größte Zelle ihres Körpers, freisetzt. Im Ejakulat eines erwachsenen Manns, das mengenmäßig etwa einem halben Teelöffel entspricht, befinden sich durchschnittlich etwa 250 Millionen Spermien. Und hier steht man vor einem der größten Geheimnisse menschlicher Fortpflanzung: Warum sind Hunderte Millionen Spermien notwendig, wenn letztlich nur eins das Ei befruchten wird? Mir gefällt die abschätzigste Antwort einer Feministin: »Weil kein einziges bereit ist, nach dem Weg zu fragen.« Aber im Ernst, es ist nicht klar, warum so extrem unterschiedliche Mengen von Spermien und Eiern erzeugt werden. Schließlich begann die sexuelle Fortpflanzung vermutlich damit, dass zwei ähnlich große Einzeller miteinander verschmolzen und dann Tochterzellen bildeten. Warum produzieren mehrzellige Organismen dann in der Regel eine Vielzahl kleiner Spermien, aber bedeutend weniger große Eier? Diese Frage, die für Evolutionsbiologen seit langem ein Rätsel darstellt, wartet noch immer auf eine zufriedenstellende Lösung. Möglich ist, dass die natürliche Selektion die enorme Produktion von Spermien bei Männchen begünstigte, weil sie bei der Befruchtung eine genetische Lotterie ermöglicht. Würden aber beide Geschlechter viele kleine Geschlechtszellen produzieren, wäre das Aufeinandertreffen zur Befruchtung deutlich erschwert. Möglicherweise liegt die Lösung dieses biologischen »Problems« darin, dass ein großes Ei ein relativ leichtes Ziel für eine Vielzahl winziger Spermien ist. Außerdem steht die Anzahl der Jungtiere, die jeweils erzeugt werden — zum

Beispiel die Wurfgröße bei Säugetieren — auch unter Selektionsdruck. Dementsprechend könnte die Produktion einer relativ kleinen Menge von Eiern ein wirksames Mittel zur Regulierung des Fortpflanzungsertrags sein, wobei die verfügbaren Ressourcen Selektionsdruck ausüben.

Was auch immer der evolutionäre Hintergrund sein mag, der Mensch benötigt für eine erfolgreiche Befruchtung eine Vielzahl von Spermien. Die Forschung in Zentren für Sterilitätsbehandlung in den 1950er-Jahren ergab, dass Männer häufig infertil sind, wenn die Gesamtzahl der Spermien im Ejakulat dauerhaft unter siebzig Millionen liegt. Oberhalb einer bestimmten Grenze gibt es jedoch keinen direkten Zusammenhang zwischen Spermienmenge und Fertilität. Eine Studie des Endokrinologen Edward Tyler aus dem Jahr 1953 zeigte, dass die Empfängnisrate schrittweise zunahm, wenn die Spermienmenge pro Ejakulat von siebzig Millionen auf zweihundert Millionen anstieg. Bei noch größeren Spermienmengen blieb die Empfängnisrate allerdings mehr oder weniger gleich. Neuere Untersuchungen haben diese Befunde bestätigt und erweitert. 1998 veröffentlichte eine Forschungsgruppe unter der Leitung des Arbeitsmediziners Jens-Peter Bonde die Ergebnisse einer wichtigen Studie. Bei etwa vierhundert Fällen, bei denen die erste Schwangerschaft geplant war, untersuchten sie den Zusammenhang zwischen der Qualität der Samenflüssigkeit und der Empfängniswahrscheinlichkeit pro Menstrualzyklus. Bei einer Zunahme der Gesamtspermienmenge auf 125 Millionen stieg die Empfängniswahrscheinlichkeit von Null auf 25 Prozent, bei höheren Spermienmengen gab es aber keinen weiteren Anstieg. Einige Jahre später, 2002, untersuchte eine Arbeitsgruppe unter der Leitung des Gesundheitsforschers Rémy Slama das Verhältnis zwischen Spermienmenge und der Dauer bis zum Beginn der Schwangerschaft bei fast eintausend fertilen Paaren in vier europäischen Städten. Bis zu einer Gesamtspermienmenge von etwa zweihundert Millionen gelang es Paaren immer schneller, eine Schwangerschaft herbeizuführen, aber oberhalb dieser Schwelle erfolgte keine Steigerung mehr. Ergänzend zu diesen Befunden veröffentlichten der Androloge Trevor Cooper und seine Kollegen 2010 eine Untersuchung über Spermaproben von fast fünftausend Männern. Die Proben, die aus vierzehn Ländern in vier Kontinenten stammten, wurden im Auftrag der Weltgesundheitsorganisation analysiert, um Referenzwerte zu liefern. Als Mindestmenge, um innerhalb eines Jahres eine Schwangerschaft herbeizuführen, wurden ungefähr sechzig Millionen Spermien pro Ejakulat

ermittelt. Unterm Strich sind offenbar zwischen sechzig und zweihundert Millionen Spermien pro Ejakulat für eine normale Fertilität notwendig. Zwar wissen wir noch nicht, weshalb dies der Fall ist, auf jeden Fall ist aber offenkundig, dass eine Riesenmenge von Spermien unentbehrlich ist. Bei anderen Säugetieren wurden ähnliche Voraussetzungen nachgewiesen. Eine brillante Untersuchung der Trächtigkeit von Schafen nach natürlichen Paarungen ließ eine vergleichbare Fertilitätsschwelle von etwa sechzig Millionen Spermien pro Ejakulat erkennen. Unterhalb dieser Schwelle sackte die Befruchtungsrate drastisch von ungefähr 95 Prozent bis auf etwa 30 Prozent ab.

WIE SCHAFFEN ES DIE SPERMIEN ÜBERHAUPT, das Ei zur Befruchtung zu erreichen? Einmal mehr ist es hilfreich, einen Blick auf unsere Verwandten unter den Säugetieren zu werfen. Die Untersuchung der Anatomie der männlichen Fortpflanzungsorgane enthüllte ein weitverbreitetes merkwürdiges Merkmal, das dem Menschen fehlt — ein Knochen innerhalb des Penis. Dieser Penisknochen ist in zweierlei Hinsicht außergewöhnlich: Er weist die größten Unterschiede zwischen den verschiedenen Arten auf und er ist nie mit einem anderen Knochen verbunden. Bei Primaten, Fledermäusen, Raubtieren, Insektenfressern und Nagetieren haben die meisten Arten einen Penisknochen. Bei vielen Raubtieren ist er besonders gut entwickelt. Ein großer Hund kann unter Umständen einen etwa zehn Zentimeter langen Penisknochen besitzen, der definitive Rekordhalter unter den heutigen Säugetieren ist aber das Walross, bei dem der Knochen eine Länge von über achtzig Zentimetern erreichen kann. Dieser Ehrfurcht einflößende Knochen, in Alaska unter dem Namen *oosik* bekannt, wird sehr häufig für Schnitzereien und Riten verwendet. Was Riten betrifft, möchte ich an dieser Stelle erwähnen, dass der Londoner *Tetrapods Club*, ein ursprünglich exklusiver Männerverein (in dem ich lange genug Mitglied war, um die Zulassung von Frauen miterleben zu können), bei Sitzungen symbolisch einen Walross-Penisknochen als Hammer verwendete. Am anderen Ende des Spektrums befindet sich der relativ kleine Penisknochen des Waschbären, den man ohne weiteres, zumindest in den Vereinigten Staaten, über das Internet bestellen kann. Man braucht nur »mountain man toothpick« einzugeben, um bald einen etwas stumpfen Zahnstocher zu besitzen.

Nicht alle Säugetiergruppen haben einen Penisknochen. Dieses spezielle Merkmal fehlt nicht nur beim Menschen, sondern auch bei Beuteltieren, Kaninchen, Spitzhörnchen, Elefanten, Seekühen, Huftieren, Delfinen und Walen. Da der Penisknochen so unregelmäßig vorkommt, ist seine Evolutionsgeschichte ungewiss. Möglicherweise war dieser Knochen beim gemeinsamen Vorfahren der höheren Säugetiere vorhanden, um anschließend bei mehreren Stammlinien zu verschwinden, oder er wurde vielleicht bei fünf oder mehr Gruppen höherer Säugetiere unabhängig entwickelt. Die Verwirrung wird noch größer durch die Tatsache, dass der Penisknochen nicht bei allen Primaten vorkommt. Unter den Halbaffen ist er bei allen Lemuren und Loris vorhanden, aber Koboldmakis fehlt er. Die meisten höheren Primaten besitzen einen Penisknochen, aber bestimmte Neuweltaffen und die Menschen sind Ausnahmen. Alle Altweltaffen und Menschenaffen haben einen Penisknochen, allerdings ist er bei einigen Arten groß und bei anderen klein.

Die Vorfahren der Primaten hatten vermutlich einen Penisknochen, der, wenngleich wohl etwas verkleinert, bei den Vorfahren der Affen und Menschenaffen erhalten blieb. Trotzdem haben einige Altweltaffen, wie der Mandrill und bestimmte Makakenarten, einen auffallend großen Penisknochen, wahrscheinlich wegen einer Sekundarentwicklung, die an den Urzustand bei den Vorfahren der Primaten erinnert. Die Größe des Knochens unterscheidet sich bei den verschiedenen Makakenarten stark, und diese Abweichungen wurden auf Unterschiede beim Begattungsverhalten zurückgeführt. Da alle Menschenaffen nur einen kleinen Penisknochen besitzen, stellt der vollständige Verlust während der Evolution des Menschen lediglich das Ende eines bereits eingeleiteten Rückgangs dar. Einmal sagte ich zu einem australischen Kollegen — ein Experte für Penisknochen bei Fledermäusen — dass das vollständige Fehlen des Penisknochens beim Menschen ein faszinierendes Rätsel der Evolution sei. Seine trockene Antwort war: »Sprich für dich selbst!«

Der Primatenforscher Alan Dixson führte vergleichende Untersuchungen durch, die ergaben, dass ein genereller Zusammenhang zwischen großem Penisknochen und längerem Geschlechtsverkehr besteht. Man kann also davon ausgehen, dass frühe Primaten, die einen großen Penisknochen hatten, länger kopulierten als heutige Primaten. Der Rückgang der Kopulationsdauer ging mit einer Verkleinerung des Penisknochens einher, bis er schließlich in der Stammlinie des Menschen vollständig verschwand. Mit

anderen Worten begünstigte die natürliche Selektion eine verhältnismäßig kurze Kopulation. In der Tat bestätigte eine umfangreiche multinationale Studie des Psychiaters Marcel Waldinger und seinen Kollegen, die 2005 veröffentlicht wurde, dass die Kopulation beim Menschen im Durchschnitt fünf Minuten dauert, wenngleich die Dauer in Ausnahmefällen bis zu fünfundvierzig Minuten betragen kann.

Der fehlende Penisknochen liefert nicht nur Erkenntnisse über die Evolution des menschlichen Geschlechtsverkehrs. Möglicherweise erlaubt dieses besondere Merkmal eine Neudeutung, wie die biblische Geschichte über die Schöpfung Evas entstand. Diese Geschichte — laut der Eva aus einer Rippe Adams erschaffen wurde — ist selbstverständlich symbolisch. Aber ein Aufsatz des Biologen Scott Gilbert und des Bibelwissenschaftlers Ziony Zevit, der 2001 veröffentlicht wurde, präsentierte einen neuen Blickwinkel. Das hebräische Wort *tzela*, in der deutschen Version der Bibel mit »Rippe« übersetzt, hat eigentlich mehrerer Bedeutungen, darunter Stützstrebe. Gilbert und Zevit vermuteten, dass das Wort *tzela* möglicherweise auf den Penisknochen hinweist. Dieser Knochen fehlt Männern, während die Rippen im Skelett ausnahmslos vorhanden sind. Dennoch ist nicht klar, wie die Verfasser der biblischen Geschichte über Evas Schöpfung wissen konnten, dass der fehlende Penisknochen beim Menschen etwas Besonderes ist. Bei den domestizierten Säugetieren haben auch alle Huftiere keinen Penisknochen. Wie erwähnt, ist er bei Hunden gut entwickelt, bei Katzen aber relativ klein. Jede Vorstellung, dass ein Knochen des menschlichen Penis fehlt, muss demnach wohl aus Vergleichen mit Hunden stammen.

BEI SÄUGETIEREN BESITZT JEDES MÄNNCHEN EINEN PENIS, der für die innere Befruchtung versteift werden kann und während der Paarung dazu dient, Abermillionen von winzigen Spermien in den weiblichen Genitaltrakt zu ejakulieren. Diese beiden Eigenschaften der menschlichen Fortpflanzung reichen bis zu den Vorfahren der Säugetiere vor mehr als zweihundert Millionen Jahren zurück. Einige grundlegende Merkmale der Spermienstruktur und -produktion haben noch frühere Ursprünge. Säugetiere und andere Wirbeltiere zum Beispiel haben alle ein Hodenpaar mit spermienbildenden Kanälchen. Bis zu ihrer Freisetzung im Ejakulat werden Spermien im Endstück des eng aufgewickelten Nebenhodens (Epididymis) gelagert. Komplet

ausgerollt wäre ein menschlicher Nebenhoden etwa sieben Meter lang und damit vergleichbar mit einem durchschnittlichen Autoparkplatz. Die Wanderung der Spermien durch den Nebenhoden dauert zwei bis drei Wochen. Insgesamt beträgt der Vorrat jeweils etwa vierhundert Millionen Spermien.

Jedes Kanälchen in den Hoden produziert zyklisch Spermien. Beim Menschen dauert dieser Vorgang ungefähr elf Wochen. Das ist der längste Zeitraum, der bei Säugetieren bekannt ist. Da die Röhrchengruppen sich permanent in verschiedenen Stadien der Spermienbildung befinden, können aktive Hoden kontinuierlich reife Spermien liefern. Bei Arten, die ein jahreszeitliches Fortpflanzungsmuster aufweisen, können die Hoden außerhalb der Fortpflanzungsperiode stark verkleinert und vollkommen stillgelegt werden. Die meisten Lemuren Madagaskars haben ein strikt saisonales Fortpflanzungsmuster, und die Hoden schrumpfen außerhalb der Paarungszeit drastisch. Bei den Mausmakis zum Beispiel sind die Hoden während der Begattungszeit zehnmal größer. Bei anderen Säugetieren, wie dem Menschen, findet die Fortpflanzung während des ganzen Jahres statt, und bei Männern sind die Hoden dementsprechend kontinuierlich aktiv. Nach Erreichen der Geschlechtsreife produzieren die beiden walnussgroßen Hoden eines Mannes durchschnittlich etwa hundertfünfzig Millionen Spermien pro Tag. Dies entspricht 1.500 Spermien pro Herzschlag und über vier Billionen pro durchschnittlicher Lebensdauer eines Mannes. Obwohl beim Menschen keine jahreszeitliche Fortpflanzungsperiode existiert, gibt es trotzdem einen erkennbaren Jahreszyklus beim Testosteronspiegel und bei der Spermienbildung, den ich im nächsten Kapitel diskutieren werde.

Jede Samenzelle hat drei Hauptteile: Ein Kopf mit dem Zellkern, ein mit Mitochondrien gefülltes Mittelstück (eigentlich ein Treibstofftank) und ein Schwanz, der den Samen teilweise auf dem Weg zum Ei vorantreibt. Im Kern des Spermienkopfes sind die Chromosomen extrem dicht gepackt. Die Gene sind inaktiv, weil die kondensierte, fast kristalline DNS um spezielle Proteine gewickelt ist. Obwohl Spermien bei allen Säugetieren dieselbe Grundorganisation haben, variiert die Form zwischen den Arten enorm. Trotz der Tatsache, dass die Größe der Spermien zwischen den Arten variiert, gibt es erstaunlicherweise keinen direkten Zusammenhang zur Körpergröße: Spermien von Mausmakis, Ratten, Menschen, Elefanten und Walen sind alle ziemlich ähnlich groß. Es gibt sogar eine schwache Tendenz, dass die Spermien bei größeren Säugetieren kleiner werden.

OFT WIRD BEHAUPTET, DAS ENGLISCHE WORT »TESTIFY« käme daher, dass ein Zeuge während der Römerzeit seine Hoden in die rechte Hand nahm, bevor er aussagte. Ungeachtet der Quelle ist unbestritten, dass das lateinische Wort *Testis* ursprünglich »Zeuge« bedeutete, und jeder Mann kann bezeugen, dass seine Hoden sich in einer ziemlich gefährlichen Position befinden. Um das Risiko einer Verletzung zu verringern, haben japanische Sumo-Ringer angeblich gelernt, ihre Hoden in die Eingänge der Leistenkanäle zu massieren. Britische Cricketspieler dagegen tragen ein Schutzgehäuse, um sich gegen die Bedrohung harter Geschosse abzuschirmen. Die Verlagerung der Hoden in ein Skrotum außerhalb der Bauchhöhle ist wirklich außergewöhnlich und bedarf einer Erklärung. Warum wandern menschliche Hoden in eine solche gefährliche Lage?

Bei allen Säugetieren steht die Entwicklung der Fortpflanzungsorgane und der Harnorgane in engem Zusammenhang. Infolgedessen nehmen die Hoden oben in der Bauchhöhle neben den Nieren ihren Anfang. Die Hoden müssen deshalb nach hinten und abwärts wandern, um in einen Sack außerhalb der Bauchhöhle zu gelangen. Nach der Wanderung durch die Bauchhöhle passieren die Hoden die Leistenkanäle und kommen im Skrotum an. Das Tragen der Hoden außerhalb der Bauchhöhle ist ein Sondermerkmal, das bei den meisten Säugetieren, aber bei keiner anderen Tiergruppe vorkommt. Es ist auch typisch für alle Primaten und den Menschen.

Eine tatsächlich ernst gemeinte Erklärung für das Hinunterwandern der Hoden lautete, es hätte etwas mit dem höheren Energieumsatz früher Säugetiere zu tun. Da sie mehr herumliefen, seien ihre Hoden wegen der Schwerkraft abgesunken. Als ich von diesem absurden Vorschlag zum ersten Mal hörte, stellte ich mir sofort andere, schwerere Körperorgane — wie Herz, Magen, Nieren — vor, die in speziellen Beuteln unterhalb des Körpers herumschwingen. Ein ähnlicher, aber eher ernst zu nehmender Vorschlag ist, dass die Hoden bei gewissen Säugetieren hinunterwandern, um Erschütterungen zu vermeiden, die durch Druck in der Bauchhöhle bei starker Aktivität entstehen können. Aber auch in diesem Fall müsste die Erklärung für weitere Körperorgane gelten.

Die derzeit häufigste Erklärung ist, dass die Hoden aus der Bauchhöhle hinunterwandern, um der erhöhten Körpertemperatur zu entgehen. Oft wird behauptet, dass bei der erhöhten Temperatur in der Bauchhöhle keine Spermien produziert werden könnten. Auf den ersten Blick sprechen einige

Indizien für diese Erkenntnis. Hin und wieder wandern die Hoden beim Menschen nicht hinunter (Mediziner sprechen dann von Kryptorchismus). Wenn dies geschieht, sind die Hoden gewöhnlich bedeutend kleiner als normal. Bei etwa drei Prozent männlicher Neugeborenen befinden sich die Hoden noch in der Bauchhöhle, bei Frühgeburten ist die Quote sogar noch höher. In 80 Prozent der Fälle wandern die widerspenstigen Hoden während des ersten Lebensjahrs hinunter, und bei den übrigen Fällen meist im Verlauf der weiteren Entwicklung. Falls sich die Hoden nach der Pubertät aber immer noch in der Bauchhöhle befinden, wird die Spermienbildung verhindert, und ein chirurgischer Eingriff ist notwendig, um die Fertilität zu ermöglichen.

Menschliche Hoden und die anderer Primaten befinden sich bei niedrigerer Temperatur außerhalb der Bauchhöhle wegen einer Anpassung, die ihre gemeinsamen Vorfahren bereits vor achtzig Millionen Jahren vollzogen. Daher ist es wenig verwunderlich, dass das anormale Zurückbleiben der Hoden in der Bauchhöhle die Spermienbildung unterdrückt, auch wenn die Evolution des Hodenabstiegs einen ganz anderen Grund hat. Im Gegensatz dazu gibt es viele Arten, bei denen die Spermien trotz erhöhter Körpertemperatur gebildet werden. Bei Vögeln zum Beispiel wandern die Hoden nie hinunter, obwohl ihre durchschnittliche Körpertemperatur sogar noch höher als die der Säugetiere ist. Obwohl die Hoden bei den meisten Säugetieren hinunterwandern, gibt es außerdem viele Ausnahmen. In diesen Fällen bleiben die Hoden in der Bauchhöhle, und befinden sich häufig nicht weit von ihrer ursprünglichen Lage in der Nähe der Nieren.

Säugetiere, bei denen die Hoden in der Bauchhöhle zurückbleiben, haben keineswegs eine niedrigere Körpertemperatur als diejenigen, deren Hoden hinunterwandern. Deswegen kann man die Vorstellung, dass eine erhöhte Körpertemperatur zwangsläufig die Spermienbildung verhindert, schlichtweg vergessen. In der Tat weisen verschiedene Erkenntnisse darauf hin, dass das Hinunterwandern der Hoden nicht mit der Bildung von Spermien, sondern deren Speicherung zusammenhängt. Wie erwähnt, werden reife Spermien bis zur Ejakulation im Nebenhoden gespeichert. Bei einigen Säugetieren wandern die Hoden an sich nicht hinunter, aber der Nebenhoden zur Wand der Bauchhöhle. Selbst bei Säugetieren, bei denen Hoden und Nebenhoden hinunterwandern, wandert der Nebenhoden zuerst und generell weiter als der Hoden. Dazu kommt die Tatsache, dass die Haut ober-

halb des Nebenhodens, aber nicht oberhalb des Hodens selbst, oft unbehaart ist und daher leichter abkühlt. Das Argument, dass die niedrigere Temperatur in einem hinuntergewanderten Nebenhoden die Verfügbarkeit von Sauerstoff für die gespeicherten Spermien steigert, ist überzeugend.

Aus der Vogelkunde stammen Hinweise für den Zusammenhang zwischen der Speicherung der Spermien und dem Abstieg der Hoden bei Säugetieren. Vögel speichern ihre Spermien in Samenbläschen, deren Funktion den Nebenhoden der Säugetiere entsprechen. Bei bestimmten Singvögeln befinden sich die Samenbläschen in Taschen nahe der Peniswurzel, wo die Temperatur um einige Grade kühler ist als die normale Körpertemperatur. Singvögel haben im Allgemeinen einen höheren relativen Energieumsatz als andere Vögel, daher ist es möglich, dass bei gewissen Arten die Spermien aus ähnlichen Gründen bei einer niedrigeren Temperatur gespeichert werden, wie denen, die zum Hinunterwandern der Hoden bei Säugetieren geführt haben. Trotzdem können die meisten Vögel mit einer relativ hohen Körpertemperatur Spermien in der Bauchhöhle sowohl bilden als auch speichern. Aus diesem Grund muss es eine Besonderheit geben, die zum weitverbreiteten Hinunterwandern der Hoden bei Säugetieren beigetragen hat. Womöglich ist die zuverlässige Speicherung eine besondere Herausforderung für die Spermien der Säugetiere, weil ihnen ein langer Weg bevorsteht, um ein kleines Ei zu befruchten.

Normalerweise werden die Hoden aktiv, wenn ein Männchen erwachsen wird. Dabei handelt es sich um den Zeitpunkt, an dem die Hoden bei Säugetieren gewöhnlich ins Skrotum hinunterwandern. Aber Primaten sind in dieser Hinsicht Ausnahmen: Ihre Hoden sind bei der Geburt bereits hinuntergewandert. Bei neugeborenen Männchen befinden sich die Hoden zumindest tief unten in der Bauchhöhle im Bereich der Leistenkanäle, meist sind sie aber schon ins Skrotum gewandert. Beim Menschen bleiben die Hoden eines männlichen Fötus etwa bis zum siebten Schwangerschaftsmonat in der Bauchhöhle, bei der Geburt ist der Abstieg aber meist vollzogen. Der frühe Abstieg der Hoden bei Primaten ist umso überraschender, weil sie im Vergleich zu anderen Säugetieren generell länger brauchen, um die Geschlechtsreife zu erreichen. Warum sind die Hoden beim Primaten bereits bei der Geburt hinuntergewandert, obwohl erst beträchtliche Zeit später Spermien produziert werden? Der einzige verfügbare Hinweis besteht darin, dass die männlichen Nachkommen aller bisher untersuchten Primaten-

arten etwa zum Zeitpunkt der Geburt einen raschen Anstieg des Hormons Testosteron aufweisen. Möglicherweise ist dies eine wichtige Neuentwicklung bei der Primatenevolution, nämlich ein Geschlechtssignal beim Kind, das der Mutter die Unterscheidung zwischen neugeborenen Söhnen und Töchtern erleichtert.

WIE OBEN ERWÄHNT, IST SCHON LANGE BEKANNT, dass Spermien durch Erwärmung beschädigt werden. Hippokrates erwähnte dies in zwei seiner Aphorismen. Die Hoden im Skrotum eines Mannes sind nur etwa 2,5°C kälter als seine Körpertemperatur, aber das reicht für den Unterschied zwischen Fertilität und Infertilität aus. Daraus ergibt sich die interessante Möglichkeit, dass die Erwärmung der Hoden die Fertilität reduzieren und vielleicht sogar als simple Methode der Geburtenkontrolle dienen könnte. Der Fertilitätsexperte John MacLeod und sein Kollege Robert Hotchkiss untersuchten dieses Thema gezielt in einer Veröffentlichung aus dem Jahre 1941. Mittels einer Fiebertherapie-Kammer, die den ganzen Körper der Versuchspersonen umschloss, wurde trockene Hitze zugeführt. Die dadurch erreichte Erhöhung der Körpertemperatur bei gleichzeitiger Zunahme der Umgebungstemperatur führte zu einer deutlichen Abnahme der Spermienproduktion. Es dauerte fast drei Wochen, bis die Erwärmung sich auswirkte, aber die Wirkung hielt etwa zwei Monate lang an.

Einige Zeit verging, bis dieses Verfahren weiter untersucht wurde. Erst 1965 veröffentlichten die Fertilitätsforscher John Rock und Derek Robinson ihre Ergebnisse, nachdem sie das Skrotum bei normalen Männern experimentell erwärmt hatten. Unter anderem berichteten sie, dass das Skrotum 1°C wärmer als die Körpertemperatur wurde, wenn die Versuchspersonen bis zum Hals in ein warmes Bad (43°C) eintauchten. Bei einem Experiment trugen Probanden mindestens sechs Wochen lang isolierende Unterwäsche, die den Temperaturunterschied zwischen dem Skrotum und dem Körper auf 1°C anstatt 2,5°C reduzierte. In allen Fällen sank die Anzahl der Spermien nach etwa drei Wochen, und die niedrigsten Werte wurden zwischen der fünften und neunten Woche erreicht. Die niedrige Spermienanzahl hielt noch drei bis acht Wochen an, nachdem die Männer aufgehört hatten, die isolierende Unterwäsche zu tragen. Die Spermienanzahl normalisierte sich wieder etwa drei Monate nach Ende der Behandlung. Die Ergebnisse von

zwanzig Männern, die schon zu Beginn der Untersuchung wenige Spermien hatten, waren besonders interessant. Nachdem das Skrotum an sechs alternierenden Tagen dreißig Minuten lang in warmes Wasser getaucht worden war, dauerte es zwischen zwei Wochen und vier Monate, bis die Spermienanzahl sank. Bei neun Männern stieg die Anzahl nach dem Ende der Behandlung auf höhere Werte als zuvor, und in sechs Fällen wurden ihre Frauen innerhalb von fünf Monaten nach der Behandlung schwanger.

Eine Folgeuntersuchung, die 1968 von Derek Robinson, John Rock und Miriam Menkin veröffentlicht wurde, legte Ergebnisse aus Experimenten vor, bei denen das Skrotum von Versuchspersonen an vierzehn aufeinanderfolgenden Tagen mittels einer 150-Watt-Glühbirne 30 Minuten lang erwärmt wurde. Dieses Vorgehen führte zunächst zu einem Rückgang der Spermienproduktion, aber darauf folgte eine vorübergehende Erhöhung der Spermienmenge. Einige Wochen nach der Erwärmung mit der Glühbirne legte man an 14 aufeinanderfolgenden Tagen etwa eine halbe Stunde lang einen Eisbeutel auf das Skrotum. Diese Kältebehandlung, bei der die Temperatur des Skrotums um etwa 7°C reduziert wurde, sorgte dafür, dass die Spermienproduktion sich ohne vorübergehenden Rückgang verdreifachte. Kurz gesagt, führte eine Erwärmung der Hoden zu einer Reduzierung der Spermien, während eine Abkühlung die Spermienproduktion vorantrieb. Diese Ergebnisse legten nahe, bestimmte Formen der männlichen Infertilität anders zu behandeln. Seit den Studien von Rock gab es ein paar Untersuchungen, die die Erwärmung der Hoden als mögliche Methode zur Geburtenkontrolle überprüften. 1992 beispielsweise berichtete der Chirurg Ahmed Shafik, dass nach etwa fünf Monaten die Spermienproduktion zurückgeht, wenn man ein Jahr lang eine PolyesterSchlinge um das Skrotum herum trägt. Obwohl diese Auswirkung nachweislich umkehrbar ist, führte diese Methode bisher zu keiner praktischen Anwendung.

EINE ERWÄRMUNG DES SKROTUMS schon um wenige Grade kann offensichtlich die Spermienproduktion beeinträchtigen. Damit stellt sich die Frage, ob die Spermienanzahl durch gewisse Tätigkeiten oder bei gewissen Berufen reduziert wird. Zum Beispiel gibt es mehrere medizinische Berichte darüber, dass eng anliegende Unterwäsche die Qualität der Samenflüssigkeit vermindern kann. Eine 1995 veröffentlichte Untersuchung der Gynäko-

login Carolina Tiemessen und ihrer Kollegen wurde ausschließlich durchgeführt, um diese Möglichkeit zu testen. In zufälliger Reihenfolge trugen neun Freiwillige — die alle auf warme Bäder, Saunagänge und Heizdecken verzichteten — sechs Monate lang ununterbrochen entweder eng anliegende oder locker sitzende Unterwäsche. Unter diesen beiden Bedingungen waren die Spermienanzahl und -beweglichkeit signifikant verschieden. Bei locker sitzender Unterwäsche war eine durchschnittliche Spermienanzahl normal, während die Anzahl bei eng anliegender Unterwäsche um fast die Hälfte zurückging. Die Beweglichkeit der Spermien war bei eng anliegender Unterwäsche noch stärker beeinträchtigt, sie sank sogar um zwei Drittel.

Vermutet wurde auch, dass das Führen eines Fahrzeugs über einen längeren Zeitraum eine Überhitzung des Skrotums und damit eine Reduktion der Spermienanzahl zur Folge haben könnte. 1979 veröffentlichten die Fertilitätsforscher Mihály Sas und János Szöllösi das Ergebnis einer Studie, bei der rund dreitausend Patienten untersucht worden waren. Innerhalb dieser Stichprobe gab es etwa dreihundert Berufskraftfahrer, die erhöhte Störungen der Spermienproduktion aufwiesen. Während die Verschlechterung der Spermienproduktion bei Autofahrern relativ gering war, wiesen Benutzer von Industrie- und Landwirtschaftsmaschinen größere Störungen auf. Außerdem stieg die Häufigkeit schwerwiegender Fälle bei zunehmender Dauer der Fahrtätigkeit. Unter hundert Männern, die mehr als acht Jahre als Berufskraftfahrer verbracht hatten, zeigten nur vier ein normales Spermienprofil. Sas und Szöllösi erörterten verschiedene Gründe für die Störung der Spermienproduktion wie zum Beispiel Umweltverschmutzung, die Erwärmung des Skrotums als Ursache des Problems blieb jedoch merkwürdigerweise unerwähnt.

Auch Taxifahrer in Rom waren Gegenstand einer Studie. Eine Forschungsgruppe der Arbeitsmedizinerin Irene Figà-Talamanca untersuchte die Auswirkungen langjährigen Autofahrens und veröffentlichte 1986 die Ergebnisse. Zwar waren Spermienanzahl und -beweglichkeit nicht betroffen, doch hatten die Taxifahrer im Vergleich zu normalen Kontrollpersonen einen kleineren Anteil normaler Spermien, und die Auswirkung nahm mit zunehmender Dauer der Fahrtätigkeit zu. Bei Männern mit minderwertigen Spermien dauerte es häufiger länger, bis ihre Partnerinnen schwanger wurden. Anhand statistischer Verfahren konnten die Forscher verschiedene Störfaktoren ausschließen. Die gute Nachricht ist, dass einer dieser Fakto-

ren — gemäßigter Alkoholkonsum — tatsächlich eine kleine Verbesserung des Samenprofils zur Folge hatte.

Wenig überraschend ist, dass regelmäßige Saunabesuche die Spermienproduktion beeinträchtigen können. Passenderweise veröffentlichte ein finnischer Gynäkologe namens Berndt-Johan Procopé 1965 zu diesem Thema eine Pionierarbeit. Bei einem Dutzend Männer, die während zwei Wochen insgesamt zweieinhalb Stunden in der Saunahitze zubrachten, beobachtete er eine vorübergehende, reversible Abnahme der Spermienanzahl. Ungefähr einen Monat nach Ende der Behandlung war die Spermienanzahl etwa halb so groß.

Männer können auch auf andere Weise ihre Hoden überhitzen. Ein recht neuer Übeltäter in dieser Beziehung ist ein heißer Laptop, dessen Auswirkungen vom Urologen Yefim Sheynkin und seinen Kollegen 2011 dargelegt wurden. Bei 29 gesunden männlichen Freiwilligen maßen sie die Temperaturen des Skrotums, eines Laptops und eines Schosskissens während drei einstündigen Sitzungen, die unter jeweils verschiedenen Bedingungen durchgeführt wurden. Die Temperatur des Skrotums nahm unabhängig von der Beinstellung oder der Verwendung eines Schosskissens unter allen drei Bedingungen zu. Die Zunahme war mit nur 1,5°C am kleinsten, wenn die Versuchsperson ein Schosskissen unterhalb des Laptops hatte und ihre Beine im Siebzig-Grad-Winkel spreizte. Die größte Zunahme, um fast 2,5°C, trat auf, wenn die Beine ohne Schosskissen eng zusammengepresst waren. Eine mittlere Erhöhung kam zustande, wenn die Beine unter einem Schosskissen zusammengepresst wurden. Bei dieser Studie wurden die Auswirkungen eines Temperaturanstiegs des Skrotums auf die Qualität der Samenflüssigkeit nicht untersucht, aber Untersuchungen mit anderen Methoden der Erwärmung weisen darauf hin, dass die langfristige Verwendung eines Laptops vor allem dann die Fertilität beeinträchtigen kann, wenn der Computer direkt im Schoss mit zusammengepressten Beinen verwendet wird.

BEI EINIGEN SÄUGETIERARTEN KANN SOZIALER STRESS die normale Funktionsweise der Hoden stören. Eine experimentelle Untersuchung bei Spitzhörnchen (Tupajas), die vom Verhaltensphysiologen Dietrich von Holst durchgeführt wurde, brachte extreme Auswirkungen zum Vorschein. Werden zwei Männchen im gleichen Käfig gehalten, wird eines davon inner-

halb einiger Stunden dominant, worauf das unterlegene Männchen Stresssymptome zeigt, die im Laufe der Zeit immer schwerwiegender werden. Eine frühe Reaktion ist der Rückzug der Hoden aus dem Skrotum zurück in die Bauchhöhle. Wird das dominante Männchen entfernt, kehren die Hoden bald ins Skrotum zurück, und dauerhafte Schäden bleiben aus. Ein dauerhafter Rückzug der Hoden führt jedoch zu einer vollständigen Unterdrückung der Spermienproduktion. Schließlich kommt es zu einem physischen Zerfall der Hoden — das unterlegene Männchen ist endgültig entmannt.

Bei Menschen ist die Reaktion auf sozialen Stress glücklicherweise nicht ganz so extrem. Trotzdem kann psychologischer Stress auf menschliche Hoden und Spermien einen etwas subtileren Einfluss haben und zu reduzierter Fertilität führen. Bekanntlich ist Infertilität selbst eine Hauptursache für psychologischen Stress, so dass infertile Paare in einem Teufelskreis landen können. Davon abgesehen, weisen verschiedene Befunde darauf hin, dass schon mäßiger psychologischer Stress die Fertilität bei Männern beeinträchtigen kann, begleitet von einem sinkendem Testosteronspiegel und Störungen bei der Spermienbildung.

Selbstverständlich verursachen Kriegszustände in extremer Form psychologischen Stress. Eine amerikanische Studie verglich die Eigenschaften der Samenflüssigkeit von mehr als dreihundert Vietnamveteranen mit einer ähnlich großen Stichprobe von Veteranen, die ihren Militärdienst anderswo leisteten. Bei den Vietnamveteranen war die Spermienkonzentration signifikant niedriger und der Anteil von Spermien mit normaler Kopfform war niedriger, allerdings war kein Unterschied bei der Beweglichkeit der Spermien zu erkennen. Trotz dieser erkennbaren Unterschiede bei der Samenflüssigkeit zeugten die Vietnamveteranen nachweislich etwa gleich viele Kinder wie ihre Kollegen. 2008 veröffentlichte die Gynäkologin Loulou Kobeissi mit ihren Kollegen ein weiteres Beispiel zum Thema Krieg mit auffallenden Ergebnissen. Die Autoren analysierten Informationen aus zwei Infertilitätskliniken in Beirut, um die langfristigen Auswirkungen des langjährigen Bürgerkriegs im Libanon zu untersuchen. Sie verglichen 120 infertile Männer mit hundert fertilen Männern, die als Kontrollpersonen dienten. Infertile Männer hatten mit fast 60 Prozent höherer Wahrscheinlichkeit den libanesischen Bürgerkrieg durchgemacht und irgendein Kriegstrauma erlebt. Diese Auswirkung wurde den Kriegserfahrungen und dem anschließenden Ein-

fluss verschiedener Risikofaktoren — wie Stress, aber auch Vergiftungen, Verletzungen, usw. — zugeschrieben.

WÄHREND DER LETZTEN VIERZIG JAHRE wurde eine lebhafte Debatte über die beunruhigende Möglichkeit geführt, dass die menschliche Spermienanzahl seit den 1950er Jahren markant zurückgegangen ist. 1974 untersuchten die Fertilitätsexperten Kinloch Nelson und Raymond Bunge Samenflüssigkeitsproben von rund vierhundert Männern, die sich zwischen 1968 und 1972 für eine Vasektomie (Durchtrennen der Samenleiter) entschieden hatten. Sie entdeckten, dass die durchschnittliche Spermienanzahl pro Ejakulat vor der Vasektomie etwa 135 Millionen Spermien betrug. Nelson und Bunge hielten fest, dass diese Zahl viel kleiner war als der Durchschnitt von mehr als 300 Millionen Spermien, den frühere Untersuchungen ergeben hatten. Wegen des überraschenden Unterschieds zwischen diesen früheren Untersuchungen und ihren eigenen Befunden überprüften Nelson und Bunge die Samenflüssigkeitsanalysen von vierhundert Männern, bei denen zwischen 1956 und 1958 in ihrem Krankenhaus Unfruchtbarkeit festgestellt worden war. Bei einem Viertel dieser Männer betrug die Anzahl der Spermien über 300 Millionen. Nachdem sie sorgfältig einige andere Möglichkeiten ausgeschlossen hatten, kamen Nelson und Bunge zu dem Schluss, dass »eine Veränderung der fertilen männlichen Population zu einer markanten Verschlechterung der Ergebnisse von Samenflüssigkeitsanalysen geführt haben musste«.

Diese Behauptung und andere ähnliche Berichte lösten rasch eine lebhafte Kontroverse aus. Wissenschaftler beider Seiten der Debatte stützten ihre Argumente mit Daten aus größeren Stichproben, die zu verschiedenen Zeitpunkten und häufig an verschiedenen Orten gesammelt wurden. Letztlich untersuchte der Biologe William James, der während der letzten fünfzig Jahre mit großer Sorgfalt statistische Untersuchungen zur menschlichen Fortpflanzung durchgeführt hat, ob aus den Berichten über die Spermienmengen tatsächlich eine Tendenz abzuleiten war. Er ermittelte repräsentative Daten zur durchschnittlichen Spermienanzahl zufällig ausgewählter Männer während eines Zeitraums von 45 Jahren und veröffentlichte die Ergebnisse dann 1980. Seine Schlussfolgerungen waren eindeutig: »Es besteht kein ernsthafter Zweifel, dass die durchschnittliche Spermienanzahl zumindest seit 1960 zurückgegangen ist.«

Einige Kritiker vermuteten, dass Veränderungen der Methoden, die im Verlauf der Jahre bei der Analyse der Samenflüssigkeit verwendet wurden, die registrierten Spermienmengen eventuell beeinflusst hatten. Und diese Möglichkeit war eine ernsthafte Überlegung wert. Aber der australische Veterinärmediziner Brian Setchell schloss dieses potentielle Problem auf elegante Weise aus. Vergleichbare Methoden wurden häufig auch verwendet, um die Spermienmengen in der Samenflüssigkeit von Nutztieren zu bestimmen, die somit aufgrund der veränderten Methoden ebenfalls einen Rückgang aufweisen müssten. Seit Anfang der 1930er Jahre stehen Daten zur Spermienanzahl von Rindern, Schweinen und Schafen zur Verfügung. In einer Veröffentlichung aus dem Jahr 1997 fasste Setchell die Daten von mehr als dreihundert Publikationen aus dem Zeitraum von 1932 bis 1995 zusammen. Weder bei Stieren noch bei Ebern gab es mit der Zeit eine signifikante Veränderung der Spermienanzahl. Und bei Schafen gab es sogar eine kleine, aber signifikante Zunahme. Seinen Bericht beendet Setchell mit den weisen Worten: »Wenn es tatsächlich einen Rückgang der menschlichen Spermienanzahl gibt, muss es eine Ursache geben, die sich auf Nutztiere nicht auswirkt.«

Die Berichte über rückläufige Spermienmengen beim Menschen wurden immer häufiger. Zwei neuere Berichte lieferten überzeugende Belege für deutliche Rückgänge der Spermienanzahl während der letzten zwanzig Jahre in Israel und Frankreich. Eine Gruppe unter der Leitung der Infertilitätsforscherin Ronit Haimov-Kochman veröffentlichte 2012 völlig neue Informationen aus Israel. Darin wurden die Ergebnisse einer retrospektiven Analyse von mehr als zweitausend wöchentlichen Spermaproben veröffentlicht, die von 58 jungen Spendern gegen Entschädigung während der fünfzehnjährigen Periode von 1995 bis 2009 gesammelt wurden. Während dieser Zeitspanne sanken die Spermamengen signifikant um fast vierzig Prozent, von über dreihundert Millionen auf rund zweihundert Millionen. Infolgedessen ist es zunehmend schwierig geworden, Spermispendern zu finden, die den Kriterien der Fertilitätskliniken entsprechen. Haimov-Kochman und ihre Kollegen kamen zu dem Schluss, dass diese rasche Verschlechterung der Qualität der Samenflüssigkeit unter fertilen Samenspendern zur Schließung der Spenderprogramme führen könnte. Ein zweiter Bericht, der ebenfalls 2012 von der Epidemiologin Joëlle Le Moal und ihren Kollegen veröffentlicht wurde, entdeckte mittels einer landesweiten Erhebung einen ähn-

lichen Rückgang der Spermienanzahl in Frankreich. Bei dieser ebenfalls retrospektiven Untersuchung wurden die Spermienmengen von fast 27.000 Männern analysiert, die an Programmen der assistierten Reproduktionstechnik teilnahmen, weil ihre Partnerinnen völlig infertil waren. Während der 17 Jahre zwischen 1989 und 2005 nahmen die Spermienmengen kontinuierlich um fast zwei Prozent pro Jahr ab. Der Gesamtrückgang während des Untersuchungszeitraums betrug etwa 32 Prozent mit einer Reduktion von rund 220 Millionen Spermien pro Ejakulat im Jahr 1989 bis unter 150 Millionen im Jahr 2005.

Noch beunruhigender ist die Tatsache, dass die rückläufige Spermienanzahl anscheinend mit einer Zunahme der Anomalien im männlichen Fortpflanzungssystem — darunter Kryptorchismus, Penissmissbildungen und Hodenkrebs — einhergeht. Diese Tendenz wirft die Möglichkeit auf, dass die Faktoren, die für den Rückgang der Spermienanzahl verantwortlich sind, vielleicht zunehmend gravierende Auswirkungen auf die männlichen Geschlechtsorgane an sich haben. Als Hinweis auf eine mögliche Verbindung stellte eine Forschungsgruppe in Dänemark fest, dass dänische Männer fünfmal so oft Hodenkrebs bekommen wie Finnen, während ihre Spermienanzahl um mehr als 40 Prozent niedriger ist. Der markante Qualitätsrückgang der Samenflüssigkeit und die gleichzeitige Zunahme der Anomalien in den männlichen Geschlechtsorganen, die in gerade einmal fünfzig Jahren stattfand, sind zweifellos Umweltfaktoren und keinen genetischen Veränderungen zuzuschreiben.

Ein Grund für die Kontroverse über rückläufige Spermienmengen liegt darin, dass die beschriebenen Tendenzen von Population zu Population verschieden sein können. Sogar Länder, die nicht weit voneinander liegen, wie Dänemark und Finnland, können deutliche Unterschiede aufweisen. Dies deutet darauf hin, dass Faktoren wie Umweltverschmutzung dafür verantwortlich sein könnten, und Belege weisen tatsächlich auf einen Zusammenhang zwischen rückläufigen Spermienmengen und regionalen Giftstoffen hin. 2006 veröffentlichte die Gynäkologin Rebecca Sokol Ergebnisse einer bemerkenswerten Untersuchung in Los Angeles, also der Stadt, aus der das Sprichwort »Einer Luft, die wir nicht sehen können, vertrauen wir nicht« stammt. Bei der Suche nach einem Zusammenhang zur Umweltverschmutzung analysierte die Sokol-Gruppe Proben aus einer Spermabank, die innerhalb von drei Jahren von 48 Wiederholungsspendern gesammelt worden

war. Die Analyse erbrachte einen einheitlich signifikanten Befund: Ein Anstieg des Ozonwerts ging mit einem Rückgang der Spermienanzahl einher. Falls das klaffende Ozonloch, das der Mensch in unserer Atmosphäre verursacht hat, Ihre Aufmerksamkeit bisher nicht erregt hat, dürfte dies nun der Fall sein.

IN DER TAT GIBT ES UNTER DEN UMWELTFAKTOREN MEHRERE KANDIDATEN, die für einen Rückgang der Spermienanzahl verantwortlich sein können. Einige Befunde deuten beispielsweise darauf hin, dass Rauchen und übermäßiges Trinken während der Schwangerschaft die spätere Spermienbildung bei Söhnen beeinträchtigen können. Eine andere Entdeckung, die erst vor kurzem gemacht wurde, ergab, dass Chemikalien in synthetischen Produkten als spermenschädliche Giftstoffe in Frage kommen. Ein immer häufiger vorkommendes Beispiel dafür ist Bisphenol A (BPA), eine chemische Verbindung, die bei der Herstellung von Polycarbonaten, Epoxidharzen und verschiedenen anderen alltäglichen Gegenständen wie DVDs, Sonnenbrillen, medizinischen Geräten, Autoteilen, Sportausrüstungen und Verglasungen verwendet wird. Hitzebeständige Polycarbonate werden vielfach bei Nahrungsmittelverpackungen oder als innere Beschichtung von Konservendosen verwendet. BPA zählt gegenwärtig zu den fünfzig meistproduzierten Chemikalien. Im Jahr 2008 betrug die weltweite Jahresproduktion rund fünf Millionen Tonnen, eine öffentliche Kontrolle findet aber erst seit kurzem statt. 2010 wurden in einem Bericht der »Food and Drug Administration« der Vereinigten Staaten Bedenken geäußert, ob man Föten, Säuglinge und junge Kinder damit in Kontakt kommen lassen sollte, während Kanada als erstes Land BPA offiziell als Giftstoff anerkannte. Gleichzeitig häuften sich beunruhigende Berichte über die schädliche Wirkung von BPA. Mehrere Behörden stellten allerdings die Belege infrage, laut denen BPA giftig ist. Die Europäische Union vertritt weiterhin den offiziellen Standpunkt, dass der Kontakt mit Nahrungsmitteln ungefährlich sei, obwohl 2012 ein erneutes Risikogutachten erstellt wurde. Eines ist aber gewiss: In den Industrieländern kommt man jeden Tag mit BPA in Berührung. Besonders bei Erhitzung sickert dieser Stoff aus den Behältern in die Nahrung, außerdem wird er permanent in Blut- und Harnproben festgestellt. Besonders beunruhigend ist, dass die BPA-Werte bei Kindern im Allgemeinen doppelt so hoch

wie bei Erwachsenen sind, und bei Babys auf Neugeborenen-Stationen sogar zehnmal höher. In einem bemerkenswerten Experiment tranken siebenund-siebzig Harvard-Studenten eine Woche lang freiwillig Kaltgetränke nur aus Babyflaschen. Danach waren die BPA-Werte in ihren Harnproben um zwei Drittel erhöht.

2010 veröffentlichte eine chinesisch-amerikanische Forschungsgruppe unter der Leitung des Fortpflanzungsepidemiologen De-Kun Li einen Bericht über Sexualprobleme bei Männern, die an ihrem Arbeitsplatz BPA ausgesetzt waren. Die Forschungsgruppe führte Einzelgespräche mit Männern durch, die in chinesischen Fabriken arbeiteten und teilweise einer extrem hohen Belastung mit BPA ausgesetzt waren. Andere hingegen hatten keinen Kontakt mit BPA. Nach dem sorgfältigen Ausschluss mehrerer möglicher Störfaktoren stellten Li und seine Kollegen fest, dass die Gefahr, sexuelle Probleme zu bekommen, bei Arbeitern mit BPA-Kontakt zwischen vier- und siebenmal höher war als bei den Kontrollpersonen. Alle Bereiche der männlichen Sexualität waren betroffen: Das sexuelle Verlangen, Erektion, Ejakulation und die sexuelle Befriedigung waren allesamt beeinträchtigt. Überdies stieg die Gefahr sexueller Probleme bei zunehmendem Kontakt mit BPA. Arbeiter in Fabriken mit BPA-Kontakt hatten innerhalb eines Jahres nach der Anstellung zudem häufiger sexuelle Probleme. Es muss betont werden, dass der Kontakt mit BPA in den Fabriken manchmal extrem war. In bestimmten Fällen war die BPA-Konzentration in den Harnproben der Arbeiter etwa fünfzigmal höher als bei den Kontrollpersonen.

Ein Jahr später gaben Mitglieder derselben Forschungsgruppe die Ergebnisse einer Nachfolgestudie bekannt, bei der das direkte Verhältnis von der Qualität der Samenflüssigkeit und BPA-Werten in Harnproben untersucht wurde. Mehr als zweihundert Männer aus vier chinesischen Regionen mit und ohne Kontakt zu BPA am Arbeitsplatz wurden untersucht. Nach dem Ausschluss von Störfaktoren konnte eine Korrelation gestiegener BPA-Werte im Harn mit deutlich gesunkener Qualität der Samenflüssigkeit festgestellt werden. Bei Arbeitern mit feststellbaren BPA-Mengen im Harn war die Gefahr verminderter Spermienbeweglichkeit mehr als doppelt so groß, die Gefahr reduzierter Konzentration und Vitalität der Spermien mehr als verdreifacht und die Gefahr rückläufiger Spermienzahlen mehr als vervierfacht. Diese Ergebnisse waren die ersten Hinweise darauf, dass BPA die Qualität der Samenflüssigkeit beeinträchtigt.

Obwohl sich die Aufmerksamkeit hauptsächlich auf die Zufuhr von BPA durch Essen oder Trinken konzentriert, kann dieser Stoff auch direkt durch die Haut aufgenommen werden. Genau da liegt das Problem. BPA wird häufig bei Quittungen verwendet, die von Geräten mit einem Thermotransferverfahren ausgedruckt werden. Dieses Verfahren wird seit den 1970er Jahren vielfach bei Registrierkassen und Geldautomaten genutzt. Infolgedessen ist BPA mittlerweile auch zu einem Schadstoff in Recycling-Papier geworden. Thermopapier enthält nicht immer BPA, häufig befindet sich aber eine pulverige Schicht dieser Chemikalie auf einer Seite einer Quittung. 2010 wurden bei umfangreichen Labortests, die von der Environmental Working Group der Vereinigten Staaten in Auftrag gegeben worden waren und bei denen Stichproben von führenden Unternehmen und Dienstleistungsfirmen genommen wurden, bei vierzig Prozent der Quittungen hohe Konzentrationen von BPA gefunden. Die Gesamtmenge von BPA, die auf Quittungen gemessen wurde, war teilweise tausendmal so hoch wie bei anderen, eher thematisierten Quellen wie Plastikflaschen oder Lebensmittelkonserven. Wischtests im Labor zeigten, dass sich BPA leicht von Quittungen löst, und dies bedeutet, dass diese Chemikalie problemlos auf den Händen landen kann. Millionen von Verkäufern arbeiten an Registrierkassen, und jeder von ihnen berührt an einem einzigen Tag Hunderte von Quittungen mit einer BPA-Beschichtung. Kontrollen der Centers for Disease Control in den Vereinigten Staaten ergaben, dass Verkäufer durchschnittlich 30 Prozent mehr BPA in ihrem Körper haben als andere Erwachsene.

Da BPA 1891 erstmals hergestellt wurde, hat der Mensch schon lange damit zu tun. Spätestens seit den 1930er Jahren hätten aber die Alarmglocken schrillen müssen. Damals wurde BPA experimentell an weiblichen Ratten getestet, nachdem man diesen mit einem chirurgischen Eingriff die Eierstöcke entfernt hatte, und es wirkte wie ein Steroidhormon. Wenn man BPA (oder eine von zwölf verwandten Chemikalien) an weibliche Ratten ohne Eierstöcke verfütterte, entsprach die Auswirkung auf die Scheidenschleimhaut einer Behandlung mit Östrogenen. Seit mehr als siebzig Jahren wissen wir also, dass BPA wie ein Östrogen wirkt. Von offizieller Seite heißt es aber, dass BPA weniger wirksam als echte Östrogene sei und bei der Verdauung rasch aus dem menschlichen Körper ausgeschieden würde. Aus diesen Gründen, so heißt es, stelle BPA kaum ein signifikantes Risiko für unsere Gesundheit dar. Die Website der Polycarbonate/BPA Global Group des American Chemistry

Council gibt an, dass BPA vollkommen ungefährlich sei. 2008 bekräftigte die Food and Drug Administration (FDA) der Vereinigten Staaten diese Einschätzung, aber der Kongress hat vernünftigerweise Schritte eingeleitet, um die Verwendung von BPA einzuschränken, und die FDA gebeten, die Sachlage nochmals zu überprüfen. Bis heute wurde jedoch keine endgültige Maßnahme eingeleitet. Aber wir sollten dringend herausfinden, ob Umwelttoxine wie BPA nicht nur Spermien beschädigen, sondern auch die Eier und die Eierstöcke. Als ersten Schritt in dieser Richtung müssen wir die Evolution der weiblichen Geschlechtsorgane und -zellen verstehen. Bis zu diesem Punkt ging es in diesem Kapitel nur um die männlichen Aspekte der Fortpflanzung, aber das war lediglich der Auftakt zum viel größeren Beitrag, den alle weiblichen Säugetiere leisten.

GENAU WIE DIE MÄNNER BEI DEN HODEN UND SPERMIEN teilen auch Frauen die grundlegenden Eigenschaften ihrer Eierstöcke und Eier mit allen anderen weiblichen Säugetieren. Auf jeder Seite des weiblichen Körpers befindet sich ein Eierstock. Wie der Hoden des Männchens wird auch der Eierstock in engem Zusammenhang mit der benachbarten Niere entwickelt, er ist aber bedeutend kleiner. Ein menschlicher Eierstock ist etwa so groß wie eine Mandel und hat damit ein Volumen, das nur einem Drittel der Größe eines Hodens entspricht. Überdies verlagern sich Eierstöcke nie sehr weit von ihrer Ausgangslage in der Bauchhöhle.

Jeder Eierstock liegt in der Nähe des Trichters eines röhrenförmigen Eileiters, der zur Gebärmutter führt. Nach dem Eisprung (auch Ovulation genannt), bei dem ein Ei vom Eierstock freigesetzt wird, landet das Ei im Eileitertrichter, von wo es anschließend zur Gebärmutter hinunterwandert. Zuerst gelangt das Ei in die Ampulla, einen Teil des Eileiters, dessen Innenoberfläche sehr faltig ist. Um die Gebärmutter zu erreichen, muss das Ei dann durch den Isthmus, den nächsten Abschnitt des Eileiters mit einer glatteren Oberfläche, wandern. Die Befruchtung des Eis mit einem Samenfaden findet normalerweise in der Nähe des Übergangs zwischen der Ampulla und dem Isthmus statt.

Bei den meisten Säugetieren wird der Eierstock von einer Gewebetasche, der Bursa, umhüllt. Diese fast vollständige Umhüllung des Eierstocks — mit Ausnahme einer kleinen Öffnung zur Bauchhöhle — sorgt dafür, dass das Ei

am Anfang seiner Reise zur Gebärmutter sicher im Eileitertrichter landet. Da Lemuren, Loris und die meisten Nichtprimaten unter den Säugetieren eine Bursa um den Eierstock haben, ist das höchstwahrscheinlich der Urzustand. Bei Koboldmakis, Affen, Menschenaffen und Menschen ist die Bursa aber verschwunden. Auf den ersten Blick ist dieser Unterschied rätselhaft. Normal würde man davon ausgehen, dass der Verlust der Bursa im Verlauf der Evolution das Risiko erhöhte, dass ein Ei in die Bauchhöhle entweicht, anstatt sicher in den Eileiter zu gelangen.

In seltenen Fällen kommt es tatsächlich vor, dass ein Ei nicht in den Eileiter gelangt. Wird das Ei trotzdem befruchtet, entwickelt sich das Embryo in der Bauchhöhle. Die Entwicklung an der falschen Stelle (ektopische Schwangerschaft) kommt beim Menschen bei hundert Schwangerschaften einmal vor. In den meisten Fällen findet die Entwicklung des Embryos im Eileiter statt. Dass das Ei nicht in den Eileiter gelangt, was zur Entwicklung des Embryos in der Bauchhöhle führt, ist viel seltener und kommt beim Menschen nur einmal bei 10.000 Schwangerschaften vor. Ohne chirurgischen Eingriff führt dieser Zustand für Mutter und Fötus zwangsläufig zum Tod. Starker Selektionsdruck sollte daher eigentlich bei allen Säugetieren zu einer zuverlässigen Verlagerung des Eis aus dem Eierstock in den Eileiter führen. Warum aber in aller Welt verschwand die Bursa dann beim gemeinsamen Vorfahren der Koboldmakis, Affen, Menschenaffen und Menschen? Die Entwicklung eines speziellen Mechanismus, der die ursprüngliche umschließende Funktion der Bursa ersetzte, muss wohl mit ihrem Verschwinden einhergegangen sein.

In der Tat gibt es deutliche Anzeichen für einen solchen Ersatzmechanismus. Bei Rhesusaffen und bei Frauen kann man den Eisprung direkt mithilfe eines Laparoscops beobachten. (Mit so einem Instrument kann der Arzt in die Bauchhöhle hineinschauen.) Untersuchungen mit diesem Gerät zeigten, dass der Eileitertrichter in engem Kontakt mit dem Eierstock bleibt, während er sich über dessen Oberfläche bewegt und die Stelle sucht, wo der Eisprung stattfinden wird. Gut möglich, dass diese Bewegung des Eileitertrichters die sichere und rechtzeitige Verlagerung des Eis zum Eileiter absichert. Da allen Mitgliedern dieser vier erwähnten Primatengruppen die Bursa fehlt, ist die Folgerung angemessen, dass auch die gleitende Bewegung des Eileitertrichters bei allen vorkommt. Immerhin ergibt dieser Mechanismus nur Sinn, wenn bei der Ovulation nur ein einziges Ei aus dem Eier-

stock austritt. Ohne Bursa würden mehrfache Eisprünge eines einzigen Eierstocks das Risiko erhöhen, dass ein Ei sich verirrt. Vermutlich war der gemeinsame Vorfahre der Koboldmakis, Affen, Menschenaffen und Menschen darauf ausgerichtet, jeweils nur ein oder zwei Jungtiere zu gebären. In späteren Kapiteln werden wir sehen, dass es Hinweise aus anderen Richtungen gibt, die diese Schlussfolgerung bestätigen.

Zu den Beschränkungen der Mutterschaft gehört auch die Tatsache, dass die maximale Menge der Eier, die eine Frau produzieren kann, von vornherein begrenzt ist. Eier werden allgemein wellenweise aus Oogonien (Vorläuferzellen) gebildet. Mit nur wenigen Ausnahmen besitzt jedes Säugetierweibchen einen Grundvorrat von Vorläuferzellen, der im Laufe des Lebens allmählich aufgebraucht wird. Beim Menschen wird die maximale Anzahl der Vorläuferzellen im Eierstock — rund sieben Millionen — in der Mitte der Entwicklung des Fötus erreicht. Bis zur Geburt wird der Vorrat bereits auf etwa zwei Millionen reduziert, und bei einem siebenjährigen Mädchen sind nur noch 300.000 Vorläuferzellen übrig. Von diesem Vorrat schaffen es nur einige Hunderte bis zum Eisprung. Dementsprechend ist die Anzahl der Spermien eines einzigen Ejakulats fünfhunderttausendmal so groß wie die maximale Anzahl der Eier, die der Eierstock einer Frau während ihrer fertilen Jahre produzieren kann.

Während bei Säugetieren einzelne Abschnitte der Hoden verschiedene Stadien der Spermienbildung aufweisen, hat die Produktion der Eier im Normalfall einen einheitlichen Zyklus, bei dem die beiden Eierstöcke aneinander gekoppelt sind. Von einem Oogonium ausgehend, entwickelt sich jede Eizelle innerhalb eines Follikels (Zellhaufen) im Eierstock. Mit dem Reifen der Eizelle wird der Follikel größer, bis schließlich ein mit Flüssigkeit gefüllter Hohlraum entsteht. In diesem Stadium wandert der vergrößerte Follikel an die Oberfläche des Eierstocks, wo das Ei freigesetzt werden kann. Die Reifung eines Follikels kann zu jedem Zeitpunkt gestoppt werden. Dann findet ein Zerfall (Atresie) des Follikels statt. Auch bei Säugetieren mit einem einzigen Eisprung pro Zyklus, wie bei menschlichen Frauen, treten gewöhnlich mehrere Follikel in beiden Eierstöcken die Endphase der Reifung an. Die Entwicklung jedes Follikels nimmt fast vierhundert Tage, also mehr als ein Jahr, in Anspruch. Da sich kontinuierlich neue Follikel entwickeln, sind im Eierstock jederzeit alle Entwicklungsstadien vorhanden. In jedem menschlichen Zyklus wird eine größere Menge Follikel für die Endphase der Rei-

fung rekrutiert, aber in den meisten Fällen gibt es am Ende einen unbekanntem Vorgang, bei dem sich genau ein Follikel in einem der beiden Eierstöcke durchsetzt. In der Regel setzt sich die Entwicklung dieses dominanten Follikels bis zum Eisprung fort, während alle andere zerfallen. Bei einigen Zyklen gelangt jedoch kein einziger Follikel zum Eisprung.

Bei den Eierstockzyklen aller Säugetiere wird die Entwicklung der Follikel durch ein stimulierendes Hormon (FSH) gesteuert. Dieses Hormon wird von der erbsengroßen Hirnanhangdrüse (Hypophyse) unterhalb des Gehirns produziert. Während ihrer Entwicklung produzieren die Follikel selbst Steroidhormone, vor allem Östrogene. Die Freisetzung eines Eis aus einem reifen Follikel wird im Normalfall durch einen deutlichen Anstieg des Luteinisierenden Hormons (LH), einem weiteren von der Hirnanhangdrüse produzierten Hormon, ausgelöst. Nach dem Eisprung wird der Rest des Follikels in einen Gelbkörper (Corpus luteum) umgewandelt, und kleinere LH-Mengen fördern die Produktion von Progesteron. Falls keine Befruchtung stattfindet, bleibt der Gelbkörper kurzzeitig erhalten, zerfällt aber vor dem Anfang des nächsten Zyklus. Entsprechend kann der Zyklus im Eierstock in zwei Abschnitte unterteilt werden: Am Beginn steht eine Follikelphase, in der sich einige Follikel bis zum Zeitpunkt des Eisprungs entwickeln, und danach folgt eine Lutealphase mit einem nach dem Eisprung gebildeten Gelbkörper.

Der Übergang von einer Follikelphase zur Lutealphase ist bei Frauen durch einen kleinen aber erkennbaren Aufstieg der basalen Körpertemperatur (der Minimalwert im Ruhezustand) gekennzeichnet. Dieser Anstieg der Körpertemperatur um $0,3^{\circ}\text{C}$ bis $0,6^{\circ}\text{C}$ in der Mitte des Zyklus spiegelt eine Zunahme des Energieumsatzes wider, die anschließend bis zum Ende des Zyklus weiterbesteht. Weil dieser Temperaturanstieg gewöhnlich kurz nach dem Eisprung auftritt, wird er häufig als leicht messbarer Indikator der Freisetzung eines Eis vom Eierstock verwendet. Selbstverständlich gestatten heutzutage genaue Hormonmessungen zuverlässigere Informationen, aber die Körpertemperatur gilt immer noch als grober Indikator für den Eisprung.

OBWOHL DIE GRUNDLEGENDE STRUKTUR des Zyklus bei allen Säugetieren identisch ist, gibt es einen fundamentalen Unterschied beim Zusammenhang von Begattung und Eisprung. Bei einigen Säugetieren, beispielweise Katzen, Kaninchen und Spitzhörnchen, verursacht die Begattung

an sich durch das Auslösen eines plötzlichen LH-Anstiegs den Eisprung. Biologen bezeichnen das als induzierten Eisprung. Wird das Weibchen während eines Zyklus nicht begattet, gibt es lediglich eine Follikelphase. Der Eisprung findet nicht statt, und ein Gelbkörper wird nicht gebildet. Solche Zyklen ohne Begattung sind kurz. Bei einigen Säugetieren (wie Mäusen) gibt es eine kleine Abweichung, bei ihnen findet der Eisprung ohne Begattung statt, aber die Begattung ist für die Bildung eines Gelbkörpers notwendig. Das Endergebnis ist in beiden Fällen identisch: Ein Gelbkörper wird nur gebildet, wenn eine Begattung stattgefunden hat. Der Einfachheit halber kann man diese zwei Möglichkeiten mit der Bezeichnung »induzierter Eisprung« zusammenfassen.

Der induzierte Eisprung steht in direktem Gegensatz zum Vorgang beim Menschen und vielen anderen Säugetieren, bei denen der Eisprung unabhängig von der Begattung stattfindet. Bei jedem Zyklus wird im Innern ein rascher LH-Anstieg erzeugt, der den Eisprung und die anschließende Bildung eines Gelbkörpers auslöst. Für die Auslösung des Eisprungs ist keine Begattung nötig, deshalb bezeichnet man ihn als »spontan«. Ein Zyklus, bei dem der Eisprung und die Bildung eines Gelbkörpers nicht von der Begattung abhängen, dauert in der Regel lang, da er automatisch sowohl eine Follikelphase als auch eine Lutealphase enthält. Wir können dementsprechend einen grundlegenden Unterschied zwischen zwei Säugetiergruppen erkennen: Arten mit kurzen begattungsabhängigen Zyklen und Arten mit langen Zyklen, die von der Begattung unabhängig sind.

Die Vertreter beider Hauptgruppen von Säugetieren (mit induziertem oder spontanem Eisprung) haben einen bestimmten Zyklustyp. Raubtiere, Insektenfresser, Nagetiere und Spitzhörnchen zum Beispiel haben im Allgemeinen kurze, begattungsabhängige Zyklen, während Primaten, Huftiere, Wältiere und Elefanten in der Regel lange Zyklen haben, die nicht von der Begattung abhängen. Wie alle anderen Primaten haben menschliche Frauen einen Zyklus, bei dem der Eisprung spontan geschieht und auf den automatisch die Bildung eines Geldkörpers folgt. Dieses Merkmal war wahrscheinlich schon beim gemeinsamen Vorfahren der Primaten vor mehr als achtzig Millionen Jahren vorhanden. Wie beim Menschen beträgt die durchschnittliche Zyklusdauer bei Primatenarten im Allgemeinen etwa einen Monat. Man kann deshalb davon ausgehen, dass die Zyklusdauer bei den Primatenvorfahren vergleichbar lang war.

1554 HEIRATETE DIE ENGLISCHE KÖNIGIN MARY I. im Alter von 38 Jahren Philipp II. von Spanien. Wegen ihres Alters und der generellen Umstände war sie besonders erpicht darauf, möglichst bald einen Sohn zu haben. Nur zwei Monate nach der Hochzeit konnte einer ihrer Ärzte die Schwangerschaft der Königin bekannt gegeben und berichtete in diesem Kontext von Begleiterscheinungen wie dem allmählichen Anschwellen des Bauches und Übelkeit. Neun Monate später aber gab es nichts vorzuweisen. Später wurde gemutmaßt, dass die große Enttäuschung der Königin über diesen Schock die Verfolgungen auslöste, die ihr den Spitznamen »Bloody Mary« einbrachten. Drei Jahre später passierte dasselbe. Dieses Mal litt die Gesundheit der Königin stark, was zu ihrem frühen Tod beitrug.

Vielfach geht man davon aus, dass die Königin Scheinschwangerschaften (auch eingebildete Schwangerschaften genannt) hatte, ein seltener Zustand, der einer schwerwiegenden emotionalen und psychischen Erkrankung zuzuschreiben ist. In seinen Memoiren schrieb Sigmund Freud, dass seine bekannteste Patientin »Anna O« zu Unrecht glaubte, sie wäre von ihrem vorherigen Psychoanalytiker Josef Breuer schwanger. Obwohl die Symptome stark variieren, haben Frauen, die unter einer Scheinschwangerschaft leiden, meist eines gemeinsam: die extreme Sehnsucht, ein Kind zu gebären. Die meisten Fälle treten bei Frauen auf, die zwischen 30 und 50 Jahre alt sind. Scheinschwangerschaften sind allerdings extrem selten und kommen gegenwärtig nur bei einer von siebentausend Schwangerschaften in den Vereinigten Staaten vor. Viele natürliche Zeichen einer echten Schwangerschaft, wie das Aufhören der Menstrualblutung, Stimmungsumschwünge, Gelüste, Übelkeit, vergrößerte und empfindliche Brüste, Blähungen, Bewegungen innerhalb der Gebärmutter und Gewichtszunahme können auch bei einer Scheinschwangerschaft vorkommen.

Bei Säugetieren mit induziertem Eisprung nimmt die Scheinschwangerschaft eine ganz andere Form an. Wenn die Begattung zur Befruchtung führt, was unter natürlichen Bedingungen meist der Fall ist, fördert das vom Gelbkörper ausgeschiedene Progesteron die Stabilität und den Erhalt der darauf folgenden Schwangerschaft. Führt die Begattung nicht zur Schwangerschaft, ist das Erzeugen von Progesteron durch den Gelbkörper sinnlos, und eine Scheinschwangerschaft ist das Resultat. Dies geschieht oft bei Katzen, wenn ein Weibchen von einem infertilen Männchen gedeckt wird. Während einer Scheinschwangerschaft erlebt das Weibchen bei solchen Säugetieren

einige Veränderungen, die auch bei einer normalen Trächtigkeit auftreten, wie die Verstärkung der Blutversorgung der Gebärmutter und die Verdickung der Gebärmutterwand. Irgendwann erkennt jedoch der weibliche Körper, dass sich keine Jungtiere entwickeln, und die Scheinschwangerschaft wird beendet. In diesem Fall werden häufig wie bei der Menstruation Blut und Gewebereste von der Gebärmutter ausgeschieden. Wie ich später erklären werde, gibt es aber einen grundlegenden Unterschied zwischen der Blut- und Gewebeausscheidung nach einer Scheinschwangerschaft und dem Spezialfall der Menstruation.

AN DEN VIER BIS FÜNF TAGEN am Ende des Eierstockzyklus verliert eine Frau durchschnittlich etwa 30 Milliliter Blut. Dies entspricht einem jährlichen Verlust von etwa 0,36 Liter Blut — und bei einigen Frauen ist er sogar viermal so hoch. Die Blutung entsteht durch das Abstoßen der inneren Schicht der Gebärmutter, das durch das Schrumpfen des Gelbkörpers am Ende der Lutealphase verursacht wird. Da diese Blutung etwa monatlich vorkommt, wird sie nach dem lateinischen Wort *mens* für »Monat« als »Menstruation« bezeichnet. Das Wort wird gewöhnlich nur bei Arten mit äußerlich sichtbarer Blutung verwendet, obwohl einige Autoren irreführend die Eierstockzyklen bei sämtlichen Primaten »Menstrualzyklen« nennen. Obgleich alle Primaten in der Regel lange Eierstockzyklen haben, gibt es bezüglich des von der Gebärmutter ausgeschiedenen Blutes am Ende des Zyklus einen wesentlichen Unterschied. Lemuren und Loris scheiden kein Blut aus, weil die Plazenta nicht in die innere Schicht der Gebärmutter eindringt. Diese Primaten haben nicht einmal am Ende der Schwangerschaft Ausscheidungen. Die Menstrualblutung kommt nur bei Affen, Menschenaffen und Menschen vor, und unter diesen Primaten haben Menschen bei weitem die am stärksten ausgeprägte Menstruation.

Menstrualzyklen wurden bei Altweltaffen, Menschenaffen und Menschen ausgiebig untersucht, aber es ist immer noch nicht klar, warum überhaupt Blut von der Gebärmutter ausgeschieden wird. Im Gegensatz zu Lemuren und Loris ist die Plazenta bei Koboldmakis, Affen, Menschenaffen und Menschen hochgradig invasiv und tritt mit den Blutgefäßen der Mutter in der Gebärmutterwand in direkten Kontakt. Während der Lutealphase des Eierstockzyklus finden in der inneren Schicht der Gebärmutter verschiedene

Veränderungen statt. Diese Änderungen, darunter die rasche Ausbreitung und markante Vergrößerung der Blutgefäße, bereiten die Gebärmutter für die Befestigung und Frühentwicklung der Plazenta im Falle einer Empfängnis vor. Die innere Schicht der Gebärmutter, Endometrium genannt, wird während der Lutealphase auch bedeutend dicker. Kommt es zu keiner Empfängnis, endet die Lutealphase mit der Menstruation. Jahrelang wurde die Menstruation bei Affen, Menschenaffen und Menschen nur als Ausscheidung von überflüssigem Gewebe der Gebärmutter angesehen.

1993 präsentierte Margie Profet eine radikal neue Erklärung für die Entwicklung der Menstruation, die beträchtliche Aufmerksamkeit in den Medien erregte. In einem oft zitierten Artikel stellte sie die Hypothese auf, dass die Menstrualblutung die Gebärmutter und die Eileiter vor Krankheitserreger schütze, die von Spermien übertragen werden. Diese Hypothese war deshalb reizvoll, weil Erreger auf Spermien oder in der Samenflüssigkeit natürlich eine ernsthafte Bedrohung für das weibliche Fortpflanzungssystem darstellen würden. Bei genauerer Prüfung wurde aber offensichtlich, dass die Profet-Hypothese grundlegende Fehler aufweist. Probleme, die durch Erreger auf Spermien verursacht werden, müssten auch bei allen anderen Säugetieren vorkommen, wodurch Menstruation ebenfalls generell vorkommen müsste. Profet behauptete, dass die Menstrualblutung bei allen Säugetieren vorkäme, aber das ist schlicht falsch. Von Affen, Menschenaffen und Menschen abgesehen, konnte man echte Menstruation lediglich bei bestimmten Fledermausarten und den seltenen afrikanischen Rüsselspringern nachweisen.

Außerdem hätte die natürliche Selektion sicherlich zu Gegenmaßnahmen geführt, die Gebärmutter gegen Krankheitserreger auf Spermien zu schützen. Im Zusammenhang damit spielt der Schleim, der vom Gebärmutterhals der Säugetiere in großen Mengen ausgeschieden wird, eine wichtige Rolle. Eine seiner Funktionen besteht darin, das Eindringen von Erregern zu verhindern, die während der Kopulation in der Scheide gelangen. Zudem befinden sich in der Scheide meist weiße Blutkörperchen, um eindringenden Erregern zu begegnen. Unterm Strich gibt es keine überzeugenden Hinweise, dass die Abwehr von Krankheitserregern auf Spermien mit der Entstehung der Menstruation zu tun hat. Auf jeden Fall erscheint ein solcher Zusammenhang kaum folgerichtig, da es beim Menschen bis zu vier Wochen vor der nächsten Menstruation zum Geschlechtsverkehr kommen kann. Bei

einem so langen Intervall zwischen Kopulation und Menstruation hätten eventuelle Krankheitserreger reichlich Zeit, sich zu vermehren und sich in der Gebärmutter und den Eileitern zu verbreiten.

Gegenwärtig gibt es keine allgemein anerkannte Erklärung für die Entstehung der Menstruation. Jede künftige Deutung muss auch erklären können, warum der Blutverlust bei Frauen so ausgeprägt ist. Der Verlust von 30 Millilitern Blut bei jeder Menstruation entspricht einer beträchtlichen Menge Eisen, ein unentbehrliches und oft knappes Mineral. Besonders starke Menstrualblutung kann zu Blutarmut führen oder bereits existierenden Eisenmangel verschärfen. Eine Untersuchung in Brasilien ergab, dass die Eisenvorräte von Frauen zurückgingen, die mehr als 60 Milliliter Blut pro Zyklus verloren. Betrug der Blutverlust bei der Menstruation mehr als neunzig Milliliter, war klinisch nachweisbare Blutarmut wahrscheinlich. Offensichtlich muss ein beträchtlicher Selektionsdruck den Ursprung und den Erhalt einer so ausgeprägten Menstrualblutung — viel stärker als bei Menschenaffen und Affen — während der Evolution des Menschen begünstigt haben.

Die Anthropologin Beverly Strassmann stellte die These auf, dass die Menstruation eine energiesparende Evolutionsanpassung ist. Die zyklische Verdickung und Verdünnung der Gebärmutterwand kommt bei allen Säugtieren vor, bei Affen, Menschenaffen und Menschen ist sie aber besonders ausgeprägt. Der Energieverbrauch der inneren Schicht der menschlichen Gebärmutter wurde durch Messungen an Gewebeschnitten verfolgt. Bis zum Ende der Lutealphase steigt der Energieverbrauch im Vergleich zum Zyklusanfang auf das Siebenfache an. Aus diesem Grund kam Strassmann zu dem Schluss, dass es mehr Energie kostet, die vergrößerte Innenschicht der Gebärmutter zu erhalten, als sie in jedem Zyklus neu zu bilden. Sie vermutete, dass die Blutung eine Nebenwirkung ist, die auftritt, wenn die Blutmenge für eine effiziente Absorption zu groß wird. Nebenbei entdeckte Strassmann eine weitere Schwäche in Profets Hypothese: Bei Gesellschaften ohne Geburtenkontrolle kommt die Menstruation bei fortpflanzungsfähigen Frauen eher selten vor. Strassmanns Betrachtungsweise der menschlichen Menstruation wurde durch ihre langfristige Feldforschung beim Dogons-tamm in Mali unterstützt. Im Durchschnitt hat eine Dogonfrau etwa neun Schwangerschaften, die zu Lebendgeburten führen. Dementsprechend ist die Menstruation besonders während der Hochphase des gebärfähigen Alters

relativ selten. Allerdings erklärt Strassmanns Deutung der Menstruation als energiesparende Anpassung nicht, warum der Blutverlust bei Frauen während der Menstruation so viel größer ist als bei jeder anderen Primatenart.

2009 entdeckte eine Forschungsgruppe unter der Leitung des Gynäkologen Jan Brosens eine einfallsreiche neue Erklärung der Menstruation. Vor dem Hintergrund, dass echte Menstruation nur bei Affen, Menschenaffen, Menschen und wenigen anderen Säugetieren vorkommt, stellten die Forscher fest, dass die Menstruation wie die Schwangerschaft ein Entzündungszustand ist. Entsprechend gingen sie davon aus, dass die Menstruation dazu dient, die Gebärmutter auf das tiefe Eindringen in das Gewebe vorzubereiten, das während der Schwangerschaft stattfindet. Ein Vorteil dieser These liegt darin, dass der heftige Blutverlust während der menschlichen Menstruation mit dem besonders invasiven Charakter der Schwangerschaft in Verbindung gebracht werden kann. Diese Erklärung könnte auf jeden Fall hilfreich sein, einige Störungen bei der menschlichen Menstruation und Schwangerschaft zu entmystifizieren.

Eine letzte Möglichkeit verdient Beachtung, obwohl keine ausreichenden Nachweise für sie vorliegen. Bei Säugetieren mit echter Menstruation werden möglicherweise im weiblichen Genitaltrakt Spermien gelagert. Dann könnte die Ausscheidung von Blut und Geweberesten aus der Gebärmutter dazu dienen, alte Spermien nach dem Ende des Eierstockzyklus zu entfernen.

Allgemein anerkannt ist, dass Spermien nur eine begrenzte Lebensdauer haben. Die normale Obergrenze bei Säugetieren einschließlich des Menschen soll zwei Tage betragen. Seit geraumer Zeit ist allerdings bekannt, dass Frauen große Mengen von Spermien in speziellen kleinen Taschen oder Nischen (Krypten) im Gebärmutterhals speichern. Diese Krypten spielen auch eine wichtige Rolle bei der Bildung des vom Gebärmutterhals abgesonderten Schleims, ein wässriges Gel, das beim menschlichen Zyklus und der Fertilität eine große Rolle spielt. In der Mitte des Zyklus ist der Schleim etwa so dünnflüssig wie Eiweiß, und dieser Zustand gilt häufig als Indikator für den ungefähren Zeitpunkt des Eisprungs.

Der Biophysiker Erik Odeblad entdeckte vier grundlegende Typen von Schleim bei Frauen (G, L, P, S), wobei jeder eine besondere Funktion hat. Die verschiedenen Schleimtypen werden von bestimmten Krypten in verschiedenen Regionen des Gebärmutterhalses erzeugt und weisen während

des Menstrualzyklus proportionale Veränderungen auf. In der Vorbereitungsphase des Eisprungs blockiert L-Schleim den Weg für abnormale Spermien, während S-Schleim normalgebildete Spermien in die Krypten des Gebärmutterhalses leitet. Spermien, die in die Krypten gelangt sind, werden provisorisch mit Schleimpfropfen eingeschlossen. Um die Zeit des Eisprungs herum werden die Pfropfen dann vom P-Schleim aufgelöst. Spermien werden so aus den Krypten entlassen und können zu den Eileitern weiterwandern. Im frühen Stadium des Zyklus und während der Lutealphase nach dem Eisprung bildet G-Schleim am unteren Ende des Gebärmutterhalses eine Sperre, die Spermien nicht einfach überwinden können.

Kurz gesagt, können menschliche Spermien mehrere Tage lang unverseht im Schleim überleben, der vom Gebärmutterhals erzeugt wurde. Der Fortpflanzungsbiologe John Gould wies nach, dass Spermien noch achtzig Stunden nach der Besamung fruchtbar sein können. Bewegliche Spermien mit normaler Schwimmgeschwindigkeit wurden sogar bis zu fünf Tage nach der Besamung gefunden. In einer anderen Studie untersuchte eine Forschungsgruppe unter der Leitung des Gynäkologen Michael Zinaman Spermien im Schleim, der bis zu drei Tage nach der künstlichen Besamung von Frauen entnommen wurde. In den meisten Fällen erwiesen sich die geborgenen Spermien als lebensfähig. Die Forscher kamen zu dem Schluss, dass die Funktionsfähigkeit von Spermien im Gebärmutterhals der Frau erhalten bleibt, was darauf hinweist, dass dieser als Speicherplatz für Spermien zu betrachten ist.

Wir wissen viel über den Schleim, der vom menschlichen Gebärmutterhals erzeugt wird, aber nur wenig über die Spermien, die sich darin befinden. Bedauerlicherweise wissen wir erstaunlich wenig über die Speicherung der Spermien in den entsprechenden Krypten. Unsere Kenntnisse sind im Grunde auf eine einzige bahnbrechende Untersuchung beschränkt, die der Gynäkologe Vaclav Insler mit seinen Kollegen 1980 veröffentlichte. Fünf- und zwanzig mutige Frauen, denen die Gebärmutter mittels Hysterektomie chirurgisch entfernt werden sollte, hatten sich bereit erklärt, sich einen Tag vorher künstlich besamen zu lassen. Die Frauen wurden in drei Gruppen eingeteilt: Neun Frauen hatten eine Vorbehandlung mit Östrogen hinter sich und wurden mit normaler Samenflüssigkeit besamt, neun hatten eine Vorbehandlung mit einem Progesteron ähnlichen Hormon hinter sich und wurden ebenfalls mit normaler Samenflüssigkeit besamt und sieben hatten

eine Vorbehandlung mit Östrogen hinter sich und wurden mit abnormaler Samenflüssigkeit (niedrige Spermienmenge mit vielen Formabweichungen und beschränkter Mobilität) besamt. Nach der operativen Entfernung der Gebärmutter am Tag nach der künstlichen Besamung wurden Serienschnitte durchgeführt, um die Speicherung der Spermien in den Krypten mikroskopisch zu untersuchen.

Festgestellt wurde eine starke Variation der Größe der Krypten, und Spermien wurden am Gebärmutterhals vorwiegend in den größeren Krypten gefunden. Innerhalb von zwei Stunden nach der Besamung hatten Spermien die gesamte Länge des Gebärmutterhalses besiedelt. Insler und seine Kollegen rechneten aus, wie viele Krypten Spermien enthielten und wie viele Spermien sich im Durchschnitt darin befanden. Sowohl die Proportion der besiedelten Krypten als auch die Spermiedichte waren signifikant höher bei Gebärmüttern, die mit Östrogen vorbehandelt worden waren, als bei denen, die mit dem Progesteron ähnlichen Hormon vorbehandelt worden waren. Nach einer Vorbehandlung mit Östrogen wurden bis zu 200.000 gespeicherte Spermien in den Krypten einer Gebärmutter gefunden, während die Menge nach einer Vorbehandlung mit dem Progesteron ähnlichen Hormon maximal ein Viertel so hoch war. Insler und seine Kollegen stellten auch fest, dass die Qualität der Samenflüssigkeit eine entscheidende Bedeutung für die Speicherung der Spermien hatte. Sowohl der Anteil der Krypten, die von Spermien besiedelt waren, als auch die Dichte der Spermien waren bei Frauen, die mit abnormaler Samenflüssigkeit besamt worden waren, deutlich reduziert. Kurz gesagt, zeigten die Ergebnisse, dass die Speicherung von Spermien in den Krypten der menschlichen Gebärmutter während der Follikelphase wahrscheinlicher ist, wenn Östrogen vorherrscht, und dass gesunde Spermien häufiger als abnormale Spermien gelagert werden. Überdies stellten Insler und seine Kollegen fest, dass im Schleim der Gebärmutter bis zum neunten Tag nach der Besamung lebende Spermien gefunden wurden. Zusammenfassend vermuteten sie, dass der Gebärmutterhals als Speicher dient, von dem lebensfähige Spermien allmählich freigesetzt werden und in den Eileiter gelangen können. Eine derartige kontrollierte Freisetzung könnte für einen längeren Zeitraum das Überleben von befruchtungsfähigen Spermien gewährleisten.

Es gibt auch Befunde, die darauf hinweisen, dass Spermien nicht nur im Gebärmutterhals, sondern auch im Eileiter gespeichert werden können. Be-

kannt ist, dass sich Spermien beim Menschen und verschiedenen anderen Säugetieren an der Innenseite des Eileiters anlagern können. Die Fortpflanzungsphysiologin Joanna Ellington und ihre Kollegen untersuchten diese angelagerten Spermien auf Zellen, die von der Oberfläche des Eileiters isoliert wurden. Sie entdeckten, dass nicht angelagerte Spermien im Vergleich zu angelagerten Spermien verschiedene Anomalien aufwiesen. Es ist daher möglich, dass die Anlagerung auf der Innenseite des Eileiters eine zusätzliche Grundlage zur Selektion hochwertiger Spermien darstellt.

AN DIESER STELLE MÜSSEN WIR DIE ZYKLEN im menschlichen Eierstock näher betrachten. In der medizinischen Praxis wird der Beginn der Menstrualblutung als erster Tag des Zyklus und der letzte Tag vor der nächsten Menstruation als dessen Ende definiert. In Forschungsartikeln und medizinischen Lehrbüchern wird gemeinhin ein idealisierter Zyklus von rund vier Wochen angenommen, wobei der Eisprung etwa in der Mitte zwischen zwei Menstruationen stattfindet. Regelmäßige 28-tägige Zyklen mit dem Eisprung in der Mitte werden als Norm angesehen, und jede markante Abweichung wird als anormal betrachtet. Dieses standardisierte »Eieruhr«-Modell ist eine Abstraktion und kann irreführend sein. Im echten Leben gibt es große Schwankungen, die ihre eigene biologische Bedeutung haben.

Ein bahnbrechender Artikel, den der Fortpflanzungsbiologe Alan Treloar und seinen Kollegen 1967 veröffentlichte, befasste sich mit den Abweichungen der Menstruation im Verlauf des gesamten Lebens. In den ersten fünf Jahren nach der ersten Menstrualblutung (Menarche) weist die Zyklusdauer große Schwankungen auf, und sie ist im Durchschnitt länger als in den Jahren der größten Fruchtbarkeit. Anschließend weisen die Zyklen ein regelmäßigeres Muster auf, wobei ihre Dauer über einen Zeitraum von etwa 25 Jahren allmählich abnimmt. Danach nimmt die Zykluslänge wieder zu und zeigt am Ende der fruchtbaren Zeit (Menopause) zunehmend größere Schwankungen. In dieser Phase steigt die durchschnittliche Zyklusdauer von ursprünglich vier auf acht Wochen an. In den fruchtbarsten Jahren zwischen 20 und 45 dauert der Zyklus im Jahresschnitt tatsächlich aber etwa vier Wochen. Andererseits variiert die individuelle Dauer im Jahresschnitt stark und kann zwischen 26 und 31 Tagen liegen. Wenig erstaunlich ist, dass die Schwankung bei Zyklen einer einzelnen Frau noch größer ist. Eine

Schwankungsbreite von drei bis fünf Wochen ist normal, und einzelne Zyklen können sogar außerhalb dieses Bereichs liegen.

In einer neueren Studie analysierten die Gynäkologin Kirstine Münster und ihre Kollegen die Zyklusschwankungen in Dänemark. In dänischen Schulen fördert die Gesundheitserziehung das Führen von Menstruationskalendern, so dass es bei einer Umfrage unter Frauen zwischen 15 und 45 Jahren möglich war, die Aufzeichnungen aus dem Jahr 1988 auszuwerten. Mit wenigen Ausnahmen betrug die gewöhnliche Zyklusdauer der Frauen zwischen 21 und 35 Tagen. Bei einem Drittel der Frauen betrug die Schwankungsbreite der Zyklusdauer innerhalb dieses Jahres mehr als vierzehn Tage. Interessanterweise waren die Zyklusschwankungen bei Frauen aus unteren Schichten größer. Dies deutet darauf hin, dass Umweltfaktoren die generelle Schwankung noch steigern können. In medizinischen Kreisen wird eine zehntägige Schwankungsbreite — zwischen 23 und 33 Tagen — oft als Norm akzeptiert, während viele Gynäkologen jede größere Schwankung als pathologisch einstufen. Im Schlusswort von Münster und ihren Kollegen heißt es: »Wäre das wirklich der Fall, müsste man bei etwa zwei Dritteln normaler dänischer Frauen ... eine Störung oder Krankheit vermuten.« Wir dürfen nie vergessen, dass der menschliche Menstrualzyklus starke Schwankungen aufweist, und sollten nicht überrascht sein, wenn Frauen vom »Eieruhr«-Modell abweichen.

WIE DIE SPERMIENBILDUNG KANN psychologischer Stress auch die Eierstockzyklen beeinflussen. Erneut sind die von Dietrich von Holst durchgeführten Untersuchungen sozialer Stresserscheinungen bei Spitzhörnchen (Tupajas) sehr aufschlussreich. Werden zwei erwachsene Weibchen gemeinsam in einem Käfig gehalten, wird eines binnen weniger Stunden dominant. Das unterlegene Weibchen zeigt dann Veränderungen, die zunehmend schwerwiegender werden, je länger das Spitzhörnchen dem vom dominanten Tier verursachten sozialen Stress ausgesetzt ist. Innerhalb einiger Tage verliert der Eierstock vollständig seine Funktion. Ähnliche Veränderungen kommen auch bei einigen Primaten vor. Beim Weißbüschelaffen, einem kleinen Neuweltaffen, wird der Eisprung bei sozial unterlegenen Weibchen unterdrückt, obwohl die Auswirkungen des niedrigeren Rangs sonst weniger schwerwiegend sind. Sowohl bei den Spitzhörnchen als auch bei den

Weißbüschelaffen werden unterlegene Weibchen unfruchtbar, um Ressourcen zu schonen. Sie gehen lieber auf Nummer sicher und verschieben die Fortpflanzung, bis die sozialen Bedingungen sich verbessern. Für sie ist es weniger gefährlich, den Eierstock zu inaktivieren, als trüchtig zu werden und unter den Folgen der Aggression des dominanten Weibchens zu leiden.

Der Zusammenhang von psychologischem Stress und Störungen des Menstrualzyklus bei Frauen ist schon lange bekannt. Indirekte Belege aus verschiedenen Quellen weisen darauf hin, dass bestimmte Bedingungen die Aktivität des Eierstocks beeinträchtigen können. Ein erschütterndes Beispiel hängt mit den Qualen des Zweiten Weltkriegs zusammen, in dessen Verlauf 1941 mehrere Hundert britische Frauen in einem japanischen Konzentrationslager in Hongkong interniert wurden. Die Gynäkologin Annie Sydenham, die selbst zu den Internierten gehörte, berichtete später, dass bei der Hälfte der Frauen im Alter von 15 bis 45 Jahren die Menstruation vollkommen aufhörte. Diese Veränderung setzte direkt mit der Internierung ein, also lange bevor sich Unterernährung auswirken konnte, und hielt zwischen drei und achtzehn Monate an. Sydenham schrieb den Ausfall der Menstruation berechtigterweise dem emotionalen Schock durch den Krieg und der Internierung zu.

Ein weiteres überzeugendes Beispiel der Auswirkungen von extremem Stress auf den Menstrualzyklus stammt aus einer Studie von 2007 über Frauen, die gerade längere Gefängnisstrafen antraten. Die Epidemiologin Jenifer Allsworth untersuchte fast 450 Frauen im fortpflanzungsfähigen Alter. Unter den Gefängnisinsassinnen waren Störungen der Menstrualzyklen sehr verbreitet: Fast ein Drittel der Frauen berichtete über eine Form der Unregelmäßigkeit, und jede zehnte hatte seit drei Monaten oder noch länger keine Menstruation mehr. Viele dieser Frauen hatten freilich schon lange vor dem Beginn ihrer Gefängnisstrafe traumatische Erfahrungen gemacht. Mehr als die Hälfte der Frauen war entweder als Kind oder als Erwachsene sexuell missbraucht worden. Die Wahrscheinlichkeit für eine unregelmäßige Menstruation im Gefängnis war fast doppelt groß, wenn es ein Elternteil gab, das Probleme mit Alkohol oder Drogen hatte, und wenn eine Vorgeschichte mit physischem oder sexuellem Missbrauch bestand. Allsworth entdeckte zudem einen signifikanten Unterschied hinsichtlich früherer Schwangerschaften zwischen Frauen mit unregelmäßigen Zyklen und Frauen mit regelmäßigen Zyklen. Obwohl die Frauen in beiden Gruppen

etwa gleich viele Schwangerschaften hinter sich hatten, trugen Frauen mit unregelmäßigen Zyklen deutlich seltener das Kind aus. Mittlerweile wird allgemein akzeptiert, dass heftiger psychosozialer Stress eine Störung des Menstrualzyklus verursachen kann. Aber auch andere Faktoren wie körperliche Ertüchtigung, Gewichtsverlust und Ernährung haben Einfluss auf die Aktivität des Eierstocks. Deshalb ist es schwierig, zwischen mäßigem psychologischem Stress und kleineren Unregelmäßigkeiten bei der Menstruation eine schlüssige Verbindung herzustellen. Außerdem ist es möglich, dass Eierstockzyklen jahreszeitlich variieren, was ein weiterer erschwerender Faktor bei der Deutung der weiblichen Menstrualzyklen ist. Letztlich müssen wir uns also den jahreszeitlichen Mustern bei der Fortpflanzung zuwenden, wenn wir die Entstehung des Menstrualzyklus untersuchen wollen, und dabei ein tieferes Verständnis der Empfängnis und der menschlichen Fortpflanzungszyklen entwickeln.

KAPITEL 2

Zyklen und Jahreszeiten

Die Evolution ist ein Vorgang, der in einem natürlichen Lebensraum stattfindet. Zum Verständnis wie Anpassungen im Verhalten und in der Physiologie entstehen, müssen wir deshalb jede Art in ihrer natürlichen Umgebung betrachten. 1968 hatte ich erstmals Gelegenheit, das Paarungsverhalten von Primaten in freier Wildbahn zu beobachten und dadurch dessen Beeinflussung durch die Jahreszeiten direkt zu erleben. Meine früheren Forschungen mit Mausmakis — winzige Primaten, die bloß 60 g wiegen — hatten gezeigt, dass sie viele Merkmale mit dem angenommenen gemeinsamen Vorfahren teilen, von dem die Menschen und alle andere Primaten abstammen. Nach ersten grundlegenden Beobachtungen einer Zuchtkolonie im französischen Brunoy reiste ich nach Madagaskar, um die kleinen Primaten in ihrer natürlichen Umgebung zu erforschen.

Mit großem Aufwand ist es mir gelungen, Stück für Stück ein Bild vom natürlichen Fortpflanzungssystem der Mausmakis zu bekommen. In schneller Folge werden die erwachsenen Weibchen Ende September bzw. Anfang Oktober paarungsbereit. Die meisten werden sofort trächtig und gebären nach einer Tragzeit von etwa zwei Monaten Ende November oder Anfang Dezember. Mit dem Herannahen der Paarungszeit vergrößern sich die Hoden der Männchen und sind dann während der Fortpflanzung zehnmal größer als im Ruhezustand. In Übereinstimmung mit Berichten früherer Feldstudien stellte ich fest, dass die Paarungszeit der Mausmakis an einem bestimmten Ort immer unverändert bleibt. Als ich 1970 nach Madagaskar zurückkehrte, um die Beobachtungen in meinem Untersuchungsgebiet fortzuführen, fand die Fortpflanzung tatsächlich genau zur gleichen Zeit statt.

Diese Einheitlichkeit der Fortpflanzung wirft zwei offensichtliche Fragen auf: Warum finden die Geburten jedes Jahr zu einem bestimmten Zeitpunkt statt, und was bringt Männchen und Weibchen dazu, sich zur entsprechenden Zeit zu paaren? Ein möglicher Hinweis könnte sein, dass sowohl Begattungen als auch Geburten während der Regenzeit in Madagaskar stattfinden, die im November anfängt und im April endet. Da die Regenzeit auch die wärmste Periode des Jahres ist, war mein erster Gedanke, dass der Niederschlag oder die Temperatur die Fortpflanzungszeit beeinflussen könnte.

Was aber haben solche Überlegungen mit der Frage nach den menschlichen Fortpflanzungszyklen zu tun? Weit verbreitet ist die Ansicht, dass der Normalzustand bei Frauen regelmäßige Menstrualzyklen seien, die hin und wieder durch eine Schwangerschaft unterbrochen würden. Wenn man jedoch Primaten unter natürlichen Bedingungen beobachtet, stellt man fest, dass ein Weibchen normalerweise wenige Eierstockzyklen durchläuft, bevor es trächtig wird. Der Normalzustand ist die Schwangerschaft mit anschließender Stillzeit, und zwischen dem Ende der Stillzeit und dem Anfang der nächsten Schwangerschaft liegen nur wenige Zyklen. Meine Untersuchungen der Mausmakis in Madagaskar ergaben, dass Weibchen im Allgemeinen während des ersten Zyklus der Paarungszeit trächtig werden. Nach der zweimonatigen Schwangerschaft und der Geburt der Jungen kann ein Weibchen vor dem Ende der Paarungszeit im März noch einmal befruchtet werden. In der Regel hat also jedes Weibchen maximal zwei Eierstockzyklen und zwei Schwangerschaften pro Jahr. Bei den höheren Primaten ist es ähnlich. Bei den Berberaffen, die ich in Gibraltar beobachtete, durchlaufen geschlechtsreife Weibchen pro Jahr gewöhnlich einen bis zwei Eierstockzyklen und sind nur einmal schwanger. Wie die Mausmakis werden die meisten fertilen Weibchen mit dem ersten oder zweiten Zyklus der Paarungszeit im Herbst trächtig. Weibliche Berberaffen gebären nach einer sechsmonatigen Schwangerschaft im Frühling und paaren sich bis zum nächsten Herbst nicht mehr.

Da es beim Menschen ganzjährig zu Geburten kommen kann, besteht ein Unterschied zu den Primaten wie Mausmakis und Berberaffen, bei denen die Fortpflanzung einem strikt jahreszeitlichen Muster folgt. Trotzdem sind Frauen in Jäger-und-Sammler-Gesellschaften ohne Zugang zu Verhütungsmitteln meist entweder schwanger oder tragen ein Kind an der Brust. In diesen Gesellschaften durchlaufen Frauen nur wenige Menstrualzyklen, bevor

sie wieder schwanger werden. Untersuchungen der Anthropologin Beverly Strassmann beim Stamm der Dogon — Dorfbewohner des zentralen Hochplateaus von Mali in Westafrika — ergaben, dass eine Frau in ihrem Leben gewöhnlich etwa hundert Menstrualzyklen durchläuft. Historische Belege aus vorindustrieller Zeit zeigen, dass das Leben der Frauen in solchen Gesellschaften ähnlich verlief wie das der Dogon-Dorfbewohnerinnen: eine Reihe von Schwangerschaften mit gelegentlicher Unterbrechung durch vereinzelte Menstrualzyklen. Im starken Gegensatz dazu ist die Durchschnittsfrau in der modernen Industriegesellschaft deutlich seltener schwanger, dementsprechend durchläuft sie während ihres Lebens etwa vierhundert Menstrualzyklen. Im Verlauf der Evolution waren Frauen also meist entweder schwanger oder sie stillten. Was bedeutet das für die Frauen der Gegenwart?

Die Pille zur Empfängnisverhütung wurde so entwickelt, dass sie zwar den Eisprung verhindert, den sonstigen normalen Ablauf des Menstrualzyklus aber simuliert. Dahinter steht der Gedanke, dass es für Frauen natürlich wäre, lange Sequenzen von Menstrualzyklen zu durchlaufen. In Wirklichkeit aber ist es für eine Frau viel natürlicher, viele Schwangerschaften mit nur vereinzelten Zyklen dazwischen zu haben. Auf der anderen Seite stimmt es, dass Frauen — im Gegensatz zu vielen anderen Säugetierarten — während des ganzen Jahres schwanger werden können. Deshalb können Frauen unter Umständen ohne Unterbrechung mehrere Eierstockzyklen durchlaufen. Vor diesem Hintergrund wäre es sinnvoll, eine Pille zu entwickeln, die gelegentlich, aber nicht bei jedem Zyklus eine Menstruation auslöst. Auf diese Weise könnte man die natürlichen biologischen Muster wirkungsvoller nachahmen.

BEIM MENSCHEN KOMMEN KOPULATION UND BEFRUCHTUNG ganzjährig vor. Gibt es dennoch jahreszeitliche Schwankungen, die auf den ersten Blick nicht offenkundig sind? Literarische Quellen, wie das berühmte Gedicht »Locksley Hall« von Alfred Lord Tennyson, lehren uns, dass ein junger Mann im Frühling im Liebeswahn schwärmt. Leider weist weder die Poesie noch die Volksweisheit darauf hin, ob die Fantasie einer jungen Frau auf ähnliche Weise jahreszeitlich geprägt ist. In der wissenschaftlichen Literatur gibt es dagegen deutliche Belege, dass menschliche Geburten in der Regel ein jahreszeitliches Muster aufweisen, bei dem es zu einer bestimm-

ten Zeit einen Höchstwert und einen klaren Tiefstwert etwa sechs Monate später gibt. Analysen der Geburtsdaten von Populationen der nördlichen Hemisphäre, die vor der Verfügbarkeit von zuverlässigen Verhütungsmitteln erfasst wurden, zeigten trotz gelegentlicher Ausnahmen, dass der Höchstwert im Frühling erreicht wird. In der Industriegesellschaft werden jahreszeitliche Muster freilich durch den modernen Lebensstil beeinflusst. Erstaunlicherweise aber gibt es Hinweise, dass auch in diesen Gesellschaften jahreszeitliche Muster gelten.

Ein Geburtenmuster weist nicht zwangsläufig darauf hin, dass auch die menschlichen Kopulationen jahreszeitlich bedingt sind. Es ist durchaus möglich, dass die Wahrscheinlichkeit der Befruchtung jahreszeitlich schwankt, während die Häufigkeit der Kopulation unverändert bleibt. Wie auch immer, Tennyson lag anscheinend weit daneben, denn bei einer Schwangerschaftsdauer von neun Monaten entspricht ein Höchstwert von Geburten im Frühling einem Höchstwert von Befruchtungen (und vielleicht auch der Kopulationen) im Hochsommer des Vorjahrs.

Adolphe Quetelet, ein belgischer Universalgelehrter, der wichtige Beiträge zur Astronomie, Mathematik, Statistik und Soziologie lieferte, zählte zu den ersten Wissenschaftlern, die ein jahreszeitliches Muster bei menschlichen Geburten erkannten. Heute kennt man ihn vor allem als Erfinder des Body-Mass-Index (auch Quetelet-Index genannt), der mit gewissen Verfeinerungen weiterhin zur Untersuchung der menschlichen Entwicklung angewendet wird. In einer 1869 in Brüssel veröffentlichten Abhandlung präsentierte Quetelet unter anderem niederländische Daten zu Geburten während der zwölf Jahre zwischen 1815 und 1826. Seine Auswertung zeigte einen klaren Höchstwert an Geburten im Februar und März, den Tiefstwert im Juli und einen kleinen Anstieg im September und Oktober. Quetelet stellte fest, dass das jahreszeitliche Muster in Dörfern stärker ausgeprägt war als in Städten, und er vermutete, dass Unterschiede bei der Temperatur eine Rolle spielten. Geburtsdaten aus der südlichen Hemisphäre führten Quetelet zu der Überzeugung, dass die Veränderungen des Sonnenstandes für die jahreszeitlichen Schwankungen verantwortlich waren. Nach den bahnbrechenden Entdeckungen Quetelets sind, besonders seit 1990, unzählige Berichte über die Schwankungen der menschlichen Geburtenraten erschienen.

Ellsworth Huntingtons Kompendium *The Season of Birth* aus dem Jahr 1938 war bei den Untersuchungen zur jahreszeitlichen Verteilung mensch-

licher Geburten ein Meilenstein. Huntington, der als Geograph vierzig Jahre für die Yale University arbeitete, untersuchte, wie klimatische Faktoren den Menschen beeinflussen, und entdeckte viele jahreszeitliche Muster. Als führender Vertreter des Environmentalismus vertrat er die Ansicht, dass menschliches Verhalten unmittelbar von Faktoren in der physischen Umwelt beeinflusst wird. Huntington interessierte sich besonders dafür, wie menschliche Fähigkeiten und Leistungen mit dem Geburtsmonat zusammenhängen.

Ein bedeutender Wendepunkt der biologischen Forschung waren zweifellos die drei Veröffentlichungen der Biologin Ursula Cowgill, die alle 1966 erschienen. Wie Huntington arbeitete Cowgill viele Jahre für die Yale University. Cowgill untersuchte auf der ganzen Welt Geburtsurkunden menschlicher Populationen und lieferte schlüssige Beweise, dass jahreszeitliche Muster praktisch universell vorkommen. Interessant war die Tatsache, dass sie in verschiedenen Regionen auch verschiedene Muster von Höchst- und Tiefstwerten entdeckte. Sie stellte fest, dass die jahreszeitlichen Muster in der südlichen Hemisphäre gegenüber der nördlichen um sechs Monate verschoben sind. Cowgill kam zu dem Schluss, dass der Unterschied der Geburtenraten vorwiegend durch die örtlichen klimatischen Bedingungen ausgelöst wird, die wiederum von kulturellen Einflüssen überlagert werden.

Cowgill stellte die Hypothese auf, dass die Umgebungstemperatur die Befruchtungsrate beeinflusst. Weiterhin berichtete sie, dass das jahreszeitliche Muster in urbanen und/oder industriellen Regionen unterschiedlich stark durchbrochen wurde. Eine ihrer Studien, die hauptsächlich auf dem Taufregister der englischen Stadt York zwischen 1538 und 1812 basierte, unterstrich dies eindeutig. Während der ersten zwei Jahrhunderte, von 1538 bis etwa 1752, stimmte das Muster mit Quetelets Auswertung der niederländischen Daten aus dem 19. Jahrhundert überein. Zwei klare Höchstwerte im Jahr, einer zwischen Februar und April und der andere zwischen September und November, waren erkennbar. Ab 1752 jedoch wurde die Schwankung der Geburtenrate allmählich geringer und ähnelte mehr dem modernen Muster.

Nach den bahnbrechenden Veröffentlichungen Cowgills kamen zahllose Publikationen über die jahreszeitlichen Schwankungen der Geburtenrate heraus. Besonders bemerkenswert sind dabei die Studien, die auffallende Ähnlichkeiten bei der Veränderung der monatlichen Geburtenraten in mehreren europäischen Ländern während des letzten Jahrhunderts aufwiesen.

In einer beeindruckend umfassenden Veröffentlichung analysierte eine Forschungsgruppe unter der Leitung des Biologen Ramón Cancho-Candela 2007 Daten von mehr als 33 Millionen Geburten in Spanien zwischen 1941 und 2000. Darin werden eindeutig ein Rückgang und schließlich das vollständige Verschwinden des jahreszeitlichen Geburtenmusters dokumentiert. Am Anfang war ein Muster mit zwei Höchstwerten, einem absoluten im April und einem kleineren im September, erkennbar. Nach 1970 trat eine zunehmende Veränderung des Musters auf. Die Höchstwerte waren immer weniger stark ausgeprägt und verschwanden während der 1990er Jahre vollkommen. Unterm Strich zeigten mehrere Studien, dass europäische Populationen ursprünglich im Frühling am meisten Geburten aufwiesen und es einen zweiten weniger ausgeprägten hohen Wert im Herbst gab. Aber dieses Muster wurde während des letzten Jahrhunderts schwächer und verschwand manchmal ganz.

1994 kamen die Bevölkerungswissenschaftler David Lam und Jeffrey Miron zu dem Schluss, dass sich die vorhandenen Muster mit der Zeit zwar ändern können, es aber »ausgeprägte und dauerhafte jahreszeitliche Geburtenmuster in praktisch allen menschlichen Populationen gibt«. Der Biologe Franklin Bronson unterstützte diese These mit der Untersuchung einer Reihe möglicherweise ausschlaggebender Umweltfaktoren, wie jahreszeitliche Veränderungen der Temperatur und der Nahrung. Er stellte fest, dass saisonale Veränderungen des Nahrungsangebots wahrscheinlich die Ovulation beeinflussen. Eine Verringerung der Nahrungsaufnahme oder eine Zunahme des Energieverbrauchs bei der Nahrungssuche kann die Geschlechtsreife verzögern und die Häufigkeit des Eisprungs verringern. Hohe Temperaturen in warmen Klimazonen können auch die Spermienproduktion so stark senken, dass die Empfängniswahrscheinlichkeit geringer wird. Dies gilt aber vermutlich nur für Männer, deren Bekleidung das Abkühlen des Hodensacks verhindert. Erhöhte Temperaturen während der warmen Jahreszeit können eventuell auch den Eisprung behindern oder zum Tod im frühen Embryonalstadium führen. An anderer Stelle wurde vermutet, dass eine gesunkene Empfängnisrate während der warmen Monate mit einer Abnahme des Geschlechtsverkehrs zusammenhängen könnte. Kurzum, es gibt viele Erklärungen für die jahreszeitliche Schwankung der menschlichen Geburtenrate.

VERSTÄNDLICHERWEISE VERSUCHTEN VIELE FORSCHER Verbindungen zwischen jahreszeitlichen Mustern bei der menschlichen Fortpflanzung und jährlichen Schwankungen bestimmter Umweltfaktoren herzustellen. Auf der Suche nach einer Erklärung solcher Muster muss man aber äußerst vorsichtig sein, wenn es sich um die Bewertung indirekter Hinweise aus Untersuchungen menschlicher Populationen handelt. In allen Fällen bemühen sich Wissenschaftler, anhand ihres Datenmaterials Muster zu erkennen. Das ist jedoch nur der erste Schritt auf einem langen Weg bis zum tatsächlichen Verständnis der Vorgänge. Im Idealfall sind Experimente notwendig, um Ideen zu prüfen, aber das ist bei der Untersuchung der menschlichen Biologie selten möglich. Ohne Experimente muss man besonders vorsichtig sein, da Thesen oft auf sehr vorläufigen und keineswegs zwingenden statistischen Erkenntnissen beruhen. Ein Kollege sagte einmal treffend: »Anthropologen fallen in drei Gruppen — diejenigen, die Statistik verstehen, und diejenigen, die keine Ahnung davon haben.«

Das Kernproblem liegt darin, dass zwischen zwei Dingen, die scheinbar miteinander zu tun haben, in Wirklichkeit gar kein Zusammenhang bestehen kann. Nehmen wir zum Beispiel eine Graphik, die eine Verbindung zwischen Hirngröße und Körpergröße bei Säugetieren darstellt. Das Muster, das wir uns vorstellen, ist eine Zunahme der Hirngröße mit steigender Körpergröße. Ein Statistiker würde sagen, dass zwischen Hirngröße und Körpergröße eine *Korrelation* besteht. Es gibt aber mehrere unterschiedliche Möglichkeiten was die Ursache dafür sein könnte. Die nächstliegende Deutung wäre sicherlich, dass eine Zunahme der Körpergröße auch eine Zunahme der Hirngröße zur Folge hat. Einige Wissenschaftler schlugen stattdessen vor, dass das Gehirn während der Entwicklung als Schrittmacher dient. Das hieße, dass die Hirngröße entsprechend die Körpergröße beeinflussen könnte. Möglich ist aber auch, dass eine Rückkoppelung zwischen Hirn- und Körpergröße dazu führt, dass sie übereinstimmend zunehmen. Doch damit nicht genug. Durchaus möglich ist auch, dass der festgestellte Zusammenhang zwischen Hirn- und Körpergröße von einem dritten Faktor abhängt, der gar nicht in der Graphik berücksichtigt wird. In der Statistik nennt man eine solche Ursache Störfaktor.

Der bahnbrechende britische Statistiker George Udny Yule, der 1911 das grundlegende Lehrbuch *Introduction to the Theory of Statistics* verfasste, gilt als Quelle eines berühmten Paradebeispiels für Störfaktoren. Erfreulich ist,

dass sein Beispiel aus dem Bereich der Fortpflanzung stammt. Yule fand heraus, dass die jährliche Anzahl menschlicher Geburten in elsässischen Dörfern mit der Anzahl der dort nistenden Störche zusammenhing: Je mehr Störche es gab, desto mehr Kinder kamen pro Jahr zur Welt. Obwohl es zweifellos reizvoll wäre, darin den Beweis dafür zu sehen, dass Störche menschliche Babys liefern, ist die tatsächliche Erklärung sehr banal. In größeren Dörfern standen mehr Häuser mit Schornsteinen, in denen Störche Nester bauen konnten, und selbstverständlich kamen in größeren Dörfern jedes Jahr im Durchschnitt mehr Kinder zur Welt. Der Störfaktor in diesem Fall ist die Dorfgröße. In diesem und anderen Fällen kann uns ein vergleichender Ansatz weiterhelfen. Da Störche eine beschränkte geographische Verbreitung haben, reicht es aus, wenn wir menschliche Geburtenraten in Dörfern ohne Störche betrachten. Falls in Dörfern ohne Störche menschliche Babys geboren werden, bricht jede Vorstellung eines Kausalzusammenhangs zwischen Störchen und Babys völlig zusammen.

Das Feld der menschlichen Fortpflanzung ist mit Beispielen übersät, bei denen eine bloße Assoziation als Beweis für einen Kausalzusammenhang interpretiert wurde. Ein einfacher Irrtum kommt von der Beobachtung, dass Frauen, die nicht menstruieren, nicht schwanger werden. Diese führte zu dem lang anhaltenden Glauben, der bis etwa 1930 in Amerika und Europa vorherrschte, dass ein direkter Kausalzusammenhang zwischen Menstruation und Empfängnis bestünde. Laut ursprünglicher Vorstellung kam es zu einer Schwangerschaft, indem man Sperma und Menstrualblut mischte. Entsprechend wurde die Menstruation als fertile Phase des weiblichen Zyklus gedeutet. Diese Deutung hielt sich auch noch lange, nachdem man entdeckt hatte, dass ein Spermium das Ei befruchten muss, weil man irrtümlich davon ausging, dass die Ovulation während der Menstruation stattfindet. Als Folge dessen riet man Frauen lange Zeit, zwecks Empfängnisverhütung während der Menstruation auf den Koitus zu verzichten und die Zyklusmitte als »sicheren Zeitraum« zu betrachten — also genau das Gegenteil zur herrschenden Lehrmeinung, die seit 1930 gilt. In einem subtileren Beispiel, das direkt mit jahreszeitlichen Schwankungen zusammenhängt, zeigte eine Untersuchung, dass sowohl die Empfängnis als auch der Absatz von Verhütungsmitteln im Sommer ihren Höhepunkt hat. Eine direkte Deutung dieses Befunds würde darauf hinauslaufen, dass Verhütungsmittel die Wahrscheinlichkeit der Befruchtung erhöhen, doch handelt es sich lediglich um

ein Beispiel für die allgemeine Regel, dass Dinge, die sich im Laufe der Zeit ändern, rein zufällig ein ähnliches Muster aufweisen können.

ZAHLREICHE FORSCHER, DARUNTER Quetelet, Huntington und Cowgill, unternahmen den Versuch, eine Verbindung zwischen jahreszeitlichen Mustern der menschlichen Fortpflanzung und Umweltfaktoren herzustellen. Ein beliebter Kandidat ist die Umgebungstemperatur, weil die männlichen Hoden so wärmeempfindlich sind. In jeder Region ist die Schwankungsbreite der Temperatur jedoch über die Jahre gesehen relativ stabil, weshalb die Umgebungstemperatur keine Erklärung für Veränderungen im jahreszeitlichen Muster der Geburtenrate liefern kann. Ein ähnliches Argument gilt für den Niederschlag, der ebenfalls häufig als möglicher Umweltfaktor für die Fortpflanzung genannt wird. Stattdessen kommt eine ganz andere Möglichkeit in Betracht. Es ist durchaus denkbar, dass sich im Verlauf der Evolution jahreszeitliche Muster in der Fortpflanzung entwickelten, um sich der durchschnittlichen Schwankung der Umweltbedingungen von Jahr zu Jahr anzupassen. In diesem Fall wäre das Fortpflanzungsmuster eher von inneren Faktoren angetrieben als durch die jeweils herrschenden externen Umweltbedingungen. Wie der Physiologe Alain Reinberg treffend bemerkte, ist die rhythmische Aktivität eine grundlegende Eigenschaft aller Lebewesen, vom Einzeller bis zum Menschen.

Als die Erforschung dieses Themas richtig in Gang kam, bekam ich durch einen glücklichen Zufall die einmalige Gelegenheit, mehr über die innere biologische Uhr zu erfahren. Mitte der 1960er Jahre hielt ich mich am Max-Planck-Institut für Verhaltensphysiologie im bayrischen Seewiesen auf, wo ich als Doktorand das Verhalten der Spitzhörnchen (*Tupajas*) studierte. Einige Kilometer entfernt, im Dorf Andechs, befand sich ein Partnerinstitut, das sich der bahnbrechenden Erforschung der inneren Uhren von Lebewesen widmete. Die grundlegendste Form einer inneren Uhr, die selbst bei einzelligen Organismen vorkommt, steuert Aktivitätsmuster und biologische Vorgänge in jedem Tag-und-Nacht-Zyklus. Diese sogenannte circadiane Uhr grenzt eine Periode von ungefähr vierundzwanzig Stunden ab. Die Feinabstimmung dieser ungefähren Zeitspanne erfolgt durch Hinweise aus der Umwelt, vor allem durch die An- oder Abwesenheit des Tageslichts.

Leiter des Andechser Forschungsinstituts war der Mediziner und Physiologe Jürgen Aschoff, der einer der Gründerväter der Erforschung innerer Uhren war, einer Disziplin, die man heute als Chronobiologie bezeichnet. Seine Forschungsgruppe, zu der auch der herausragende Ornithologe Eberhard Gwinner gehörte, führte eine Reihe von Experimenten bei Säugetieren und Vögeln durch, um die Eigenschaften der inneren Tag-und-Nacht-Uhr zu untersuchen. Einer der auffälligsten Befunde dieser Pionierarbeit war die Beobachtung, dass Tiere unter Ausschluss von äußeren Indikatoren im Innern erzeugte Aktivitätsrhythmen aufweisen, die um einige Stunden über oder unter dem normalen 24-stündigen Zeitraum liegen können. Zum Beispiel konnte es sein, dass ein Tier einen Zyklus mit einer Durchschnittsdauer von etwa 26 Stunden hatte, wenn es keine Hinweise von außen gab. Mit anderen Wörtern sind also Zeitgeber in der Umwelt notwendig, um der inneren Uhr eine regelmäßige 24-stündige Rhythmik aufzuzwingen. Es ist ungefähr so, als hätte man eine Standuhr, die nicht genau geht und jeden Tag bei Sonnenaufgang und Sonnenuntergang neu gestellt werden muss, damit sie stimmt. Jeder, der schon einmal unter starkem Jetlag litt, weiß, dass man einen hohen Preis dafür bezahlt, wenn man sich mit seiner Uhr anlegt, indem man Zeitzonen überspringt und die extrem wichtigen Lichtsignale aus der gewohnten Umgebung verlagert.

Die Forschung am Andechser Institut beschränkte sich nicht auf Tiere. Nach einigen Selbstversuchen suchte Aschoff unter seinen Studenten Freiwillige, die bereit waren, bis zu vier Wochen lang ohne Unterbrechung in einem eigens dafür gebauten unterirdischen Bunker ohne jegliche externe Hinweise auf die Zeit zu verbringen. Jeder Freiwillige musste vor dem Aufenthalt im Bunker sämtliche Uhren abgeben, um seine Aktivitäten während des Aufenthalts durch willkürliches Ein- und Ausschalten der Lichter zu regeln. Die Insassen des Bunkers bereiteten ihre Speisen selbst zu, so dass es auch keine externen Hinweise auf die Zeit durch Versorgungspersonal gab. Jeder Freiwillige bekam zudem als tägliche Spende eine Flasche des Andechser Starkbiers, das im benachbarten Kloster gebraut wird. In der Isolation des Bunkers lief bei jedem Probanden die innere Uhr völlig unabhängig. Wie bei den Tierversuchen wies die Dauer des Schlaf-Wach-Rhythmus in der Regel eine Abweichung von einigen Stunden mehr oder weniger als die normalen 24 Stunden auf. Im Aschoffschen Bunker betrug die Durchschnittsdauer einer unabhängig laufenden inneren Uhr beim Menschen etwa fünfundzwanzig Stunden.

Neben der 24-Stunden-Uhr haben Tiere und Pflanzen mit hoher Lebenserwartung eine weitere innere Uhr, die mit dem Jahresverlauf zusammenhängt. Auch für diesen circannualen Rhythmus sind Zeitgeber aus der Umwelt unentbehrlich. In vielen Fällen wurde die jährliche Schwankung der Tageslänge als Schlüsselfaktor für die Feinabstimmung der inneren circannualen Uhr identifiziert. Die Tageslänge — die Zeitspanne zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang — weist im Jahresverlauf eine systematische und vorhersehbare Schwankung auf und dient als zuverlässiger Indikator für die verschiedenen Jahreszeiten. Allerdings gibt es eine potentielle Einschränkung für die Zuverlässigkeit der Tageslänge als Zeitgeber für die circannuale Uhr: Das Ausmaß der Schwankung hängt vom Breitengrad ab. Auf hohen Breitengraden beträgt die Schwankung der Tageslänge mehrere Stunden pro Jahr, während die jährliche Schwankung auf niedrigen Breitengraden nahe dem Äquator kaum wahrnehmbar ist. In der nördlichen Hemisphäre sind die längsten Tage im Juni und die kürzesten Ende Dezember. In Chicago zum Beispiel dauert der längste Tag im Hochsommer mehr als fünfzehn Stunden, während der kürzeste Tag mitten im Winter nur knapp neun Stunden lang ist — das ergibt über das Jahr gesehen einen maximalen Unterschied von mehr als sechs Stunden. Am Äquator hingegen beträgt die Schwankung der Tageslänge nur einige Minuten, wodurch sie in tropischen Gebieten als Zeitgeber für die jährlichen Zyklen viel weniger Bedeutung hat. Im Vergleich zu circadianen Uhren wurden circannuale Uhren deutlich seltener experimentell erforscht, weil die Versuche Jahre und nicht nur Monate dauern müssen. Trotzdem konnte man wiederholt durch Tierversuche nachweisen, dass die von der inneren Uhr erzeugten Zyklen etwa ein Jahr dauern, wenn man den Umweltfaktor Tageslänge als Zeitgeber beseitigt.

Eine jahreszeitliche Einschränkung der Fortpflanzung, die je nach Art zwischen einer streng begrenzten Fortpflanzungsperiode und einer ganzjährigen Fortpflanzung mit einem merklichen Höhepunkt zu einer bestimmten Jahreszeit schwanken kann, ist bei Säugetieren äußerst verbreitet. Bei vielen Säugetierarten hängen Paarung, Befruchtung und Geburt mit den jahreszeitlichen Schwankungen der Tageslänge zusammen. In solchen Fällen werden die Entwicklung der Hoden bei den Männchen und die sexuelle Aktivität der Weibchen durch eine bestimmte Phase des jährlichen Rhythmus der Tageslänge ausgelöst. Die offensichtlichsten Auswirkungen der Steuerung durch die Tageslänge kann man natürlich bei Säugetierarten be-

obachten, die ihren Nachwuchs in eng begrenzten Zeiträumen zur Welt bringen. Unter Primaten kommt dies am deutlichsten bei den Lemuren auf Madagaskar vor. In einigen Fällen lieferte die experimentelle Manipulation im Labor direkte Beweise für den Einfluss der Tageslänge auf die Fortpflanzung. Bei meinen eigenen Untersuchungen am University College London — wo mir meine früheren Forschungen zur biologischen Uhr am Andechser Max-Planck-Institut zugutekamen — brachte ich zum Beispiel meine Mausmakis dazu, sich zu einem für mich günstigen Zeitpunkt fortzupflanzen. Zu diesem Zweck verwendete ich eine spezielle Lichtuhr, die automatisch dieselbe Schwankungsbreite der Tageslänge wie in Madagaskar erzeugte. Da bei Mausmakis die Phase der Fortpflanzung durch eine Zunahme der Tageslänge ausgelöst wird, stellte ich die Lichtuhr so ein, dass die Paarung zu einer Zeit stattfand, zu der ich leichter intensive Beobachtungen vornehmen konnte. Einmal brachte ich es sogar fertig, das Intervall zwischen zwei Fortpflanzungszyklen auf neun Monate zu reduzieren, indem ich den jährlichen Rhythmus der Tageslänge verkürzte.

Im Grunde sind nicht unbedingt mehrjährige Experimente notwendig, um festzustellen, ob die Fortpflanzung einer bestimmten Säugetierart durch die jährliche Schwankung der Tageslänge gesteuert wird. Es gibt nämlich eine Vereinfachung, die mit den natürlichen Folgen dessen zu tun hat, dass die Erde auf einer schrägen Achse die Sonne umkreist. In der südlichen Hemisphäre ist das jährliche Schwankungsmuster der Tageslänge ein Spiegelbild des Musters im Norden. Entsprechend fallen die kürzesten Tage in der südlichen Hemisphäre in den Juni und die längsten in den Dezember. Dieser Unterschied führt dazu, dass die Versetzung von Säugetieren, die von der Tageslänge abhängig sind, von einer Hemisphäre zur anderen eine Verschiebung der Fortpflanzungszeit um sechs Monate verursacht. Hierzu liefern die Zuchtregister von Zoos, die häufig Säugetiere aus der anderen Hemisphäre beherbergen, sehr nützliche Informationen.

Die Schwankung der Tageslänge ist jedoch nur ein externer Indikator für die Jahreszeit. Sie bestimmt nicht den vermutlichen Zeitpunkt der Fortpflanzung. Paarung, Trächtigkeit, Geburt oder Stillzeit wurden allesamt von verschiedenen Autoren als treibender Faktor für den Zeitpunkt der Fortpflanzung genannt. Meine eigenen Untersuchungen der Lemuren brachten aber zum Vorschein, dass es bei den jahreszeitlichen Mustern von Paarung, Trächtigkeit und Geburt zwischen den Arten erhebliche Unterschiede gibt.

Bei den größeren Lemuren sind die Trag- und Säugezeiten bedeutend länger als bei den kleineren Arten. Bei den größten Lemuren finden Paarung, die gesamte Trächtigkeit und sogar der Anfang der Säugezeit während der Trockenzeit mit beschränktem Nahrungsangebot und kurzen Tagen statt. Der einzige gemeinsame Faktor, den ich herausfinden konnte, war dieser: Bei jeder Art finden Geburten zu einem geeigneten Zeitpunkt statt, an dem die Jungen nach der Entwöhnung genügend Zeit haben, selbständig Nahrung aufzunehmen und ausreichende Reserven vor dem Ende der Regenzeit zu akkumulieren. Auf diese Weise kann der Nachwuchs die Härte der darauffolgenden Trockenzeit überstehen. Die Vorbereitung auf die Jahreszeit des Nahrungsmangels ist vermutlich der Schlüssel für das Überleben der Jungtiere. Eine Untersuchung anderer Primatenarten zeigt, dass diese Erklärung bei sämtlichen beobachteten Mustern generell zutrifft. Selbstverständlich ist bei größeren Arten wie Menschenaffen und Menschen, die nicht auf monate-, sondern jahrelanges Säugen ausgerichtet sind, der Zusammenhang zwischen jahreszeitlicher Verteilung der Geburten und Nahrungsangebot weit weniger eindeutig.

DURCH UNTERSUCHUNGEN UNSERER VERWANDTEN UNTER DEN PRIMATEN können wir viel über die jahreszeitliche Fortpflanzung lernen. Mehrere Jahrzehnte lang war bei medizinischen Vergleichen mit dem Menschen der Rhesusaffe — ein rotgesichtiger Bewohner asiatischer Wälder — der maßgebliche Laborprimat. Rhesusaffen kommen in einem riesigen geographischen Gebiet in Asien vor, das sich von Ostafghanistan und Nordindien bis nach Südchina und Thailand erstreckt. Früher waren diese Affen relativ leicht für die Forschung zu bekommen, und sie wurden in großen Mengen nach Europa und in die Vereinigten Staaten importiert. Ziemlich lang lieferten Untersuchungen der Fortpflanzungsbiologie dieser Affenart die meisten Befunde bei nicht menschlichen Primaten, die zur Deutung der menschlichen Fortpflanzung herangezogen wurden. Jahrelang war der Begriff »nicht menschlicher Primaten« praktisch mit »Rhesusaffen« gleichzusetzen.

Der größte Wegbereiter für die Erforschung der menschlichen Fortpflanzung am Beispiel der Rhesusaffen war der Biologe Carl Hartman. Seine 1932 erschienene Monographie über die Fortpflanzungsbiologie der Rhesusaffen

gilt bis heute als Meisterwerk. Einige Jahre, nachdem Hartman die Untersuchungen mit seiner Laborkolonie begonnen hatte, wurden 1938 etwa 400 Rhesusaffen auf Cayo Santiago, einer ungefähr 15 Hektar großen unbewohnten Insel nahe der südöstlichen Küste Puerto Ricos, freigelassen. Seither wurde diese künstlich versorgte, aber frei lebende Kolonie erhalten und beobachtet. Bis heute liefert sie eine beeindruckende Fülle von Informationen über das Verhalten und die Fortpflanzung von Rhesusaffen unter naturnahen Bedingungen.

Den Grundstock der Kolonie auf Cayo Santiago bildeten Tiere, die der Psychologe Clarence Ray Carpenter, ein Pionier der Primatenfeldforschung, in Nordindien gefangen hatte. Kurz nach ihrer Freilassung auf Cayo Santiago organisierten sich die Rhesusaffen schnell in Gruppen, deren Nachkommen seither sorgfältig überwacht werden. 1942 berichtete Carpenter, dass die Rhesusaffen Cayo Santiagos ein jahreszeitliches Muster bei der Fortpflanzung zeigten, allerdings hatte es einige Jahre gedauert, bis dieses erkennbar war. Während der Paarungsperiode wiesen erwachsene Weibchen eine Reihe von Menstrualzyklen auf, bei denen die Begattungsbereitschaft jeweils etwa neun Tagen dauerte. Von Tierhändlern erfuhr Carpenter, dass Rhesusaffen auch in ihrem natürlichen Lebensraum in Indien eine dreimonatige Phase haben, in der sie ihre Jungen zur Welt bringen. Seither wurde diese Tatsache mehrfach durch langfristige Felduntersuchungen bestätigt.

Bei den freilebenden Rhesusaffen Cayo Santiagos zeigen sowohl Männchen als auch Weibchen bei der Fortpflanzung einen jahreszeitlichen Zyklus. 1964 berichtete der Anthropologe Donald Stone Sade, dass die Hoden der Männchen ihre maximale Größe während der Paarungszeit erreichen und in der Zeit der Geburten beträchtlich kleiner sind. Im darauffolgenden Jahr wies er zusammen mit Clinton Conaway nach, dass es auch bei der Spermienbildung einen Jahreszyklus gibt und der Höhepunkt während der Paarungszeit im Herbst erreicht wird. Andere Untersuchungen ergaben, dass die weiblichen Zyklen bei Rhesusaffen auf den Zeitraum zwischen Juli und Januar beschränkt sind, und dass es vor allem im September und Oktober zur Begattung kommt. Dieses Muster kann man heute noch bei den Rhesusaffen auf Cayo Santiago erkennen. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass frei oder in Außengehegen gehaltene Rhesusaffen ein jahreszeitlich begrenztes Fortpflanzungsmuster zeigen, das dem ihrer Artgenossen in der indischen Heimat ähnelt.

Wichtig ist die Frage, ob es auch in einer geregelten Laborumgebung ein jahreszeitliches Muster gibt. Dies ist tatsächlich der Fall. Carl Hartman hielt 1931 fest, dass die eindeutige jahreszeitliche Schwankung der Empfängnisrate in seiner Kolonie anhielt und die Ovulation während eines Teils des Jahres fast vollständig ausfiel. Die Fortpflanzungsbiologen Richard Michael und Barry Keverne bestätigten schließlich, dass seit den Untersuchungen von Hartman ein ähnlicher Höchstwert von Geburten im März und April in verschiedenen Laborkolonien beobachtet wurde. In ihrer eigenen Kolonie beobachteten sie eine erhöhte Ejakulationsrate zwischen November und Januar, mit einem auffälligen Höhepunkt im Dezember, und im Gegensatz dazu, einer niedrigen Frequenz zwischen Februar und Mai. Eine solche Beständigkeit eines jahreszeitlichen Musters in der Gefangenschaft steht im Widerspruch zu der Deutung, dass die Paarung direkt durch Umweltfaktoren gesteuert wird. Wichtig ist die Anmerkung, dass das Muster im Bericht von Michael und Keverne vielleicht durch Schwankungen des Tageslichts beeinflusst wurde. Obwohl die Umgebungstemperatur während der Untersuchungen annähernd konstant blieb, wurde die normale künstliche Beleuchtungsdauer von vierzehn Stunden im Sommer mit natürlichem Tageslicht ergänzt, was die Tageslänge zwischen Mitte Juni und Mitte Juli um bis zu zwei Stunden erhöhte.

Es ist gut möglich, dass die schwankenden Tageslängen, mit denen die Rhesusaffen von Michael und Keverne im Jahresverlauf konfrontiert wurden, deren Fortpflanzungsverhalten beeinflusste. Tatsächlich erwähnte der scharfsinnige Hartman bereits 1932, dass australische Zoodirektoren eine sechsmonatige Verschiebung des Zeitraums von Geburten im Vergleich zur nördlichen Hemisphäre festgestellt hatten. Für weitere Untersuchungen schlossen sich der Psychologe Craig Bielert und John Vandenbergh zusammen, um das jahreszeitliche Geburtenmuster nicht nur in australischen, sondern auch in neuseeländischen und südafrikanischen Zoos zu untersuchen. Sie sagten voraus, dass sich mit einem Wechsel von der nördlichen zur südlichen Hemisphäre auch der jahreszeitliche Höchstwert der Geburten um sechs Monate verschiebe. Und die Ergebnisse gaben ihnen recht: Die Paarungszeit in der südlichen Hemisphäre beschränkte sich vorwiegend auf den Zeitraum zwischen März und August, und die meisten Geburten fanden zwischen Oktober und Januar statt.

Was aber geschieht, wenn die Tageslänge das ganze Jahr über vollkommen unverändert bleibt? Die Fortpflanzungsbiologin Jean Wickings und ihr

Kollege Eberhard Nieschlag setzten sich mit dieser Frage auseinander, indem sie erwachsene Rhesusaffen-Männchen untersuchten, die bis zu vier Jahre lang unter kontrollierten Laborbedingungen isoliert von Weibchen und ohne jahreszeitliche Schwankungen von Licht, Feuchtigkeit und Temperatur lebten. Die Hodengröße, die innere Hodenstruktur, die Spermienproduktion, die Testosteronwerte und die Ejakulationsrate zeigten allesamt ein ausgeprägtes jahreszeitliches Muster, mit Maximalwerten in den Herbst- und Wintermonaten. Die Beständigkeit eines so deutlichen jahreszeitlichen Musters bei Rhesusaffen, die isoliert von jeglichen externen Umwelteinflüssen lebten, weist die Existenz eines inneren Regulierungsmechanismus nach. Daher lässt sich sagen, dass die jahreszeitlich geprägte Fortpflanzung der Rhesusaffen durch eine innere circannuale Uhr gesteuert wird, deren Feinabstimmung durch Veränderungen der Tageslänge beeinflusst wird.

GIBT ES DABEI PARALLELEN ZUM MENSCHEN? Schließlich haben Rhesusaffen, die in freier Wildbahn leben, einen klar definierten Zeitraum, in dem sie sich fortpflanzen, und nicht nur einen Höchstwert innerhalb einer ganzjährigen Fortpflanzung. Wie Cowgill berichtete, weisen die Geburtsdaten bei menschlichen Populationen der südlichen Hemisphäre ein Muster auf, das gegenüber der nördlichen Hemisphäre um sechs Monate verschoben ist. Während der Höchstwert von Geburten in der nördlichen Hemisphäre gewöhnlich im Frühling liegt, fällt er im Süden mit dem Herbst im Norden zusammen. Dies deutet daraufhin, dass das jahreszeitliche Geburtenmuster beim Menschen wie bei den Rhesusaffen im Zusammenhang mit der Schwankung der Tageslänge steht. Dieser Hinweis wird durch die Tatsache bekräftigt, dass bei menschlichen Populationen in der Nähe des Äquators, wo es im Jahresverlauf nur kleine Veränderungen in der Tageslänge gibt, entweder nur eine reduzierte oder gar keine jahreszeitliche Schwankung von Schwangerschaften und Geburten festzustellen ist.

Eine weltweite Untersuchung brachte zum Vorschein, dass die jahreszeitliche Schwankung der menschlichen Geburtenrate mit steigenden Breitengraden immer größer wird. Die Korrelation zwischen jahreszeitlicher Schwankung und steigendem Breitengrad bedeutet offenbar, dass die Temperatur als wichtigster Faktor ausgeschlossen werden kann. Die wärmste Phase des Jahres im Norden ist zwar im Vergleich zur wärmsten Phase im

Süden um sechs Monate verschoben, aber die jahreszeitliche Schwankung der Geburtenrate ist auf den hohen Breitengraden stärker ausgeprägt, und nicht in der Nähe des Äquators, wo die Temperaturen normal am höchsten sind.

Natürlich kann man den Mechanismus hinter dem jahreszeitlichen Muster der menschlichen Fortpflanzung nicht untersuchen, indem man Versuchspersonen jahrelang unter kontrollierten Laborbedingungen einsperrt. Aus diesem Grund werden wir immer auf die Suche nach Indizien angewiesen sein, um die jahreszeitliche Schwankung bei der menschlichen Fortpflanzung erklären zu können. Ein solches Muster existiert bestimmt: Verschiedene Untersuchungen wiesen Schwankungen bei Männern in der Samenqualität und im Testosteronspiegel im Jahresverlauf nach, und auch bei Frauen wurden jahreszeitliche Unterschiede, zu welcher Tageszeit der Eisprung stattfindet, entdeckt.

Gemeinsam mit dem medizinischen Psychologen Till Roenneberg führte Jürgen Aschoff eine raffinierte statistische Analyse durch mit dem Ziel, die biologischen und sozialen Faktoren, die die jahreszeitlichen Muster bei menschlichen Geburten beeinflussen können, voneinander zu trennen. Durch eine Analyse von Daten aus 166 verschiedenen Regionen der Welt, die insgesamt 3000 Jahre monatlicher Geburtenraten umfasste, wiesen Roenneberg und Aschoff nach, dass das beobachtete Muster vom Breitengrad abhängt, wobei es einen sechsmonatigen Unterschied zwischen der nördlichen und der südlichen Hemisphäre gibt und das Ausmaß der jahreszeitlichen Schwankung mit steigendem Breitengrad zunimmt. Die Ergebnisse, die in zwei 1990 erschienenen Veröffentlichungen zusammengefasst wurden, wiesen zum ersten Mal auf globaler Ebene eindeutig nach, dass eine schwankende Tageslänge tatsächlich die Fortpflanzung beim Menschen und vielen anderen Tierarten beeinflusst. Roenneberg und Aschoff kamen zu dem Schluss, dass die jahreszeitlichen Muster der menschlichen Fortpflanzung primär durch biologische Faktoren gesteuert werden, obwohl soziale Einflüsse bei den Schwankungen des Empfängniszeitpunkts durchaus eine Rolle spielen können. Auch die Umgebungstemperatur ist ein bedeutender Faktor. Bei milden Temperaturen zwischen 4°C und 21°C liegen die Empfängnisraten über dem jährlichen Durchschnittswert, während bei extremen Temperaturen unterhalb oder oberhalb dieses Bereiches ein Rückgang der Schwangerschaftsraten zu beobachten ist.

Da der Zeitpunkt der Empfängnis anscheinend eine Schlüsselrolle bei der jahreszeitlichen Schwankung der menschlichen Geburtenrate spielt, stellt sich die Frage, ob auch bei der Begattung und bei den Eigenschaften von Spermien und Eiern jahreszeitliche Schwankungen vorliegen. Gibt es eigentlich eine optimale Jahreszeit für die Geschlechtszellen? Die gibt es tatsächlich, aber erstaunlicherweise ist die Spermienkonzentration offenbar im Sommer am niedrigsten, also ausgerechnet zu dem Zeitpunkt, an dem die sexuelle Aktivität ihren Höhepunkt erreicht. 1984 veröffentlichte zum Beispiel der Fortpflanzungsepidemiologe Alfred Spira eine Untersuchung von mehr als 1.000 Ejakulaten, die er in einem Zeitraum von drei Jahren bei 52 Medizinstudenten aus New York gesammelt hatte. Beim Volumen der Samenflüssigkeit, der Spermienkonzentration und der Gesamtspermienzahl stellte er zwei Spitzenwerte fest, den ersten am Übergang vom Winter zum Frühling und den zweiten im Spätherbst. Im Gegensatz dazu erreichten der Anteil normal gebildeter Spermien und die Beweglichkeit im Spätsommer ihren Höchstwert, während die niedrigsten Werte im Spätwinter bzw. am Frühlingsanfang gemessen wurden. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass es im Spätsommer zwar weniger Spermien gibt, ihre Qualität dann aber optimal ist, während diese am Übergang vom Winter zum Frühling, wenn die Spermienanzahl ihren Höhepunkt erreicht, am schlechtesten ist. Eine von Spira durchgeführte Erhebung ergab, dass die Ergebnisse mehrerer anderer Untersuchungen in eine ähnliche Richtung weisen. Die Produktion optimaler Spermien im Spätsommer passt gut zum Höchstwert von Geburten im Frühling, aber es ist trotzdem überraschend, dass die Spermienanzahl im Spätsommer niedrig ist und nicht hoch.

Untersuchungen aus dem Bereich der medizinisch unterstützten Fortpflanzung sind besonders aufschlussreich bei der Aufklärung von jahreszeitlichen Schwankungen, da sie einer kontrollierten Laborumgebung bei der menschlichen Fortpflanzung am nächsten kommen. Der Gynäkologe Eftis Paraskevaides und seine Kollegen veröffentlichten 1988 eine Studie über ein jahreszeitliches Muster bei mehr als 250 Schwangerschaften nach künstlicher Befruchtung in ihrer Klinik. Im Zeitraum zwischen Winterbeginn und Frühlingsanfang (also Oktober bis März) kam es häufiger zu Schwangerschaften, wobei der Höchstwert im November lag. Da der Spitzenwert der Spermienanzahl erst am Ende dieses Zeitraums im Februar und März lag, weist dieses Ergebnis entweder auf eine jahreszeitliche Schwankung der Qualität der Eier oder der Aufnahmefähigkeit der inneren Gebärmutterschicht hin.

Der Gynäkologe Simon Wood und seine Kollegen vom Women's Hospital in Liverpool untersuchten die jahreszeitlichen Schwankungen der Erfolgsquote von In-vitro-Fertilisationen (IVF). In ihrem Bericht aus dem Jahr 2006 fassten sie die Ergebnisse einer Analyse von fast 3.000 standardisierten IVF-Zyklen zusammen, die mit intrazytoplasmatischer Spermieninjektion kombiniert worden waren. Der Erfolg war deutlich größer, wenn das Verfahren während der Monate mit längeren Tagen (April bis September) durchgeführt wurde, als in den Monaten mit kürzeren Tagen (Oktober bis März). Während der Monate mit längeren Tagen war die Stimulierung des Eierstocks wirksamer, die Einnistungsrate pro transferiertem Embryo signifikant besser und die klinische Schwangerschaftsrate höher (20 Prozent gegenüber 15 Prozent). Bei der In-vitro-Fertilisationsrate gab es jedoch keinen signifikanten Unterschied zwischen Sommer und Winter. Die jahreszeitlichen Unterschiede waren noch deutlicher, wenn bei Patienten, die in beiden Zeiträumen behandelt wurden, die Monate mit den längsten Tagen (April bis September) mit den Monaten mit den kürzesten Tagen (Oktober bis März) verglichen wurden.

FÜR DIE EINWOHNER MODERNER INDUSTRIESTAATEN sind die jahreszeitlichen Schwankungen der menschlichen Geburtenrate offenbar kaum mehr als ein faszinierendes Erbe unserer biologischen Vergangenheit, das in der Gegenwart aber fast keine Bedeutung hat. Einigen jüngeren Berichten zufolge könnte die jahreszeitliche Schwankung der Geburtenrate aber Folgen für unsere Gesundheit haben. Ein auffallendes Beispiel beschrieb der Kinderarzt Gregor Katz 1953 in seinem Bericht über ein jahreszeitliches Muster von Frühgeburten in Schweden. Übereinstimmend mit dem normalen europäischen Muster lag der Höchstwert termingemäßer Geburten im Frühling. Im Gegensatz dazu stellte Katz bei einer Stichprobe von mehr als 200 Frühgeburten in einem Karlstader Krankenhaus zwischen 1944 und 1951 einen Spitzenwert im Januar fest, also etwa zwei Monate früher. Im Durchschnitt kamen die Kinder etwa anderthalb Monate zu früh auf die Welt, womit der Höchstwert der Befruchtungen in etwa dem Höchstwert termingemäßer Geburten entsprach. Mit anderen Worten lag der Höchstwert der Befruchtungen sowohl bei Frühgeburten als auch bei termingemäßen Geburten im Sommer. Im Rahmen einer neueren Studie wandten die

Humanökologen Shinya Matsuda und Hiroaki Kahyo eine raffinierte statistische Analyse an, um die jahreszeitliche Schwankung der Frühgeburten zu erforschen. Sie untersuchten die Daten von mehr als siebeneinhalb Millionen Geburten in Japan während der fünf Jahre zwischen 1979 und 1983 und fanden einen deutlichen Höchstwert im Mai/Juni (d. h. Spätfrühling und Frühsommer) für Befruchtungen, die mit Frühgeburten endeten. Das entsprach einem Höchstwert von Frühgeburten im Dezember/Januar, was dem von Katz mit einer viel kleineren Stichprobe entdeckten Muster entspricht.

Wie Katz scharfsinnig bemerkte, ist bei der Deutung anderer Befunde sehr wichtig, eine eventuelle jahreszeitliche Schwankung der Quote von Frühgeburten zu berücksichtigen. Diese Schwankung könnte das Verhältnis zwischen dem Geburtsmonat und anderen Faktoren zumindest teilweise erklären. Die kürzeren Schwangerschaften, die mit Frühgeburten enden, führen zwangsläufig auch zu einem kleineren Gewicht bei der Geburt, und dies könnte wiederum erklären, wie die interessanten jahreszeitlichen Unterschiede von Intelligenz und Erfolg im späteren Leben zustande kommen, die von verschiedenen Autoren wie Ellsworth Huntington festgestellt wurden

Eine Studie aus dem Jahr 1960 über mehr als 1.000 Fehlgeburten, die die Frauenärzte Riley Kovar und Richert Taylor in einem Krankenhaus in Omaha, Nebraska erfassten, gestattet uns, die Sachlage aus einem anderen Blickwinkel zu betrachten. Kovar und Taylor fanden kein klares jahreszeitliches Muster, aber die Fehlgeburten kamen gehäuft vor. Zudem gab es eine direkte Verbindung zwischen der Quote an Fehlgeburten und den täglichen Temperaturunterschieden. Auch im Fall der Fehlgeburten sieht es also so aus, dass die menschliche Fortpflanzung durch das Zusammenspiel von jahreszeitlichen Schwankungen und Umgebungstemperatur beeinflusst wird. Zweifellos spielen noch andere Faktoren eine Rolle, wobei eine jahreszeitliche Schwankung bei Infektionen überaus wahrscheinlich ist.

VIELE BELEGE DEUTEN MITTLERWEILE DARAUF HIN, dass die jahreszeitliche Schwankung der Tageslänge die Fortpflanzung menschlicher Populationen vor allem auf den mittleren und höheren Breitengraden beeinflusst. Die beobachteten Muster wurden jedoch im Verlauf des letzten Jahrhunderts schwächer, und in einigen Fällen verschob sich der Höchstwert der Geburtenrate. Anscheinend hat der Einfluss der Umgebungstempe-

ratur während dieser Zeit zugenommen. Wahrscheinlich sorgten veränderte Lebensbedingungen — im Zusammenhang mit zunehmender Industrialisierung und häufigerer Verwendung künstlicher Beleuchtung — dafür, dass die Wirkung der natürlichen Schwankungen der Tageslänge geringer wurde.

Gesteuerte Veränderungen der Tageslänge stellen eine der wenigen Möglichkeiten dar, auf diesem Gebiet Versuche am Menschen durchzuführen. Bei der Untersuchung biologischer Rhythmen unter Lichteinfall erzielte eine Forschungsgruppe unter der Leitung des klinischen Psychobiologen Thomas Wehr gleich mehrere frappierende Ergebnisse. In einer 1991 veröffentlichten Studie testete Wehr die Auswirkungen von künstlichen Veränderungen der Tageslänge auf die Schlafdauer und den Ausstoß des Hormons Melatonin. Melatonin, auch »Hormon der Dunkelheit« genannt, wird bei Säugetieren durch die winzige Zirbeldrüse im Gehirn ins Blut ausgeschüttet. Diese Drüse ist ein Überbleibsel des dritten Auges, das sich ursprünglich in der Schädeldecke früher Reptilien befand. Beim Menschen ist die Zirbeldrüse etwa so groß wie ein Reiskorn. Die Ausschüttung von Melatonin, das bei der Koordination der biologischen Uhr eine unmittelbare Rolle spielt, findet nur während der Dunkelheit statt. Sinnvollerweise wird Melatonin in Apotheken als rezeptfreies Medikament zur Bekämpfung von Jetlag verkauft.

In Wehrs Experiment wurden acht Freiwillige zuerst eine Woche lang einem »Sommertagesablauf«, mit einer 16-stündigen Lichtphase und einer achtstündigen Dunkelphase, und anschließend vier weitere Wochen einem »Wintertagesablauf«, mit zehn Stunden Licht und 14 Stunden Dunkelheit, ausgesetzt. Im Wintertagesablauf mit kurzen Tagen war bei den Freiwilligen die Dauer der Melatoninausschüttung wie bei anderen Säugetieren während der Nacht signifikant größer (um mehr als zwei Stunden). Die Dauer der Schlafphase war ebenfalls größer. Bei früheren Untersuchungen hatte Wehr festgestellt, dass die Einstellung der biologischen Uhr während einer 24-stündigen Testperiode unter gedämpften Lichtbedingungen bei einer Versuchsperson, die permanent wach war, erhalten blieb. Durch diese Tests bei den Freiwilligen konnten Unterschiede zwischen dem Sommer- und dem Wintertagesablauf nachgewiesen werden. Sie zeigten, dass die innere Uhr dauerhaft neu eingestellt wird, wenn man zuvor einer bestimmten Tageslänge ausgesetzt war.

Wehr untersuchte auch die Auswirkungen jahreszeitlicher Veränderungen der Tageslänge auf die zugehörigen Hormonmuster. Als Reaktion auf

Lichteinfall synchronisiert die circadiane biologische Uhr die Einstellung der biologischen Tage und Nächte, um eine Übereinstimmung mit dem Sonnenrhythmus zu erzielen. Gleichzeitig wird die Dauer der biologischen Tage und Nächte angepasst, damit die jahreszeitlichen Veränderungen in der Länge der Sonnenscheindauer wiedergespiegelt werden. Wehr fand heraus, dass Veränderungen der Tageslänge nicht nur die nächtliche Ausschüttung von Melatonin beeinflussen, sondern auch die Produktion von Hypophysen-Hormonen wie Prolaktin, Cortisol und des Wachstumshormons.

Unabhängig von der Tageslänge oder der Dauer des täglichen Lichteinfalls zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang kann Licht an sich die Biologie des Menschen beeinflussen. Wehr registrierte gewisse Übereinstimmungen zwischen jahreszeitlichen Schwankungen in der Fortpflanzung und der sogenannten »Winterdepression« und vermutete, dass simple biologische Vorgänge die Ursache sind. Die Winterdepression ist eine Erkrankung, die erst 1984 anerkannt wurde, und bei der Patienten zu einer bestimmten Jahreszeit unter depressiven Zuständen leiden. Die Symptome kommen in der Regel am häufigsten im Winter vor, aber die Depression kann auch zu anderen Jahreszeiten auftreten. Diese Variation erklärt, warum die Erkrankung unter verschiedenen Namen bekannt ist: Winterdepression, Winter-Blues, Sommerdepression oder Sommer-Blues. Mehr Schlaf und Schläfrigkeit tagsüber gehören zu den Symptomen, und zu den prädisponierenden Faktoren gehören die Menge des Umgebungslichts und der Spiegel bestimmter Hormone. Für Populationen aus Regionen mit langen Winternächten ist das Risiko der Winterdepression höher, außerdem kommt diese Erkrankung häufiger bei Frauen vor. Auch Bewölkung kann zu den negativen Auswirkungen der Winterdepression beitragen. Ganz allgemein haben Menschen angesichts der kürzeren Tage im Winter weniger Energie, aber die sogenannte Winterdepression ist ein Zustand, der so schwerwiegend ist, dass er tatsächlich als eine Form der Depression eingestuft wird.

Zu den Behandlungsmethoden gegen die Winterdepression gehören die sorgfältig abgestimmte Verabreichung von Melatonin und eine Lichttherapie mit natürlichem Sonnenlicht oder einer Leuchtstofflampe. Bei der Therapie mit starkem Kunstlicht sitzt der Patient bis zu einer Stunde lang etwa einen halben Meter von der Lichtquelle entfernt, ohne sie direkt anzuschauen. Zur Simulation des Sonnenaufgangs wird diese Behandlung gewöhnlich früh morgens angewendet. Da die Nachahmung des Sonnenaufgangs sich als

besonders wirksam erwiesen hat, liegt eine Verbindung zur biologischen Uhr nahe. Bei einer anderen Form der Lichttherapie wird der unter Winterdepression leidende Patient zusätzlichem Sonnenlicht ausgesetzt. Zu diesem Zweck kann der Patient entweder mehr Zeit im Freien verbringen oder einen computergesteuerten Heliostat verwenden, mit dem er Sonnenlicht gezielt durch die Fenster eines Wohnraums leitet. Eine Lichttherapie ist aber nicht immer erfolgreich. Nur 25 bis 50 Prozent aller Patienten, bei denen eine Winterdepression diagnostiziert wird, erfahren merkliche Linderung. Einige Wissenschaftler schrieben die Winterdepression einer Fehleinstellung des Schlaf-Wach-Rhythmus der biologischen Uhr zu und behandelten sie entsprechend, indem sie am Nachmittag Melatonin verabreichen.

Sowohl die Keimzellen der Eierstöcke als auch der Hoden haben Bindestellen für Melatonin. Diese Tatsache weist auf einen direkten Zusammenhang zwischen der biologischen Uhr und der Produktion von Geschlechtszellen hin. Die Chronobiologen Konstantin Danilenko und Elena Samoilova wiesen 2007 nach, dass die Ovulation bei Frauen durch Licht beeinflusst wird. Die beiden Forscher untersuchten die stimulierende Wirkung von hellem Morgenlicht. Ihre Arbeit stützte sich auf vorherige Studien, die gezeigt hatten, dass die Menstrualzyklen kürzer werden, wenn Frauen mit abnormal langen Zyklen oder Winterdepressionen eine Lichtbehandlung bekamen. Danilenko und Samoilova untersuchten 22 Frauen entweder zuhause oder in Gesundheitszentren während zwei voneinander getrennten Menstrualzyklen. Jede Versuchsperson wurde in einem der beiden Zyklen während der Follikelphase eine Woche lang täglich kurz nach dem Aufwachen 45 Minuten lang hellem Licht ausgesetzt. Im anderen Zyklus war das Vorgehen ähnlich, aber statt hellem Licht wurde Dämmerlicht verwendet. In den Zyklen mit hellem Licht nahmen Prolaktin, das luteinisierende Hormon und das follikelstimulierende Hormon signifikant zu. Auch die im Eierstock wachsenden Follikel waren größer, und die Ovulationsrate war höher. Ein derartiger Zusammenhang zwischen Licht und Verlauf des Menstrualzyklus könnte die Erklärung sein, warum Frauen für die Winterdepression besonders anfällig sind.

Ungeachtet des grundlegenden Mechanismus ist klar, dass natürliches Tageslicht eine wichtige Rolle bei der menschlichen Fortpflanzung spielt. Sowohl historische als auch experimentelle Belege weisen klar darauf hin, dass die Reaktion des Menschen auf jahreszeitliche Veränderungen in der

Tageslänge vor der industriellen Revolution stärker ausgeprägt war. Ein Ergebnis der fortschreitenden Industrialisierung ist, dass Veränderungen unserer Lebensbedingungen diese Reaktion zunehmend unterdrücken. Dies führt uns zu der Frage, ob permanent verfügbares Kunstlicht und wiederholte Wechsel der Zeitzonen bei Fernreisen negative Auswirkungen auf unsere natürlichen Fortpflanzungsmechanismen haben? Die Winterdepression ist ein Beispiel dafür, wie unsere Gesundheit beeinträchtigt werden kann. Trotzdem kann man kaum davon ausgehen, dass Industriegesellschaften viel dagegen unternehmen werden, und noch viel weniger gegen die Verwendung künstlichen Lichts. In einem Kommentar von Natalie Angier, der 1995 in *New York Times* erschien, wurde Thomas Wehr zitiert: »Wir sind süchtig nach endlosem Sommer.«

Wenngleich ein solcher Spruch ein wenig abstrus klingt, gibt es in diesem Zusammenhang ernsthafte Themen, die unsere Aufmerksamkeit verdienen. Die natürliche Melatoninproduktion nimmt im Verlauf des Lebens ab, wodurch Schlafstörungen mit steigendem Alter häufiger vorkommen. Erhebungen ergaben, dass sich Melatonin auf den Schlaf im hohen Alter positiv auswirkt und vermutlich auch andere altersbedingte Krankheiten lindert. Bedenklich dagegen ist, dass möglicherweise ein Zusammenhang zwischen dem Melatoninspiegel und Krebs besteht. Es wurde berichtet, dass Frauen, die an Gebärmutterkrebs leiden, einen signifikant reduzierten Melatoninspiegel aufweisen. Bei Patientinnen mit Brustkrebs ist der Rückgang des Melatoninspiegels um bis zu 90 Prozent noch drastischer. Bekanntlich hat die Häufigkeit von Brustkrebs markant zugenommen, in Großbritannien zum Beispiel haben sich die Fälle seit 1940 verdreifacht. Bisher unerkannte Umweltfaktoren sind dafür zweifellos verantwortlich. Zufallsbefunde wie die Korrelation zwischen Nachtschichtarbeit und einem erhöhten Brustkrebsrisiko deuten auf einen weiteren möglichen Zusammenhang zwischen Melatoninmangel und Krebs hin. Wir müssen aber vorsichtig sein, da eine Korrelation nicht unbedingt auf Kausalfaktoren hinweist. Der Rückgang des Melatoninspiegels könnte generell das Ergebnis von Krebs und altersbedingten Krankheiten sein, und nicht umgekehrt. Trotzdem tun wir gut daran zu bedenken, dass die radikale Störung der natürlichen Lichtbedingungen im modernen Leben den Melatoninspiegel bedeutend beeinträchtigt. Dies könnte negative Auswirkungen auf die menschliche Fortpflanzungsbiologie haben und, schlimmer noch, zu degenerativen Krankheiten führen.

KAPITEL 3

Von der Paarung zur Empfängnis

Häufig sieht man in Zoos, wie schwanzlose Gibbons mit ihren spindeldürren Armen elegant von Ast zu Ast schwingen. In ihrem natürlichem Lebensraum in den Wäldern Südostasiens leben diese kleinen Menschenaffen, die meist etwa fünf Kilogramm wiegen, normalerweise in kleinen Familiengruppen. Jede Familie besteht aus einem Elternpaar sowie einigen heranwachsenden Jungtieren und besetzt ein klar abgegrenztes Revier. Bei den meisten Gibbonarten gibt das Elternpaar den Revieranspruch mit melodischen Duetten bekannt, zu denen die anderen Gruppenmitglieder den Refrain beisteuern. Die Eltern bleiben generell viele Jahre zusammen, aber ihre Nachkommen verlassen bei Erreichen der Geschlechtsreife ihre Familiengruppen, um sich selbst Partner zu suchen und ihre eigenen Reviere abzustecken.

Die schlaksigen Orang-Utans sind die größten baumlebenden Säugetiere überhaupt und bewohnen zum Teil dieselben südostasiatischen Wälder wie die Gibbons. Ihre Körpergröße ist zweifellos der Grund, warum Orang-Utans nicht über die akrobatischen Fähigkeiten der Gibbons verfügen. Stattdessen klettern sie langsam und vorsichtig in den Bäumen herum. Obwohl die Orang-Utans generell große Tiere sind, gibt es einen markanten Unterschied zwischen erwachsenen Weibchen, die etwa vierzig Kilogramm wiegen, und erwachsenen Männchen, die ein Durchschnittsgewicht um die siebzig Kilogramm haben. Dieser ausgeprägte Geschlechtsdimorphismus, wie man dieses Phänomen nennt, steht in krassem Widerspruch zu dem ungefähr identischen Körpergewicht männlicher und weiblicher Gibbons.

Orang-Utans unterscheiden sich von den Gibbons auch in ihrer sozialen Organisation stark, da sie vorwiegend alleine leben. (Ich freue mich jedes Mal wieder, wenn ich Studenten erklären darf, dass die durchschnittliche Gruppengröße anderthalb Orang-Utans beträgt.) Erwachsene Männchen leben fast ausschließlich allein. Mit dem Heranwachsen entwickeln sich beim Männchen die typischen Backenwülste, und es fängt an, mit lautstarken und dröhnenden Lauten seine Gegenwart in einem umfangreichen Revier bekanntzugeben. In der Regel umfasst sein Gebiet mehrere kleinere Reviere, die von ausgewachsenen Weibchen besetzt sind. Soziale Tendenzen zeigen nur die ausgewachsenen Weibchen, indem sie längere Zeit mit ihren Jungen zusammen bleiben, und Halbwüchsige, die manchmal buchstäblich miteinander herumhängen. Begegnungen zwischen einem ausgewachsenen Männchen und einem ausgewachsenen Weibchen, das in seinem Revier wohnt, sind meist auf kurze Begattungssequenzen beschränkt. Die halbwüchsigen Männchen gehen gewöhnlich dem ausgewachsenen Männchen eines Reviers aus dem Weg, es kann aber vorkommen, dass ein ausgewachsenes Weibchen mal eben schnell begattet wird. Da diese Begattungen oft gewaltsam erzwungen werden, wurden sie von einigen Feldforschern als »Vergewaltigungen« bezeichnet.

In Afrika fehlen die kleinen Menschenaffen, aber dafür gibt es zwei Gattungen großer Menschenaffen: Gorillas und Schimpansen. Beide leben zumindest teilweise auf dem Boden. Wie die Orang-Utans zeigen auch die Gorillas einen ausgeprägten Geschlechtsdimorphismus. Im Durchschnitt wiegt ein ausgewachsenes Weibchen etwa 90 Kilogramm, während ein ausgewachsenes Männchen mit etwa 150 Kilogramm beträchtlich schwerer ist. Männchen haben auch ein etwas anderes Fell, bei ausgewachsenen Tieren werden die Haare auf dem Rücken silbergrau, weshalb man sie auch »Silberrücken« nennt. Gorillas jedoch sind sozial anders organisiert als Orang-Utans und Gibbons. In der Regel besteht eine Gorillagruppe aus einem Silberrückenmännchen und mehreren ausgewachsenen Weibchen. Im Grunde ist eine Gorillagruppe also eine Art »Harem«, obwohl auch fast ausgewachsene Männchen (»Schwarzrücken«) und gelegentlich weitere Silberrücken dazugehören können. Innerhalb einer Gruppe sind Kopulationen vorwiegend dem Silberrückenmännchen vorbehalten.

Die Schimpansen, die andere Gattung der afrikanischen Menschenaffen, unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht von den Gorillas. Zunächst gibt es

zwischen den Geschlechtern nur einen moderaten Unterschied bei der Körpergröße. Ausgewachsene Weibchen wiegen etwa 35 Kilogramm und ausgewachsene Männchen etwa 40. Davon abgesehen, gibt es keine großen Unterschiede zwischen Männchen und Weibchen. Wichtiger noch ist, dass sich das Sozialsystem der Schimpansen stark von allen anderen Menschenaffen unterscheidet. Das System ist sogar so kompliziert, dass jahrelange Feldforschungen notwendig waren, um die verschiedenen Ebenen der sozialen Organisation zu enthüllen. In freier Wildbahn sieht man Schimpansen sehr oft in kleinen Gruppen mit etwa sechs Tieren unterschiedlicher Zusammensetzung. Auf den ersten Blick schien das Sozialleben der Schimpansen deshalb entspannt und flexibel zu sein. Schließlich entdeckte man jedoch, dass die Mitglieder zeitweiliger Kleingruppen letztlich einer großen sozialen Einheit von bis zu 80 Mitgliedern — darunter Erwachsene beider Geschlechter — angehören. Die oft zitierte Flexibilität existiert nur innerhalb der sozialen Einheit. Eine solche Einheit von Schimpansen sieht man nur selten als geschlossene Gruppe, sie stellt aber eine wichtige höhere Ebene der sozialen Organisation dar. Die sozialen Einheiten, deren Konflikte untereinander einen tödlichen Ausgang nehmen können, sind gebietsmäßig organisiert. Die Einheit ist im Allgemeinen sexuell promiskuitiv, jedes paarungswillige Weibchen wird meist von mehreren Männchen begattet. Aber auch hier wird es kompliziert. Manchmal geht ein einzelnes Männchen mit einem Weibchen auf private »Safari«, womit Promiskuität vermieden wird. Zudem gibt es bedeutende Unterschiede zwischen den Schimpansen und ihren engen Verwandten, den Bonobos, die früher Zwergschimpansen genannt wurden, obwohl sie eigentlich kaum kleiner und nur etwas schlanker sind.

Dieser kurze Abriss der Sozialmuster der Menschenaffen — unserer nächsten zoologischen Verwandten — bringt zwei wichtige Punkte zum Vorschein. Zunächst hat jede Menschenaffengattung ein eigenes Paarungssystem — Monogamie bei den Gibbons, Harems bei den Gorillas und den Orang-Utans (allerdings leben letztere verteilt und nicht in Gruppen wie die Gorillas) und promiskuitive Gruppen aus Männchen und Weibchen bei den Schimpansen. Der zweite wichtige Punkt ist, dass die Sozialsysteme auch innerhalb einer Gruppe von relativ eng verwandten Primaten wie den Menschenaffen stark voneinander abweichen können.

Obwohl die Primatenarten starke Unterschiede in ihrer sozialen Organisation aufweisen, können wir die eben beschriebenen Menschenaffen in drei

grundlegende Kategorien einteilen: monogam, polygyn (oder im Harem lebend) und promiskuitiv. Im Prinzip könnte man noch eine vierte Kategorie für die Primaten nennen — sogenannte polyandrische Gruppen mit einem einzelnen ausgewachsenen Weibchen und mehreren ausgewachsenen Männchen und Jungtieren. Aber dieser vierte Typ der sozialen Organisation ist bei Primaten extrem selten.

Feldforschungen zeigten, dass jede Primatenart, die in der Gruppe lebt, ein bestimmtes Sozialsystem hat: Paare, Harems oder Gruppen mit mehreren Männchen. Obwohl einige Arten eine gewisse Variationsbreite aufweisen, gewöhnlich zwischen Harems und Gruppen mit mehreren Männchen, ist das Muster bei den meisten Primatenarten ziemlich durchgängig. Daher liegt der Schluss nahe, dass artenspezifische Sozialmuster eine genetische Basis haben. In der Gefangenschaft zeigen Primaten normalerweise dasselbe Verhaltensmuster wie in ihrer natürlichen Umgebung. Bei Gibbons zum Beispiel gelingt die Zucht in Zoos nur, wenn die ausgewachsenen Tiere als Paar zusammen mit den heranwachsenden Jungtieren gehalten werden. Andererseits ergaben Feldforschungen, dass eng verwandte Arten — die sich genetisch selbstverständlich sehr ähneln — ganz andere Sozialmuster aufweisen können. In Madagaskar beispielsweise leben die Mongozmakis in monogamen Gruppen, während ihre engen Verwandten, die Braunen Makis, Gruppen mit mehreren Männchen bilden. In ganz ähnlicher Weise leben die afrikanischen Steppenpaviane in Gruppen mit mehreren Männchen, während die Mantelpaviane Haremgruppen bilden. Diese Beispiele verstärken den Eindruck, dass sich relativ rasch neue Formen der Sozialorganisation entwickeln können.

Von diesem allgemeinen Hintergrund ausgehend, können wir jetzt die soziale Organisation und Wahl des Fortpflanzungspartners beim Menschen unter die Lupe nehmen. Kulturelle Einflüsse sind so stark, dass es keineswegs offensichtlich ist, was bei unserer Partnerwahl »natürlich« ist. Obwohl wir allgemeine Prinzipien aus Vergleichen mit anderen Primatenarten als Informationsquelle verwenden können, dürfen wir nicht vergessen, dass die soziale Organisation flexibel ist und sich rasch verändern kann.

WIE ALLE ANDEREN TAGAKTIVEN PRIMATEN SIND MENSCHEN gesellig und leben in erkennbaren Gruppen. Die heutige menschliche Gesellschaft ist freilich viel komplizierter als die anderer Primaten. Diese Komplexität ist jedoch zum großen Teil kaum älter als zehntausend Jahre, da sie erst nach der Entstehung sesshafter Gemeinschaften mit domestizierten Pflanzen und Tieren entstand. In mindestens 99 Prozent der Zeit, seit sich die menschliche Stammlinie von den Schimpansen trennte, lebten wir Menschen als wandernde Jäger und Sammler in relativ kleinen Gruppen.

Versuchen wir die menschliche Sozialorganisation in die Hauptkategorien einzureihen, die für nichtmenschliche Primaten gelten, stoßen wir sofort auf ein Problem. Unsere heutige Gesellschaft kann nicht auf eine einzelne Kategorie beschränkt werden. In ihrer Gesamtheit zeigt die menschliche Gesellschaft fast alle grundlegenden Muster: Einige sind monogam, andere polygam, während einige sogar polyandrisch sind. Keine menschliche Gesellschaft ist jedoch wirklich promiskuitiv wie die Schimpansen. Beim Menschen ist die Sozialorganisation dennoch außerordentlich flexibel. Die Entstehung dieser Flexibilität — die eine Abschwächung der biologischen Zwänge widerspiegelt — war zweifellos ein Kennzeichen unserer Evolution. In ihrem 1951 erschienenen Klassiker *Patterns of Sexual Behavior* (*Muster des Sexualverhaltens*) gaben die Fortpflanzungsbiologen Clellan Ford und Frank Beach einen Überblick über fast zweihundert menschliche Gesellschaften. Sie kamen zu dem Schluss, dass die Polygynie überwiegt, da sie bei 75 Prozent ihrer Stichprobe vorkam. Wir können jedoch nicht behaupten, dass die Urvorfahren des Menschen zwangsläufig polygam waren. Auch in »polygynen« Gesellschaften kommen monogame Ehen häufig als Notlösung vor, da viele Männer einfach nicht die Ressourcen besitzen, um mehrere Frauen zu haben. Einige Autoren, darunter Desmond Morris in *Der nackte Affe*, kamen zu dem Schluss, dass die Monogamie dominiert, weil die Anzahl ihrer Vertreter so groß ist. Unterm Strich gibt es keine überzeugenden Hinweise einer genetischen Basis für Monogamie oder Polygamie beim Menschen.

Vergleiche zwischen Menschen und unseren nächsten zoologischen Verwandten, den Menschenaffen, liefern ebenfalls keine klare Antwort. Wie bereits erklärt, weisen Menschenaffen alle grundlegenden Muster auf, die generell bei Primaten erkennbar sind. Da Schimpansen unter den Menschenaffen mit dem Menschen anscheinend am engsten verwandt sind, wird oft angenommen, dass der Ausgangspunkt der menschlichen Entwicklung

ein ähnlich promiskuitives Sozialsystem mit Gruppen mit mehreren Männern war. Aber diese Schlussfolgerung ist ein Prachtbeispiel für eine Denkweise mit »unveränderlichen Vorfahren«, bei der eine lebende Art als Modell für den Ursprung einer anderen Art dient. Wie oben dargelegt, entwickeln sich soziale Muster rasch, und es können leicht große Unterschiede zwischen eng verwandten Primatenarten entstehen. Die große Variation unter den Menschenaffen unterstreicht diesen Punkt. Folglich dürfen wir nicht einfach davon ausgehen, dass sich der gemeinsame Vorfahre des Schimpansen und des Menschen wie ein heutiger Schimpanse verhielt.

Unter den nicht-menschlichen Primaten sind in Paaren lebende Sozialgruppen in der Minderheit, da sie nur bei 15 Prozent der Arten vorkommen. Die übrigen 85 Prozent der Primatenarten leben in Gruppen, die aus mehreren Weibchen und einem oder mehreren ausgewachsenen Männchen bestehen. Mit wenigen Ausnahmen (zum Beispiel Löwen und andere Raubtiere) sind gruppenlebende Säugetiere, die nicht zu den Primaten gehören, auch meist polygyn. Sie leben in Haremgruppen mit einem einzelnen erwachsenen Männchen, während überzählige Männchen oft sogenannte Junggesellengruppen bilden. Die Paarbildung ist noch seltener als bei den Primaten und kommt nur bei drei Prozent anderer Säugetierarten vor. Dagegen leben Vögel mehrheitlich — mit etwa 90 Prozent der Arten — als Paar zusammen.

Warum leben Vögel vorwiegend als Paare, während dies nur bei wenigen Säugetieren der Fall ist? Die wahrscheinlichste Erklärung ist, dass bei Vögeln die Versorgung des Nachwuchses aufgeteilt werden muss. Bei als Paar lebenden Vögeln hilft das Männchen bei der Brut und Fütterung der Jungtiere, so dass das Weibchen das Nest zur Futtersuche verlassen kann. Bei Säugetieren gibt es keine solchen Zwänge. Bei Beuteltieren und Plazenta-Säugetieren entwickeln sich die Jungtiere bis zur Geburt im Mutterleib, was dem Schlüpfen der Vögel entspricht. Nach der Geburt nutzt eine Säugetiermutter ihre eigenen körperlichen Ressourcen, um ihre Jungen zu säugen, und braucht deshalb nicht unbedingt auf Futtersuche zu gehen. Aus diesem Grund sind männliche Säugetiere meist nicht zur Versorgung des Nachwuchses gezwungen. In der Tat leisten die Männchen bei vielen Säugetierarten keinen direkten Beitrag zur Aufzucht der Jungen. Der Vergleich mit Vögeln lässt vermuten, dass das seltene Vorkommen der Monogamie bei Säugetieren mit der Versorgung des Nachwuchses durch den Vater zu tun haben könnte. Die Verhaltensbiologin Devra Kleiman wies nach, dass dies

bei mehreren Primatenarten und verschiedenen anderen Säugetieren (besonders in der Familie der Hundartigen) tatsächlich zutrifft. Bemerkenswert ist, dass menschliche Babys im Vergleich zu anderen Primaten besonders hilflos sind und daher eine intensive Versorgung durch die Eltern benötigen. Wie ich in Kapitel 5 erklären werde, stellt diese Hilflosigkeit eine Sonderentwicklung innerhalb der menschlichen Evolution dar. Das Ergebnis davon ist, dass im Unterschied zu anderen Primaten für die Entwicklung unserer Babys soziale Unterstützung unentbehrlich ist.

ES WÄRE NAHELIEGEND ANZUNEHMEN, dass das typische Sozialmuster direkt dem Paarungsverhalten entspricht. Bei einer Art mit Paarstruktur zum Beispiel könnte man leicht glauben, dass das ausgewachsene Männchen zwangsläufig der Vater sämtlicher Nachkommen ist. Anders gesagt, könnte man meinen, dass eine soziale Organisation mit Paarstruktur und ein strikt monogames Paarungssystem die beiden Seiten derselben Medaille wären. Schauen wir uns beispielsweise die Unmengen von Vogelarten mit Paarstruktur an, die traditionell als strikt monogam galten. Selbst ausgiebige Beobachtungen engagierter Vogelkundler brachten keine Abweichung von der strengen Beschränkung auf den Partner zutage. Seit der Einführung DNS-basierter Vaterschaftstests jedoch hat sich alles verändert. Mit großer Überraschung stellte man fest, dass bei vielen Vogelarten das Männchen nicht immer der Vater aller Nachkommen im Nest war. Im Durchschnitt gab es in der Hälfte der Nester Nachkommen, die aus Kopulationen mit einem anderen Partner hervorgingen. Das bringt die Frage auf, warum Vogelkundler diese außerpartnerschaftlichen Kopulationen nie durch ihren Feldstecher beobachten konnten. Die Antwort ist, dass solche Kopulationen sehr rasch und diskret stattfinden. Für das Männchen des Paares sind sie vermutlich genauso unsichtbar wie für den eifrigen Ornithologen.

Sofort eilten die Theoretiker herbei und lieferten eine Erklärung für diese aufregende Entdeckung und kramten dabei unbedacht veraltete Ausdrücke für die menschliche Untreue wie »Hahnrei« hervor. Das englische Wort »cuckold«, das Hahnrei oder betrogener Ehemann bedeutet, stammt ursprünglich von dem französischen Wort für Kuckuck. Ironischerweise wird dieses Wort heutzutage für Vögel verwendet, bei denen ein Männchen sich um Jungtiere kümmert, die nicht seine eigenen sind. Die landläufige Erklä-

rung für diese Erscheinung ist, dass es für ein Weibchen genetisch gesehen vorteilhaft ist, verschiedene Männchen als Vater ihrer Jungtiere zu haben. Deshalb schließt es sich mit einem Männchen zu einem Paar zusammen, um die Versorgung der Jungtiere zu garantieren, während es nebenbei mit anderen Männchen kopuliert, um die genetische Variabilität ihrer Nachkommen zu steigern. Es liegt im Interesse des Weibchens, seinem Partner solche Kopulationen mit anderen Männchen zu verheimlichen. Wäre ihrem Partner klar, wie groß die Gefahr ist, nicht der Vater zu sein, würde er vermutlich das Nest verlassen. So lautet jedenfalls die Begründung.

Diese Erklärung basiert auf der Annahme, dass es vor allem im Interesse des Männchens liegt, der Vater aller Nachkommen in seinem Nest zu sein. Dementsprechend muss man bei jeglichem Mechanismus, der die Wahrscheinlichkeit einer Kopulation außerhalb der Partnerschaft reduziert, von starkem Selektionsdruck ausgehen. Es ist jedoch auch davon auszugehen, dass sich jedes als Paar lebende Männchen Gelegenheiten aussucht, um mit Weibchen benachbarter Paare zu kopulieren. Wie für die Weibchen ist es sicherlich auch für ein Männchen genetisch vorteilhaft, Vater von Jungtieren in den Nestern anderer Paare zu werden. Vielleicht gibt es einen Ausgleich zwischen dem Interesse des Männchens, seine Rolle als Vater der Jungtiere in seinem eigenen Nest zu verteidigen, und den Vorteilen, Vater von Jungtieren in anderen Nestern zu sein. Auch die Männchen können sich verschiedene Möglichkeiten offen halten. Auf alle Fälle hat sich das Paarungsverhalten bei als Paar lebenden Vögeln als viel verwickelter erwiesen, als man ursprünglich meinte.

Die Muster der sozialen Organisation und das Paarungsverhalten sind bei Vögeln also nicht einfach die beiden Seiten derselben Medaille. Zumindest bis zu einem gewissen Grad können sie unabhängig voneinander variieren. Diese unabhängige Variation gilt auch für Säugetiere und Primaten. Bei einigen Säugetierarten wurden DNS-basierte Tests durchgeführt, um die Vaterschaft zu bestimmen, und dabei kamen ähnliche Ergebnisse zum Vorschein. Verglichen mit dem breiten Spektrum bei Vögeln gibt es bisher nur wenige genetische Vaterschaftsuntersuchungen bei Säugetieren, die als Paar zusammenleben, aber Nachweise für außerpartnerschaftliche Kopulationen werden sicherlich auftauchen. Ein Beispiel ist die Veröffentlichung des Verhaltensbiologen Jason Munshi-South, der 2007 die Befunde einer DNS-basierten Untersuchung einer in Sabah (Borneo) als Paar lebenden Spitzhörn-

chenart publizierte. Er entdeckte eine hohe Quote außerehehlcher Vaterschaften. Ähnliche Ergebnisse erhielt man auch bei bestimmten Primaten, die als Paar zusammenleben — beispielsweise den nachtaktiven Gabelstreifenmakis und den Katzenmakis in Madagaskar. Selbst bei den Gibbons, die als Musterexemplare für die Monogamie bei Primaten angesehen werden, beobachtete man außerehehlchliche Kopulationen in freier Wildbahn.

Die sozialen Muster und das Paarungsverhalten können sich bei Primaten auch stark unterscheiden. Der Larvensifaka, ein tagaktiver madagassischer Lemur, lebt normalerweise in kleinen Gruppen mit einem halben Dutzend Erwachsener beider Geschlechter. Das Verhältnis von Männchen und Weibchen differiert zwischen den Gruppen jedoch stark. Wie bei den meisten Lemuren sind Kopulationen beim Larvensifaka strikt auf wenige Wochen im Jahr beschränkt. Die wegweisende Feldforschung der Anthropologin Alison Richard zeigte, dass die Zustände während der Paarungszeit chaotisch sind. Indem sie von oftmals schweren Kämpfen während der Paarungszeit berichtete, bestätigte sie frühere Berichte. Außerdem stellte sie fest, dass die Paarung in der Regel nicht innerhalb der Gruppe, sondern außerhalb stattfand. Eine Neuorganisation der sozialen Gruppen war häufig die Folge. Demzufolge bestimmt nicht die Gruppenstruktur das Paarungsverhalten, sondern hat offenbar andere Funktionen. In der Tat wiesen Feldstudien bei Primaten darauf hin, dass die soziale Organisation im Allgemeinen mit der Nahrungssuche zusammenhängt. Larvensifakas etwa leben fast das ganze Jahr in stabilen Fressgruppen zusammen, die während der kurzen Paarungszeit auseinander gerissen werden.

DIE UNTERSCHIEDUNG ZWISCHEN SOZIALER ORGANISATION UND PAARUNGSVERHALTEN gilt auch für den Menschen. Obwohl außerehehlcher Sex freilich vorkommt, geschieht er bei weitem nicht so häufig, wie uns Darstellungen in den Medien oder irreführende Statistiken weismachen wollen. Verschiedene Untersuchungen langjähriger Partnerschaften, beispielsweise die 2004 veröffentlichte Umfrage bei 400 Studenten beider Geschlechter des Biologen Leigh Simmons, zeigten, dass jede vierte Person irgendwann fremdgeht. Gut daran ist, dass drei Viertel der Partner langfristig treu bleiben. Überdies beträgt die angebliche Durchschnittsquote der außer-

partnerschaftlichen Vaterschaften nur etwa zwei Prozent — eine Quote, die Alan Dixson in seinem 2009 erschienenen Buch *Sexual Selection and the Origins of Human Mating Systems* bestätigte. Mit anderen Worten führt beim Menschen eine relative niedrige Quote außerpartnerschaftlicher Kopulationen zu einer noch niedrigeren Quote außerpartnerschaftlicher Vaterschaften. Zwar gaben einige Forscher sogar eine Quote von zwölf Prozent außerpartnerschaftlicher Vaterschaften an, doch sind solche Werte außergewöhnlich. Solche Märchen über genetische Untersuchungen bei sozial benachteiligten Bevölkerungsgruppen, die »nicht veröffentlicht werden konnten«, weil sie enthüllt hätten, dass die Hälfte der Kinder nicht die Nachkommen ihrer vermeintlichen Väter waren, können wir getrost vergessen. Tatsache ist, dass die Menschen in den bisher untersuchten Gesellschaften viel monogamer waren als die meisten Vogelarten, die erforscht wurden.

Seltsamerweise halten sich zwei unvereinbare Vorstellungen: Einerseits gilt die Monogamie als Standard für das menschliche Paarungsverhalten, und außerdem heißt es, dass Männer weniger treu als Frauen seien. Angeblich schrieb die Amerikanerin Mrs. Amos Pinchot nach einem Traum den folgenden Knittelvers nieder: »Hogamus, higamus, men are polygamous; higamus, hogamus, women monogamous.« (Auf Deutsch sinngemäß: »Hohogam, hohigam Männer sind polygam, hohigam, hohogam, Frauen sind monogam.«) Ähnlich zu verstehen ist die Bemerkung des amerikanischen Journalisten Henry L. Mencken: »Die einzigen wirklich glücklichen Menschen sind verheiratete Frauen und ledige Männer.« Aber diese Auffassung stellt uns vor ein Problem: Wo finden polygame Männer ihre zusätzlichen Partner, wenn Frauen normalerweise monogam sind? Dieses Rätsel wird noch durch das Ergebnis zahlreicher Erhebungen verstärkt, laut dem Männer mehr Geschlechtspartner haben als Frauen. Wenn Männer beispielsweise durchschnittlich zehn Geschlechtspartner angeben und Frauen nur vier, wo kommen dann die sechs zusätzlichen Partnerinnen pro Mann her? Häufig wurde als Erklärung angeführt, dass — obwohl solche Erhebungen immer anonym sein sollten — Prahlerei bei Männern dazu führt, bei der Menge der Geschlechtspartner zu übertreiben, während der Anstand Frauen dazu bringt, zurückhaltend zu sein. Einfache Mathematik zeigt uns, dass es in einer monogamen Gesellschaft nur zwei Möglichkeiten gibt: Entweder sind Frauen und Männer gleich oft untreu, oder eine kleine Anzahl sehr promiskuitiver Frauen muss den Bedürfnissen vieler untreuer Männer gerecht

werden. Eine neuere Studie ergab in der Tat, dass Prostituierte für die enorme Menge weiblicher Partner verantwortlich sind. Anscheinend sind Männer zu schüchtern, um zuzugeben, dass sie für die zusätzlichen Freuden bezahlen.

Dies bringt uns zu einer grundlegenden evolutionsbiologischen Frage: Sind Menschen biologisch auf ein bestimmtes Muster der sozialen Organisation und Paarung ausgerichtet? Kulturübergreifende Hinweise deuten darauf hin, dass wir als Spezies in beiderlei Hinsicht stark variieren. Hinweise aus Vergleichen mit nichtmenschlichen Primaten sind ebenfalls nicht aufschlussreich. Trotz dieser Unklarheit machen es sich viele Autoren zu leicht. Sie betrachten einfach den Schimpansen als »unveränderlichen Vorfahren« für die Evolution des Menschen und kommen zu dem Schluss, dass am Anfang unserer Entwicklung promiskuitive Gruppen mit mehreren Männchen standen. Andererseits ist es genauso vertretbar zu behaupten, dass die existierenden Beweise so schwach seien, dass wir keine sicheren Schlüsse aus unserer Abstammung ziehen können. Viele glauben sogar, dass es gar keine biologische Basis für die soziale Organisation und das Paarungsverhalten des Menschen gibt, sondern dass alles durch gesellschaftliche Konventionen geregelt wird. Gemäß dieser Betrachtungsweise ist die monogame Ehe ein rein soziales Konstrukt ohne jede biologische Veranlagung. Wie sich zeigen wird, sind beide extremen Standpunkte unhaltbar.

Aus der unterschiedlichen Körpergröße von Männchen und Weibchen können wir einen wichtigen Hinweis auf die soziale Organisation einer Spezies bekommen. Bei gewissen Primatenarten sind Männchen und Weibchen praktisch gleich groß (Monomorphismus), während bei anderen ein signifikanter Unterschied besteht (Dimorphismus), wobei Männchen meist größer und schwerer sind. Von entscheidender Bedeutung ist die Tatsache, dass Primaten, die als Paar zusammen leben, normalerweise monomorph sind. Bei einem durchschnittlichen Unterschied von weniger als 15 Prozent haben Männchen und Weibchen ungefähr das gleiche Körpergewicht. Bei Arten, die in Harems oder Gruppen mit mehreren Männchen leben, kommt der Geschlechtsdimorphismus dagegen häufig vor, obwohl das Ausmaß stark variiert. In Extremfällen, beispielsweise beim afrikanischen Mandrill, sind die Männchen mehr als doppelt so schwer wie die Weibchen. Beim Menschen liegt ein schwach ausgeprägter Geschlechtsdimorphismus vor. Weltweite Durchschnittswerte zeigen, dass Männer in der Regel etwas über 20

Prozent mehr wiegen als Frauen. Der tatsächliche Grad des Geschlechtsdimorphismus ist eigentlich etwas höher, weil Fettablagerungen bei Frauen einen deutlich größeren Anteil des Körpergewichts ausmachen. Bei erwachsenen Frauen in guter Verfassung macht Fett etwa ein Viertel des Körpergewichts aus, bei Männern aber nur ein Zehntel. Dieser ausgeprägte Unterschied zwischen Mann und Frau in puncto Fett ist unter Primaten einzigartig. Außerdem unterscheiden sich Männer und Frauen stark im Erscheinungsbild, da das Fett unterschiedlich verteilt ist. Dieser zweifache Geschlechtsdimorphismus in Größe und Form des Körpers liefert den Hinweis, dass Menschen biologisch nicht darauf ausgerichtet sind, in Paarstellungen zusammenzuleben.

Das Thema Inzest darf bei der Diskussion menschlicher Paarung nicht fehlen. Inzest (auch Blutschande genannt) wird gewöhnlich als »Geschlechtsverkehr zwischen engen Verwandten« definiert. Wichtig dabei ist, dass Geschlechtsverkehr eng verwandter Personen im Falle der Inzucht schlimme Folgen haben kann. In sämtlichen menschlichen Gesellschaften ist der Inzest tabuisiert, aber die konkreten Verwandtschaftsgrade, die vom sexuellen Verkehr ausgeschlossen sind, unterscheiden sich von Gesellschaft zu Gesellschaft. Geschlechtsverkehr zwischen Eltern und Kindern oder zwischen Geschwistern ist in der Regel generell untersagt. Ob Onkel, Tanten und insbesondere Cousinen als zulässige Partner angesehen werden, hängt jedoch von der jeweiligen Kultur ab. Bei der Ehe zwischen Cousinen ersten Grades gingen die Griechen und Römer beispielsweise verschiedene Wege. Während die Athener und Spartaner ihr keine Steine in den Weg legten, waren die Römer vehement dagegen. Als Protestant durfte Charles Darwin seine Cousine ersten Grades Emma Wedgwood heiraten, ohne sich um die Sondererlaubnis zu kümmern, die er bei den Katholiken traditionell hätte einholen müssen. Später allerdings machte sich Darwin selbst Sorgen wegen der möglichen Gefahren, die eine Ehe zwischen nahen Verwandten mit sich bringen kann.

Bedeutende Denker wie Sigmund Freud und Claude Lévi-Strauss trugen zur Bildung des Mythos bei, dass das Inzesttabu rein kulturell bedingt wäre und nur beim Menschen vorkäme. Sie gingen davon aus, dass sich andere Lebewesen wahllos paaren, und nur der Mensch von einem sozial vorge-

schrieben Tabu profitiert. Die Vorstellung wahlloser Paarungen in der Tierwelt ist jedoch schlichtweg falsch. Inzucht führt zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit seltener genetischer Entwicklungen, die oftmals schädlich sind. Wir können daher recht zuverlässig davon ausgehen, dass die natürliche Selektion Mechanismen begünstigt, die Paarungen zwischen eng verwandten Individuen verhindern. Und so ist es auch. Bei Säugetieren wird Inzucht hauptsächlich dadurch verhindert, dass sich Individuen von ihrem Geburtsort entfernen. Das funktioniert am besten, wenn nur die Männchen oder nur die Weibchen abwandern. Täten dies Vertreter beider Geschlechter, könnten verwandte Männchen und Weibchen per Zufall wieder zusammen treffen. Die allgemeine Regel bei Säugetieren ist, dass Männchen weiterziehen, während Weibchen sich nicht vom Fleck rühren. Das entspricht der Erwartung, dass diejenigen Tiere weiterziehen sollten, die relativ wenig zur Versorgung der Nachkommen beitragen. Ein Ergebnis dieser allgemeinen Regel ist, dass die Weibchen innerhalb einer Gruppe häufig miteinander verwandt sind und den sozialen Kern bilden.

Bei Säugetieren einschließlich der Primaten sind es ganz offensichtlich die Weibchen, die den Hauptbeitrag zur Versorgung der Jungen leisten und ihre Familie meist nicht verlassen. Viele nachtaktive Primaten entsprechen diesem Muster, und dasselbe gilt für verschiedene Affen — beispielsweise Makaken, die meisten Pavianarten und schwarz-weiße Stummelaffen. Langzeitfeldstudien brachten bei einigen Affen und Menschenaffen nach gewisser Zeit ein entgegengesetztes Muster zum Vorschein, bei dem die Männchen in ihrer Gruppe bleiben und die Weibchen weiterziehen. Das gilt beispielweise für Schimpansen, rote Stummelaffen und Klammeraffen. Für diese Ausnahmen gibt es bisher keine überzeugende Erklärung, aber das Ergebnis ist, dass statt der Weibchen die Männchen den Kern der Sozialgruppe bilden. Der Effekt — die Vermeidung der Inzucht — ist auf jeden Fall derselbe. Bei Primaten, die in Paaren zusammenleben, läuft es anders. Bei ihnen müssen sowohl die Männchen als auch die Weibchen den Geburtsort verlassen, wenn sie geschlechtsreif werden. In diesem Fall können Tiere, die eine Gruppe verlassen, möglicherweise anderswo wieder aufeinander treffen. Das kann vermieden werden, wenn sich die weiterziehenden Geschwister gegenseitig aus dem Weg gehen, oder wenn die Männchen weiter weg als die Weibchen ziehen. Wahrscheinlich kommen unter natürlichen Bedingungen beide Mechanismen vor.

Interessanterweise ist es bei menschlichen Gesellschaften normal, dass Frauen außerhalb der Gruppe heiraten, während Männer in ihrer Gruppe bleiben. Einige Autoren deuten die Abwanderung der Frauen als universelles Kulturphänomen. Dies ist zweifellos übertrieben, aber geistreiche genetische Analysen bestätigten, dass die Männer während der Evolution unserer Spezies viel häufiger als die Frauen in ihrer Stammesgruppe blieben. Dieser Befund ist aus zwei Gründen wichtig. Erstens sollte die vorwiegende Abwanderung der Frauen für eine geringere Inzucht sorgen, und zweitens deuten Beobachtungen nicht menschlicher Primaten darauf hin, dass bei einer Art, die biologisch auf Monogamie ausgerichtet ist, keine ausgeprägte Tendenz weiblicher Abwanderung zu erkennen ist.

Die Vermeidung der Inzucht ist sicherlich kein rein menschliches Phänomen, aber eindeutige Inzesttabus, die von Gesellschaft zu Gesellschaft verschieden sind, sind einzigartig. Wozu brauchen wir sie? Ohne Zweifel stammen wir von Vorfahren ab, die natürliche Mechanismen zur Verhinderung der Paarung von nahen Verwandten hatten. Ist überhaupt vorstellbar, dass diese Mechanismen in einem frühen Stadium der Entwicklung des Menschen verschwanden und anschließend durch kulturelle Inzesttabus ersetzt werden mussten? Wahrscheinlicher ist, dass die Inzesttabus die natürlichen Mechanismen zur Vermeidung der Inzucht nicht ersetzt, sondern verstärkt haben. Wenn die ersten Menschen aus irgendeinem Grund nicht so leicht ihre Heimat verlassen konnten, um Inzucht zu vermeiden, brauchten sie womöglich einen Zusatzmechanismus, um die Paarung zwischen nahen Verwandten zu verhindern. Eine naheliegende Möglichkeit ist, dass Männer und Frauen, die zusammen aufwachsen, bei der Partnerwahl keine gegenseitige Anziehung spüren. In der Tat gibt es Hinweise, dass beim Menschen ein solcher »Kibbuzeffekt« existiert. Im Hinblick auf die Paarung ist es wohl so, dass allzu große Vertrautheit keine sexuelle Attraktion erregt. Möglicherweise wurde eine kulturelle Verstärkung zur Vermeidung von Inzucht nötig, weil die soziale Organisation und das Paarungsverhalten beim Menschen viel flexibler als bei anderen Primaten wurden. Nach dieser Schlussbemerkung können wir jetzt zur Erkundung der biologischen Basis menschlicher Paarungsmuster zurückkehren.

BEIM PAARUNGSVERHALTEN MÜSSEN WIR DIE MÖGLICHKEIT IM AUGE BEHALTEN, dass es zu einem Wettbewerb zwischen Spermien verschiedener Männchen kommen kann. In dieser Hinsicht unterscheiden sich Primatengruppen mit nur einem ausgewachsenen Männchen (entweder Paare oder Harems) grundsätzlich von denen mit mehreren ausgewachsenen Männchen. Das Männchen in einer Gruppe mit nur einem Männchen hat bei der Paarung keine direkte Konkurrenz. In einer Gruppe mit mehreren Männchen ist die Paarung dagegen bis zu einem gewissen Grad promiskuitiv, wodurch eine direkte Konkurrenz zwischen Männchen und ihren Spermien wahrscheinlich wird. Selbstverständlich gibt es aber einen Vorbehalt: Wenn Weibchen in Gruppen mit einem Männchen sich mit Männchen außerhalb ihrer Gruppe paaren, besteht zwischen den Männchen doch eine gewisse Konkurrenz. Nehmen wir aber der Einfachheit halber an, dass direkte Konkurrenz unter Männchen in Gruppen mit einem Männchen keine Rolle spielt, in Gruppen mit mehreren Männchen, in denen die erwachsenen Männchen sich bei der Paarung mit ansässigen Weibchen gegenseitig auszubooten versuchen, jedoch an der Tagesordnung ist oder sogar vorherrscht. Die ausgewachsenen Männchen bilden oft eine relativ stabile Rangordnung, die durch Auseinandersetzungen etabliert und aufrechterhalten werden. Im Allgemeinen wird akzeptiert, dass höherrangige Männchen leichteren Zugang zu paarungswilligen Weibchen haben. Dennoch kommt es öfters vor, dass zwei oder mehr Männchen dasselbe Weibchen während eines Eierstockzyklus begatten.

Damit sind wir beim Thema der Spermienkonkurrenz gelandet, das uns neue Vorstellungen eröffnet, inwieweit der Mensch auf ein bestimmtes Paarungsverhalten ausgerichtet ist. Die Argumentation ist ganz einfach. Aktive Hoden sind aufwendige Organe, die etwa so viel Energie brauchen wie ein Stück Hirngewebe derselben Größe. (Eine befreundete Feministin nennt den Hoden abschätzig »das männliche Gehirn«. Das ist nicht ganz aus der Luft gegriffen. Die berühmte Zeichnung *Die Kopulation des Homo sapiens* von Leonardo da Vinci zeigt eine imaginäre Röhre, die das Gehirn eines Manns direkt mit seinem Penis verbindet.) Wegen ihres hohen Energieverbrauchs ist die Größe der Hoden durch die natürliche Selektion so eingeschränkt, damit sie gerade ausreicht, um ihre Funktion zu erfüllen. Bei Männchen, die in einer Gruppe mit mehreren Männchen leben, begünstigt die natürliche Selektion vermutlich eine erhöhte Spermienproduktion, da-

mit die Erfolgswahrscheinlichkeit bei der Paarung maximiert wird. Daher kann man davon ausgehen, dass diese Männchen große Hoden haben. Bei Männchen, die in Gruppen mit nur einem Männchen leben, gibt es dagegen wenig Spermienkonkurrenz, daher dürften sie relative kleine Hoden haben. Diese Vermutungen können wir durch Vergleiche zwischen Arten überprüfen, wobei natürlich wichtig ist, den Einfluss der Körpergröße zu berücksichtigen. Bei ansonsten gleichen Bedingungen sollten die Männchen größerer Arten auch generell größere Hoden haben, und diese Tendenz muss bei den Analysen berücksichtigt werden.

Unter anderem führten die Zoologen Alan Dixson und Alexander Harcourt mehrere breit angelegte Untersuchungen zur Hodengröße bei Primaten und anderen Säugetieren durch. Ihre Ergebnisse bestätigten die vermutete Beziehung zwischen Hodengröße und Paarungssystem. Bei Affen und Menschenaffen beispielsweise haben alle Arten, die in Gruppen mit mehreren Männchen leben — darunter Makaken, Paviane und Schimpansen — große Hoden im Verhältnis zur Körpergröße. Männchen, die in Gruppen mit einem Männchen leben, haben dagegen normalerweise relativ kleine Hoden. Diese Regel gilt nicht nur für im Paar lebende Arten wie Wollmakis, Krallenäffchen, Nachtaffen und Gibbons, sondern auch für Primaten mit Harems wie verschiedene Schlankaffen und Gorillas.

Beim Menschen sind die Hoden relativ klein. Männer haben weit kleinere Hoden als Schimpansen, obwohl unser Körpergewicht etwas höher ist. Ein menschlicher Hoden ist etwa so groß wie eine Walnuss, während der Hoden eines Schimpansen etwa der Größe eines großen Hühnereis entspricht. Die geringe Größe unserer Hoden steht im direkten Widerspruch zu jeglicher Vermutung, dass das menschliche Sozial- und Paarungssystem wie bei Schimpansen biologisch auf Promiskuität ausgerichtet ist. Geht man nur nach ihrer Größe, sind die menschlichen Hoden auf ein Paarungssystem mit einem Mann ohne Spermienkonkurrenz ausgerichtet. Selbstverständlich sagt uns dies jedoch nicht, ob sich die menschlichen Hoden für ein Leben als Paar, im Harem oder in einem verteilten Sozialsystem wie bei den Orang-Utans entwickelten.

Wie Dixson zeigte, stützen einige weitere Maße der Fortpflanzungsorgane die Vermutung, die aus dem Hinweis der relativen Größe der Hoden gezogen werden kann. Der Samenleiter, in dem die Spermien vom Hoden zum Penis transportiert werden, ist beispielsweise kürzer und muskulöser

bei Primatenarten, die in Gruppen mit mehreren Männchen und starker Spermienkonkurrenz leben. Bei Männern dagegen ist der Samenleiter relativ lang und nur mäßig muskulös. Primaten mit großen Hoden haben auch große Samenbläschen, was auf eine erhöhte Kapazität zur Erzeugung von Samenflüssigkeit hinweist. Männer besitzen nur mittelgroße Samenbläschen, die etwa zwei Drittel der Samenflüssigkeit erzeugen, während das verbleibende Drittel von der Vorsteherdrüse (Prostata) produziert wird. Vergleichbare Unterschiede sind auch bei weiblichen Primaten zu finden. Bei Arten mit Gruppen mit mehreren Männchen zum Beispiel sind die Eileiter relativ lang, was die Distanz erhöht, die Spermien zurücklegen müssen, um ein Ei zu befruchten. Im Gegensatz dazu sind die Eileiter bei Arten kurz, die in Gruppen mit nur einem Männchen leben, und die relativ kurzen Eileiter des Menschen fallen klar unter diese Kategorie. Insgesamt deuten alle Befunde darauf hin, dass die Fortpflanzungsorgane sowohl bei Männern als auch Frauen auf ein Paarungssystem mit einem Mann und wenig Spermienkonkurrenz ausgerichtet sind.

ARGUMENTATIONEN, DIE AUF HODENGRÖSSE UND ANDEREN MASSEN wie der Größe der Samenbläschen oder dem Umfang des Samen- oder Eileiters basieren, sind womöglich falsch. In ihnen steckt nämlich die unausgesprochene Annahme, dass die Größe der Fortpflanzungsorgane bei jeder Art genetisch kontrolliert ist und innerhalb bestimmter Grenzen liegt. Wie aber bereits im letzten Kapitel angemerkt, schwankt bei Primatenarten mit jahreszeitlich begrenzter Fortpflanzung die Hodengröße im Laufe des Jahres. Diese Schwankung muss selbstverständlich berücksichtigt werden. Unabhängig davon ist es auch möglich, dass die Hodengröße und andere Maße den regionalen Bedingungen angepasst werden. Dies kann man zum Beispiel wegen der eingeschränkten Schwankung der Hodengröße bei menschlichen Populationen vermuten. Es wurde berichtet, dass die Hoden bei asiatischen Männern in der Regel etwas kleiner seien und bei den Europäern etwas größer, vor allem bei den Skandinaviern. Niemand weiß, ob solche Schwankungen der menschlichen Hodengröße genetisch bedingt sind oder durch soziale, ernährungsbedingte oder andere Faktoren verursacht werden.

Zusammen mit seinem Kollegen Matt Anderson löste Alan Dixson die Frage eines möglichen Umwelteinflusses auf elegante Weise. Die beiden

untersuchten nicht nur die Gesamtgröße der Hoden und deren eventuelle Beeinflussung durch regionale Bedingungen, sondern auch die Spermien selbst. Wie bereits erklärt, besteht ein Spermium aus einem Kopf mit dem Zellkern, einem mit Mitochondrien vollgepacktem Mittelstück und einem peitschenartigen Schwanz. Die Mitochondrien im Mittelstück liefern die Energie für die Schwanzbewegungen, die das Spermium Richtung Ziel vortreiben. Anderson und Dixson vermuteten, dass Spermien bei starker Konkurrenz ein größeres Mittelstück — sozusagen einen größeren Treibstoffbehälter — haben könnten. Um diese Möglichkeit zu testen, maßen sie die Spermien verschiedener Primatenarten. Vergleiche sind in diesem Fall unkompliziert, weil merkwürdigerweise kein Verhältnis zwischen Spermiengröße und Körpergröße besteht. Deshalb sind Skalierungsanalysen ausnahmsweise gar nicht nötig. Anderson und Dixson fanden eine überzeugende Verbindung zwischen der Größe des Mittelstücks und dem Sozialsystem. Bei Arten wie Makaken, Steppenpavianen und Schimpansen, die in Gruppen mit mehreren Männchen leben, ist das Mittelstück signifikant größer als bei Arten, die in Gruppen mit einem Männchen leben, wie die im Paar lebenden Krallenäffchen oder Gibbons und die im Harem lebenden Blutbrustpaviane oder Gorillas. Bei menschlichen Spermien ist das Mittelstück verhältnismäßig klein, und es fällt klar in den Bereich der Primaten, die in Gruppen mit einem Männchen leben, und liegt weit unter den Werten der Arten mit Gruppen, die mehrere Männchen enthalten.

Insgesamt stimmten die Ergebnisse der Messungen von Spermien-Mittelstücken und vergleichenden Analysen der Hodengröße weitgehend überein. Trotzdem sind einige wichtige Unterschiede festzuhalten. Mausmakis zum Beispiel haben innerhalb der Primaten, die in Gruppen mit mehreren Männchen leben, relativ große Hoden, während das Mittelstück ihrer Spermien ziemlich klein ist und den Primaten ähnelt, die in Gruppen mit einem Männchen leben. Außerdem haben Gorillas selbst im Vergleich mit anderen Primaten, die in Gruppen mit einem Männchen leben, auffallend kleine Hoden, während das Mittelstück ihrer Spermien zu den größten der Primaten zählt, die in Harems leben. Klar ist, dass die Hodengröße und die Größe des Mittelstücks bis zu einem gewissen Grad unabhängig voneinander variieren können. Trotzdem sind die Ergebnisse für den Menschen eindeutig: Männer haben relativ kleine Hoden, und ihre Spermien haben ein besonders kleines Mittelstück, das zu den kleinsten zählt, das bei einer Primatenart je

dokumentiert wurde. Es gibt allerdings keinen Beweis, dass die menschlichen Hoden biologisch auf eine ausgeprägte Spermienkonkurrenz ausgerichtet wären. Obwohl die Umweltbedingungen möglicherweise die Hodengröße beeinflussen können, haben sie wohl keine Auswirkung auf die Maße der Spermien. Die Maße menschlicher Spermien sind einheitlich und wahrscheinlich genetisch kontrolliert. Das Mittelstück der Spermien liefert demnach einen der überzeugendsten Hinweise für eine biologische Anpassung des menschlichen Paarungsverhaltens.

EINEN WEITEREN HINWEIS AUF FEHLENDE SPERMIENKONKURRENZ findet man beim Weibchen. Bei einigen Primaten und anderen Säugieren bildet sich beim Weibchen nach der Begattung ein Pfropf in der Scheide. Rhesusaffen sind dafür ein bekanntes Beispiel. Unter den Menschenaffen wird ein fester Vaginalpfropf nur bei den Schimpansen gebildet. Bei Orang-Utans dagegen gibt es zwar eine andauernde, schwache Gerinnung der Samenflüssigkeit, aber es wird kein richtiger Vaginalpfropfen gebildet. Eine plausible Erklärung für die Bildung von Vaginalpfropfen — die der Genetiker Steve Jones in seinem Buch *Y: The Descent of Men* anschaulich »Wettkampf im Verkorken« nennt — ist die Verhinderung einer anschließenden Besamung durch ein anderes Männchen. Die Samenflüssigkeit des Mannes wird zwar nach der Ejakulation fast sofort zu einer festen Masse, aber innerhalb von fünfzehn Minuten wird sie wieder flüssig und es bildet sich kein Pfropf. Diese Tatsache weist auch darauf hin, dass Menschen biologisch nicht auf einen direkten Paarungswettbewerb zwischen Männern ausgerichtet sind.

Klare Hinweise aus der Gen-Sequenzierung stützen mittlerweile die Annahme, dass Primaten mit großen Hoden, wie Rhesusaffen und Schimpansen, speziell auf die Bildung von Vaginalpfropfen ausgerichtet sind. Die beiden Hauptproteine im Ejakulat von Primaten sind zwei Arten von Semenogelin, die in den Samenbläschen erzeugt werden und eine direkte Rolle bei der Gerinnung spielen. Die Genetiker Michael Jensen-Seaman und Wen-Hsiung Li untersuchten die Entwicklung der beiden Semenogelin-Gene bei Menschenaffen und Menschen und fanden heraus, dass sich unsere Gene im Vergleich zum gemeinsamen Vorfahren verhältnismäßig wenig verändert haben. Aber bei Schimpansen ist das eine der beiden Gene fast doppelt so lang. Allerdings weisen beide Semenogelin-Gene des Gorillas Anzeichen

einer Degeneration auf. Diese Befunde deuten darauf hin, dass die promiskuitive Paarung des Schimpansen ein sekundärer Zustand ist, der beim gemeinsamen Vorfahren der Gorillas, Schimpansen und Menschen nicht vorhanden war. Diese Vermutung wird durch die Tatsache bekräftigt, dass die Verlängerung des ersten Semenogelin-Gens bei den Bonobos nicht so ausgeprägt wie bei den Schimpansen ist.

Spätere Untersuchungen der Entwicklungsstufen des zweiten Semenogelin-Gens ergaben, dass die Veränderungen bei Primatenarten mit Begattungskonkurrenz unter den Männchen schneller vonstattengingen als bei Arten, die in Gruppen mit einem Männchen leben. Andere Studien zeigten, dass es bei Primaten generell eine starke positive Selektion der Proteine in der Samenflüssigkeit gibt. Eine Untersuchung aus dem Jahr 2005, bei der Tausende Gene der Samenflüssigkeit von Menschen und Schimpansen verglichen wurden, brachte neben den beiden Semenogelin-Genen sieben weitere Gene mit einer deutlich positiven Selektion ans Tageslicht. Dieselben Autoren verglichen die neun Gene der Menschen und Schimpansen mit den entsprechenden Genen zwölf anderer Primatenarten, darunter Altweltaffen wie Neuweltaffen. Starke Anzeichen positiver Selektion wurden bei Rhesusaffen und Steppenpavianen gefunden. Darüber hinaus gab es weitere Hinweise auf degenerierte Gene bei Gorillas und Gibbons, die beide durch die Paarung mit einem Männchen gekennzeichnet sind.

Insgesamt gibt es erhebliche Beweise — von der Hodengröße über die Ausmaße der Spermien bis zu den Genen, die die Zusammensetzung der Samenflüssigkeit kontrollieren — dass der Mensch biologisch nicht auf die Bewältigung starker Spermienkonkurrenz ausgerichtet ist. Alles in allem sieht es so aus, dass sich unsere Art dazu entwickelte, in sozialen Gruppen mit einem Paarungssystem mit einem Mann zu leben, obwohl es gewisse Hinweise gibt, dass es in einem früheren Stadium unserer Evolution durchaus schwache männliche Konkurrenz gegeben haben kann.

VOM PAARUNGSSYSTEM ABGESEHEN, SIND DIE MASSE DER SPERMIIEN auch in einem ganz anderen Kontext von Bedeutung. Wie bereits erklärt, hat die Körpergröße keinen Einfluss auf die Größe der Spermien. Dies gilt auch für Eier und andere Körperzellen. Grundsätzlich haben größere Säugetiere zwar mehr Zellen, aber keine größeren. Erstaunlich ist, dass

die Spermien und Eier eines 60 Gramm schweren Mausmakis praktisch gleich groß sind wie die Spermien und Eier eines Menschen, der tausendmal schwerer ist. Noch erstaunlicher ist allerdings, dass die Spermien und Eier bei einem Blauwal, der 3.000mal so viel wiegt wie ein Mensch, immer noch die gleiche Größe haben. Diese verblüffende Tatsache führt uns zu einem entscheidenden, aber oft vernachlässigtem Problem.

Das Ei eines Säugetiers ist gerade noch zu erkennen und etwa so groß wie der Punkt am Ende dieses Satzes. Spermien sind bedeutend kleiner und ohne Mikroskop überhaupt nicht erkennbar. Das Volumen des Eis eines Säugetiers entspricht dem von 30.000 Spermien, und etwa drei Milliarden Spermien fänden Platz in einem Pfefferkorn. Wegen der winzigen Ausmaße der Spermien und Eier ist das logistische Problem des Aufeinandertreffens beim Menschen deutlich größer als bei den Mausmakis. Die Strecke, die menschliche Spermien nach der Besamung zurücklegen müssen, ist etwa zehnmal so lang wie bei den Mausmakis. Überdies müssen die menschlichen Spermien das Ei in einem zehnmal so breiten Eileiter orten. Das Mittelstück eines Mausmaki-Spermiums jedoch — der »Treibstofftank« — ist sogar größer als das des Menschen. Die Logistik, die ein Blauwal bewältigen muss, damit Spermium und Ei sich begegnen, ist enorm. Die Strecke, die die Spermien zurücklegen müssen, ist fast 20mal so lang wie beim Menschen und 200mal so lang wie beim Mausmaki.

Obwohl die Skalierung der Spermienausmaße problematisch ist, stellt die Körpergröße in diesem Fall kein direktes Hindernis für sinnvolle Vergleiche dar. Stattdessen spielt sie eine Rolle beim Ablauf der Befruchtung. Da bei Säugetieren die Größe der Spermien und deren Mittelstücke mit steigender Körpergröße nicht zunimmt, stellt der Transport der Spermien durch den weiblichen Genitaltrakt bei zunehmender Körpergröße eine immer größer werdende Herausforderung dar. Da Spermien bei größeren Säugetieren generell keinen größeren Treibstoffvorrat haben, benötigen sie auf ihrer Reise zum Ei externe Hilfe. Der Ablauf der Kopulation könnte einige Hinweise liefern, aber letztlich sind wir unausweichlich zu folgendem Schluss gezwungen: Die Gebärmutter und der Eileiter des Weibchens müssen, zumindest bei größeren Säugetierarten, die Reise der Spermien zwangsläufig aktiv unterstützen. Menschen gehören zu dieser Kategorie und brauchen sicherlich Mechanismen, die zur Beförderung der Spermien nach der Besamung einen Beitrag leisten. Ohne zusätzliche Hilfe können menschliche

Spermien etwa 18 Zentimeter pro Stunde schwimmen. Bei dieser Geschwindigkeit würden sie mindestens 45 Minuten benötigen, um die Distanz zwischen dem Gebärmutterhals und dem unteren Ende des Eileiters zurückzulegen — sofern sie genug Treibstoff haben, um überhaupt so weit zu schwimmen. Selbstverständlich bräuchten Spermien für ihre Reise vom natürlichen Ort der Besamung in der Scheide bis zum Eileiter eher noch mehr Zeit. Noch besser kann man sich diese enorme Leistung vorstellen, wenn man bedenkt, dass die Gesamtdistanz, die ein menschliches Spermium zwischen der Besamung und der Befruchtung des Eis zurücklegt, der Bewältigung einer Strecke von sechs Kilometern in 90 Minuten durch einen geübten Kanalschwimmer entspricht.

IN DER TAT IST ES SO, DASS DIE GEBÄRMUTTER einer Frau unauffällig, aber stetig vor sich hin pumpt. Um den weiblichen Transportmechanismus ohne aktive Bewegungen der Samenfaden zu testen, ersetzte man in verschiedenen Studien echte Spermien durch reglose Partikel. Erste Versuche mit Kühen hatten gezeigt, dass einige Spermien den Eileiter in weniger als drei Minuten nach der Besamung erreichten. Im Anschluss an diesen Befund und einige beiläufige Berichte aus der Medizin veröffentlichten die Gynäkologen Gene Egli und Michael Newton 1961 die Ergebnisse einer wegweisenden Studie. Sie führten Untersuchungen bei drei freiwilligen Frauen durch, die sich die Gebärmutter entfernen lassen wollten. Die chirurgischen Eingriffe wurden so geplant, dass sie kurz vor dem Eisprung durchgeführt wurden. In allen Fällen wurden in einer Flüssigkeit enthaltene Kohlepartikel tief in der Scheide deponiert. Während der Operation wurden die Kohlepartikel bei zwei der drei Frauen etwa eine halbe Stunde nach Einführung aus dem Eileiter herausgeholt. Maximal 30 Minuten waren also für den Transport notwendig. Egli und Newton kamen zu dem Schluss, dass es irgendeine Form der aktiven Beförderung geben muss, und Muskelkontraktionen der Gebärmutter dabei wahrscheinlich eine wichtige Rolle spielen.

Ähnliche Ergebnisse veröffentlichte der Gynäkologe Charles de Boer 1972, die er ebenfalls aus einer Untersuchung gewonnen hatte, die mit der Beförderung regloser Partikel durch die Gebärmutter und die Eileiter zu tun hatte. Bei fast 200 Patientinnen injizierte de Boer vor chirurgischen Eingriffen, die entweder zwecks Hysterektomie oder Abbinden der Eileiter durchge-

führt wurden, eine geringe Menge Tusche in verschiedene Stellen der Scheide oder Gebärmutter. Nur bei sechs Prozent der Patientinnen kam es zum Transport der Tusche von der Scheide bis zum Eileiter. Dagegen wurde der Transport vom Gebärmutterhals zum Eileiter bei fast einem Drittel vollzogen, während der Transport von der Gebärmutterkammer in mehr als der Hälfte der Fälle durchgeführt wurde. Bei einigen Patientinnen ergossen sich nach dem Transport durch den Eileiter etwas Tusche in die Bauchhöhle. De Boers Schlussfolgerung lautete, dass Spermien aktiv in den Gebärmutterhals schwimmen müssen, der Transport danach aber durch die Muskulatur der Gebärmutter und Eileiter unterstützt wird.

Der Gynäkologe Georg Kunz wählte einen anderen Ansatz, um den Transport der Spermien durch den weiblichen Genitaltrakt zu untersuchen. Zusammen mit seinen Kollegen wandte Kunz eine Kombination aus zwei Methoden an. Bei 36 Frauen registrierten sie durch eine Ultraschalluntersuchung mit einer Sonde in der Scheide wellenhafte Muskelkontraktionen in der Gebärmutter. Bei 64 Frauen untersuchten sie den passiven Transport zudem direkt, indem sie winzige Albuminkügelchen in der Größe von Spermien im Bereich des unteren Endes des Gebärmutterhalses absetzten. Die Kügelchen waren radioaktiv markiert, damit man ihren Transport bis zu den Eileitern mit einem Ortungsgerät verfolgen konnte. Einige Kügelchen erreichten den Eingang des Eileiters bereits eine Minute, nachdem sie abgesetzt worden waren. Damit war geklärt, dass die Gebärmutter wie eine Pumpe funktionierte. Besonders im Zeitraum des Eisprungs kam es zu Kontraktionswellen, die hauptsächlich vom Gebärmutterhals zu den Eileitereingängen reichten. Weil eine Frau pro Zyklus meist nur ein einziges Ei freisetzt, ist jeweils nur ein Eileiter — links oder rechts — für die Befruchtung notwendig. Interessanterweise wurden die markierten Kügelchen vorwiegend in den Eileiter transportiert, in dem der Eisprung stattfand, was sich mit Befunden aus anderen Studien deckt. Offensichtlich gibt es einen Mechanismus, der sicherstellt, dass die meisten Spermien für eine eventuelle Befruchtung auf der richtigen Seite ankommen.

Bevor wir das Thema Spermientransport verlassen, muss ich mich noch einem merkwürdigen Befund zuwenden, der besondere Erwähnung verdient. Bei manchen Frauen ist ein Eileiter häufig infolge einer Infektion blockiert. Eine Befruchtung sollte im Prinzip ausgeschlossen sein, wenn ein Ei auf der Seite des blockierten Eileiters vom Eierstock freigesetzt wird. In meh-

rerer Fällen kam es trotzdem zur Befruchtung. Leider nistet sich das Ei dann am oberen Ende des blockierten Eileiters ein, wo auch die Entwicklung des Embryos stattfindet, so dass ein chirurgischer Eingriff unerlässlich wird. Die einzige Erklärung für einen solchen Vorfall ist, dass die Spermien durch den anderen, nicht blockierten Eileiter zum Ziel gelangten. Um das Ei zu erreichen, das im blockierten Eileiter freigesetzt wurde, musste das Spermium wohl durch die Bauchhöhle schwimmen, ehe es zur Befruchtung kam. Dies zeigt deutlich die Hartnäckigkeit der Spermien auf ihrem Weg zum Ei und ihre Fähigkeit, die letzte Etappe schwimmend zu überwinden.

NACH DER ERÖRTERUNG DES ZUSAMMENHANGS VON ANATOMIE, Größe der Geschlechtszellen und der Verbindung zwischen Sozialstruktur und Paarungsverhalten kommen wir zur unvermeidlichen Frage des Schnittpunkts — dem Geschlechtsverkehr. Populärwissenschaftliche Bücher begründeten die Vorstellung, dass die menschliche Kopulation zwei einzigartige Grundzüge aufweist: Sie kann zu jedem Zeitpunkt des Eierstockzyklus und sogar während der Schwangerschaft stattfinden. Auf dieser Basis beschrieb Desmond Morris den Menschen als die »sexuellste« Primatenart. Allerdings stehen beide Behauptungen in krassem Widerspruch zu einer Vielzahl biologischer Tatsachen.

Die Behauptung, dass nur der Mensch während der Schwangerschaft kopuliert, ist einfach zu widerlegen. Der Ursprung dieses Mythos ist leicht zu begreifen. Scheinbar erfüllt die Kopulation nach der Empfängnis keine sinnvolle biologische Funktion mehr, weshalb der Gedanke reizvoll ist, dass es bei anderen Säugetieren nie dazu käme. Diese Annahme ist aber absolut falsch. Kopulation während der Schwangerschaft ist bei Säugetieren weit verbreitet und seit mehr als einem Jahrhundert eindeutig dokumentiert. Ein rascher Überblick zeigt, dass die Kopulation während der Schwangerschaft bei so unterschiedlichen Säugetieren wie Spitzmäusen, Hamstern, Mäusen, Kaninchen, Schweinen, Kühen, Pferden und Primaten — darunter Tamarine, Makaken, Paviane, Languren und Schimpansen — bekannt ist. Bei Rhesusaffen untersuchte man sogar Hormonprofile, die mit der Kopulation während der Schwangerschaft zusammenhängen. Kopulationen kommen bei all diesen Säugetieren vorwiegend während der frühen Phase der Schwangerschaft vor und nehmen mit der Zeit gewöhnlich ab, aber sie sind so ver-

breitet, dass sie vermutlich eine Funktion haben. Anstatt haltlose Behauptungen aufzustellen, dass andere Säugetiere während der Schwangerschaft nicht kopulieren würden, sollten wir nach Erklärungen suchen, warum sie es tun. Das ist ein Rätsel, dessen Lösung noch aussteht. (An dieser Stelle muss übrigens angemerkt werden, dass die Kopulation beim Menschen auch am Ende der Schwangerschaft risikolos ist. Einige Untersuchungen ergaben sogar, dass sie in gewisser Hinsicht positive Auswirkungen haben kann.)

Die Behauptung, dass Menschen die einzigen Säugetiere seien, die während des ganzen Eierstockzyklus kopulieren, lässt sich etwas eher rechtfertigen. Die Alleinstellung des Menschen in dieser Hinsicht wurde aber überbetont und falsch dargestellt. Der springende Punkt ist, dass die menschliche Kopulation innerhalb des Zyklus auch stattfinden kann, wenn ein Eisprung unwahrscheinlich ist. Anders gesagt, können wir Geschlechtsverkehr haben, wann immer wir Lust darauf haben. Bei anderen Säugetieren als den Primaten kommen solche Kopulationen, die für eine Befruchtung zeitlich ungünstig sind, sehr selten oder gar nicht vor. Sie sind auch bei Halbaffen (Lemuren, Loris, Koboldmakis) äußerst selten, aber bei höheren Primaten (Affen und Menschenaffen) recht verbreitet. In der Tat kopulieren fast alle höheren Primaten während eines Großteils des Eierstockzyklus. Gorillas stellen eine der wenigen Ausnahmen dar, denn sie kopulieren in jedem Zyklus nur an zwei bis drei Tagen, die in der Nähe des Eisprungs liegen. Im Allgemeinen kopulieren Affen und Menschenaffen während mindestens einer Woche pro Eierstockzyklus, und bei einigen Arten kann es an fast jedem Tag des Zyklus zur Begattung kommen. Unterm Strich kommt es in der Phase des Follikelwachstums bis zum Eisprung häufiger zu Kopulationen als in der darauffolgenden Lutealphase, in der es einen Gelbkörper gibt.

Bei den meisten Säugetierarten kopulieren die Weibchen in jedem Eierstockzyklus nur während eines eng begrenzten Zeitraums, der ein bis drei Tage dauert. Während dieser Phase kann es sein, dass das Weibchen sich aktiv um Kopulation bemüht und laut Umgangssprache rollig ist, indem es seine Begattungsbereitschaft offensichtlich signalisiert. 1900 prägte der Fortpflanzungsbiologe Walter Heape den Ausdruck »Östrus« als Bezeichnung für diese begrenzte und offensichtliche Phase der weiblichen Begattungsbereitschaft (Brunst). Die Herkunft dieses Worts ist seltsam. Es stammt vom griechischen Wort *oistros*, das »Bremse« bedeutet. Die Familie der Oestrinen umfasst etwa 150 Arten von Bremsen. Die Larven dieser parasitä-

ren Fliegen entwickeln sich im Gewebe eines Säugetiers. Der Zusammenhang, den Heape zwischen den Bremsen und der Brunst bei weiblichen Tieren zog, hatte anscheinend damit zu tun, dass Bremsen Rinder in Ekstase versetzen können. Worin der Grund auch liegt, das Wort »Östrus« etablierte sich rasch als Standardbezeichnung für die zeitlich begrenzte Periode der Begattungsbereitschaft weiblicher Säugetiere.

Halbaffen ähneln anderen Säugetieren darin, dass die Brunst der Weibchen in der Regel zeitlich begrenzt ist. Im Gegensatz dazu kopulieren höhere Primaten (Affen und Menschenaffen) generell während eines beträchtlichen Zeitraums des Eierstockzyklus. Aus diesem Grund schlug der Fortpflanzungsbiologe Barry Keverne 1981 vor, bei höheren Primaten auf die Bezeichnung »Östrus« zu verzichten. Dabei handelt es sich um keine Haarspalterei. Vielmehr gibt es stichhaltige Beweise, dass die direkte hormonelle Steuerung der Begattungsbereitschaft bei weiblichen höheren Primaten abgenommen hat, während die flexible Steuerung durch das Gehirn gleichzeitig zunahm. Leider werden Kevernes fundierte Argumente — die seither von vielen anderen Fachleuten gestützt wurden — häufig übergangen. Irreführende Erwähnungen des »Östrus« bei Affen und Menschenaffen gibt es im Überfluss. Diese Missachtung des wissenschaftlichen Hintergrunds führte dazu, dass ein wesentlicher Punkt weitgehend unbeachtet blieb: Ausgedehnte Kopulation während des Zyklus ist einerseits bei Affen und Menschenaffen weit verbreitet, andererseits aber größtenteils auf diese höheren Primaten beschränkt. Diese Erkenntnis ist keineswegs neu. Der Fortpflanzungsphysiologe Sydney Asdell, Autor des enzyklopädischen Klassikers *Patterns of Mammalian Reproduction*, betonte diese Besonderheit bei Rhesusaffen schon vor mehr als 80 Jahren. Es stimmt, dass der Mensch mit seinen häufigen Kopulationen während des ganzen Eierstockzyklus ein Extremfall ist. Einen verlängerten Zeitraum der Begattung während des weiblichen Zyklus gab es aber vermutlich auch schon vor mehr als 40 Millionen Jahren bei den gemeinsamen Vorfahren der höheren Primaten.

BEI SÄUGETIEREN, DIE PRO ZYKLUS LEDIGLICH EINIGE TAGE KOPULIEREN, findet der Eisprung innerhalb dieses kurzen Zeitrahmens statt. Die Entwicklung zeitlich begrenzter Kopulation entspricht genau unseren Erwartungen, da sie garantiert, dass ein frisches Spermium ein frisches

Ei befruchtet. Typischerweise beträgt die Lebensdauer der Spermien von Säugetieren nach der Ejakulation etwa zwei Tage und die der Eier gewöhnlich weniger als ein Tag. Aus diesem Grund ist schwierig zu verstehen, warum ein Säugetierweibchen zulässt, dass es mit einem größeren Zeitunterschied zum Eisprung begattet wird. Findet die Kopulation zeitlich nicht im Bereich des Eisprungs statt, kann ein altes Spermium ein frisches Ei befruchten oder ein verfallendes Ei durch ein gerade ejakuliertes Spermium befruchtet werden. Erste Experimente an Säugetieren wie Kaninchen und Ratten zeigten, dass eine Befruchtung mit alten Spermien oder Eiern zu Fehlgeburten oder Geburtsfehlern führen kann. Warum kopulieren Affen, Menschenaffen und Menschen dann zu Zeiten, an denen eine Befruchtung mit alten Geschlechtszellen praktisch vorprogrammiert ist? Wie wir im letzten Kapitel sehen werden, hat diese oft vernachlässigte, aber entscheidende Frage eine tiefe Bedeutung für die Fortpflanzungsmedizin.

Umfassende Belege zeigen, dass der Eisprung beim Menschen und bei vielen Affen und Menschenaffen — beispielsweise Makaken, Paviane, Languren und Schimpansen — etwa in der Mitte des Eierstockzyklus stattfindet. Daher können Kopulationen einige Tage früher oder später möglicherweise zu Problemen führen. Im besten Fall führt eine Kopulation, die mehrere Tage vor oder nach dem Eisprung vollzogen wird, nicht zur Befruchtung. Und im schlimmsten Fall führt sie im Bereich des Eisprungs, aber nicht nah genug daran, zu einer Befruchtung mit einem alten Spermium oder Ei. Selbstverständlich kann es sein, dass Affen, Menschenaffen und Menschen einen Sondermechanismus entwickelt haben, um dieses potentielle Problem zu beheben. Eine solche Annahme führt aber zwangsläufig zu einem weiteren Rätsel: Warum sollte der Vorfahre dieser höheren Primaten einen sonst universellen Mechanismus aufgeben, der eine Befruchtung mit frischen Geschlechtszellen garantiert? Wenn die Befruchtung mit alten Geschlechtszellen zu Fehlgeburten und/oder Geburtsfehlern führt, sollte starke natürliche Selektion dafür sorgen, dass die Kopulation innerhalb eines kurzen Zeitrahmens um den Eisprung herum eingegrenzt wird. Wie in aller Welt konnte es also zur Kopulation außerhalb der Eisprungphase kommen? Überdies gibt es möglicherweise ein weiteres Problem: Besonders wenn mehrere Männchen beteiligt sind, könnte der längere Zeitraum der Begattung während des Eierstockzyklus die Bedrohung durch Krankheitserreger verschärfen, die von Spermien transportiert werden.

Bei den Diskussionen über die Kopulation während eines verlängerten Zeitraums des Eierstockzyklus werden die möglichen Gefahren einer Befruchtung mit alten Geschlechtszellen kaum erwähnt. Ohne dieses grundlegende Problem zu berücksichtigen, fanden viele Wissenschaftler einfallreiche Erklärungen für die zeitlich uneingeschränkte Begattung. Die Biologin Nancy Burley stellte eine Verbindung zwischen der Kopulation während eines verlängerten Zeitraums und einem »versteckten Eisprung« her. Diese Idee basiert auf der weit verbreiteten Annahme, dass ein Männchen den Eisprung des Weibchens nur dann wahrnehmen kann, wenn dieses ein klares Signal von sich gibt. Drei Haupthypothesen, die sich nicht unbedingt gegenseitig ausschließen, wurden aufgestellt. Die erste Hypothese lautet, dass die Kopulation während eines verlängerten Zeitraums des Zyklus die Bindung der Geschlechtspartner verstärkt. Desmond Morris vertrat diesen Gedanken in seinem Buch *Der nackte Affe*. Eine einflussreiche Veröffentlichung der Biologen Lee Benschopf und Randy Thornhill aus dem Jahr 1979, in der die Evolution der Monogamie und des versteckten Eisprungs beim Menschen erkundet wurde, fing mit diesem Satz an: »Der *Homo sapiens* ist unter den Primaten einzigartig, weil er als Einziger unter den Arten, die in Gruppen leben, hauptsächlich monogam ist, und weil er die einzige Art ist, bei der die Weibchen den Eisprung nicht durch Östrus signalisieren.« Tatsache ist, dass ziemlich viele Primatenarten — etwa 80 — monogam sind. Zudem wird der Eisprung bei den meisten Affen und Menschenaffen nicht äußerlich signalisiert. Eine zweite Hypothese besagt, dass die verlängerte Begattungsbereitschaft der Weibchen Unklarheiten bei der Vaterschaftsfrage zur Folge hat. Sofern Männchen den Zeitpunkt des Eisprungs während der verlängerten Begattungsphase eines Weibchens nicht erkennen können, ist nicht klar, wer der Vater der Nachkommen ist. Ein solcher Mechanismus würde die Konkurrenz unter den Männchen verringern und der Gruppe verschiedene Vorteile einbringen. Die dritte Hypothese ist, dass die Kopulation während eines verlängerten Zeitraums das Engagement der Männchen für die Nachkommen verstärken könnte. Nancy Burley brachte sogar eine vierte, speziell auf den Menschen zugeschnittene Hypothese auf: Die Frau »verschleiert« den Zeitpunkt des Eisprungs selbst, damit eine Empfängnis nicht absichtlich verhindert werden kann.

DAS BEKANNTE »EIERUHRMODELL« DES EIERSTOCKZYKLUS bei Affen, Menschenaffen und Menschen wurde stark durch Untersuchungen bei Rhesusaffen beeinflusst, die der Fortpflanzungsbiologe Carl Hartman in den 1920er Jahren initiierte. Seine Studien sind teilweise der Grund, warum Rhesusaffen sich rasch weltweit zu den führenden Laborprimaten entwickelten. Hartmans Forschungen spielten unter anderem eine Schlüsselrolle bei der Etablierung des Begriffs der »fruchtbaren Tage« — ein deutlicher Höchstwert von Empfängnissen in der Zyklusmitte — bei Altweltaffen. Bei genauerer Betrachtung stellt man jedoch fest, dass eine seiner Deutungen, die bis heute vielfach für bare Münze genommen wird, schlicht falsch ist.

Hartmans Monographie über die Fortpflanzung der Rhesusaffen aus dem Jahre 1932 enthält eine Grafik, die einen Höhepunkt für Befruchtungen zwischen dem neunten und dem achtzehnten Tag des Monatszyklus aufweist. Zu beachten ist übrigens, dass Befruchtungen während eines zehntägigen Zeitraums — also einem Drittel der gesamten Zyklusdauer — und nicht nur im Bereich der Zyklusmitte am vierzehnten Tag stattfanden. Aber der eigentliche Fehler liegt woanders. Die Grafik in Hartmans Monographie basierte auf Einzelfällen, bei denen ein Männchen und ein Weibchen kurzzeitig zusammen in einem Käfig untergebracht waren. Nur wenn Hartman seinen Makaken erlaubt hätte, zufällig an jedem beliebigen Tag des gesamten Zyklus zu kopulieren, würde seine Grafik zeigen, wann die Wahrscheinlichkeit einer Befruchtung am höchsten war. Aber das war nicht der Fall. Stattdessen ging Hartman im Voraus davon aus, dass Kopulationen, die zur Empfängnis führen, normalerweise in der Mitte des Zyklus stattfänden, und in diesem Zeitraum ließ er auch die meisten Paarungen zu. Paarungen während der ersten und der letzten Woche des Zyklus verhinderte er komplett. Aus diesem Grund war ein Befruchtungshöhepunkt mitten im Zyklus vorprogrammiert. Es gibt jedoch eine Methode, um anhand Hartmans Daten nachträglich zu testen, ob der Empfängnishöhepunkt tatsächlich in der Zyklusmitte liegt. Man kann nämlich für jeden Zyklustag die Quote der Paarungen berechnen, die zur Empfängnis führten. Nach dieser Korrektur verschwindet der vermeintliche Empfängnishöhepunkt in der Zyklusmitte vollkommen.

Fast vierzig Jahre nach dem Erscheinen der Hartmanschen Monographie wurde eine ähnliche Grafik veröffentlicht, die Befruchtungen bei Pavianen widerspiegelte. Die Grafik zeigte eine Häufung fertiler Kopulationen zwi-

schen dem neunten und dem zwanzigsten Zyklustag — immerhin eine zwölf tägige Streuung. Auch in diesem Fall wurden die meisten Paarungen in der Mitte des Zyklus arrangiert. Berechnet man aber die Quote der Befruchtungen pro Zyklustag, verschwindet genau wie bei Hartmans Makaken der vermeintliche Empfängnishöhepunkt in der Zyklusmitte völlig. Mit anderen Worten brechen zwei der meistzitierten Belege für einen Empfängnishöhepunkt in der Zyklusmitte bei Altweltaffen bei näherer Betrachtung völlig zusammen.

Die Vorstellung, dass der weibliche Eisprung mit anschließender Empfängnis normalerweise mitten im Zyklus stattfindet, wurde durch zwei Gynäkologen der 1920er und 1930er Jahre populär, den Österreicher Hermann Knaus und den Japaner Kyusaku Ogino. Knaus und Ogino trugen vermutlich mehr als andere zur Entwicklung des »Eieruhr-Modells« bei: ein Zyklus von einem Monat, der mechanisch wie eine Uhr vor sich hin tickt. Knaus war überzeugt, dass der Eierstockzyklus des Kaninchens als direktes Vorbild für den menschlichen Zyklus dienen kann. Aber damit lag er völlig daneben. Der Eisprung bei Kaninchen wird durch die Kopulation ausgelöst, während der Eisprung bei Menschen — wie bei allen anderen Primaten — spontan ohne äußere Einflüsse erfolgt. Ogino, Knaus und Hartman waren Zeitgenossen, und die Ergebnisse aus den Untersuchungen mit Rhesusaffen beeinflussten auch die Deutung des Eierstockzyklus und der weiblichen Empfängnis. Auf diese Weise schlichen sich Hartmans scheinbare Belege, dass es bei Makaken vorwiegend in der Zyklusmitte zur Befruchtung käme, ins Standardmodell des menschlichen Eierstockzyklus ein. Im Gefolge von Ogino und Knaus lieferten viele Wissenschaftler Hinweise auf »fruchtbare Tage« im menschlichen Menstrualzyklus. Sowohl Ogino als auch Knaus gingen davon aus, dass die Dauer des Menstrualzyklus bei Frauen variabel ist, aber sie teilten den Irrglauben, dass der Zeitraum zwischen dem Eisprung und dem Beginn der nächsten Menstrualblutung, die sogenannte Lutealphase des Zyklus, eine feststehende Dauer von zwei Wochen hätte.

MAN GEHT IMMER NOCH DAVON AUS, dass beim Menschen sowohl der Eisprung als auch die Befruchtung generell in der Zyklusmitte stattfinden. Es gibt jedoch etliche selten zitierte Hinweise auf einmalige Kopulationen, die zur Schwangerschaft führten und zeigen, dass es innerhalb des

Menstrualzyklus eine breite Streuung gibt. Man findet solche Daten — die sich weitgehend auf medizinische Berichte aus dem deutschsprachigen Raum beschränken — schon im Jahr 1869 in einer Veröffentlichung des Gynäkologen Johann Ahlfeld. Er zitierte etwa 200 klinische Protokolle von Fällen, bei denen einmalige Kopulationen zu einer Schwangerschaft führten. Die Protokolle wiesen darauf hin, dass es an jedem Tag des Zyklus einmalige Kopulationen gab, die zu Schwangerschaften führten. Allerdings wurden die Frauen viel öfter nach Kopulationen in der ersten Hälfte des Zyklus schwanger. Der Höhepunkt lag nicht am vierzehnten Tag nach Beginn der Menstruation, sondern etwa am sechsten Tag. Mindestens 20 Untersuchungen, die auf vergleichbaren Informationen basierten, wiesen ein ähnliches Muster auf: Kopulationen, die zu Schwangerschaften führten, fanden an praktisch jedem Tag des Zyklus statt, am häufigsten aber während der ersten zwei Wochen. Die Untersuchungen beruhten auf den Ergebnissen einmaliger Kopulationen, die in verschiedenen Zusammenhängen notiert wurden: kurze Heimatbesuche von Soldaten, juristische Beratungen bei Vaterschaftsklagen und Protokolle aus gynäkologischen Kliniken.

In den bisher zitierten Fällen wurde die Kopulation gewöhnlich nicht mit körperlicher Gewalt erzwungen. Aber Daten aus Schwangerschaften, die aus Vergewaltigungen resultierten, stützen auf ähnliche Weise die Auffassung, dass der Beischlaf an praktisch jedem Tag des Zyklus zur Schwangerschaft führen kann. Dazu ein Beispiel aus dem Jahr 1947. Damals überprüfte der Arzt G. Linzenmeier 160 Fälle von Frauen mit normalen Monatszyklen, die Opfer eines sexuellen Übergriffs geworden waren. 62 Frauen wurden nach Vergewaltigungen schwanger, die zwischen dem dritten und achtzehnten Tag des Zyklus (also in einem Zeitraum von 16 Tagen) geschahen. Linzenmeier kam zu dem Schluss, dass dieses Muster anormal ist und der Eisprung durch die Brutalität der Vergewaltigung hervorgerufen wurde. Diese Deutung wurde später vom Tierarzt Wolfgang Jöchle übernommen. Tatsache ist, dass der Eisprung bei Primaten normalerweise spontan erfolgt und es keine überzeugenden Belege dafür gibt, dass der weibliche Eisprung überhaupt durch äußere Einwirkung hervorgerufen werden kann. Viel wahrscheinlicher ist, dass eine breite Streuung der Kopulationen, die zur Empfängnis führen, beim Menschen normal ist.

Meine eigene Analyse von Daten aus zehn früheren Untersuchungen in diesem Bereich — mit einer Gesamtzahl von mehr als 4.000 Fällen — lie-

ferte eine bemerkenswert glatte Kurve, die folgende Schlussfolgerung gestattet: Geschlechtsverkehr kann an praktisch jedem Tag des Zyklus zur Schwangerschaft führen, obwohl die Wahrscheinlichkeit einer Befruchtung in der ersten Hälfte (Follikelphase) bedeutend höher ist als in der zweiten Hälfte (Lutealphase). Die Kurve weist zwar einen Höhepunkt in der ersten Hälfte des Zyklus auf, dieser liegt aber näher beim achten oder neunten Tag des Zyklus als in dessen Mitte um den vierzehnten Tag herum.

Frühere Berichte, die diese Schlussfolgerung unterstützen, wurden generell außer Acht gelassen. Einige Wissenschaftler wiesen sie als nicht verlässlich ab, weil sie auf Indizienbeweisen beruhten und veröffentlicht wurden, bevor Hormonanalysen möglich waren. Die Verlässlichkeit der Berichte hängt auch davon ab, ob sich die Frauen an den richtigen Termin der Menstruation und der Kopulation erinnerten, und ihre Aussagen wurden oft als unglaublich bezeichnet. Ein Bericht des Epidemiologen Allen Wilcox aus dem Jahr 2000 bestätigte aber die Befunde dieser früheren Studien. Seiner Forschungsgruppe gelang es, mehr als 200 gesunde Frauen aus North Carolina zu rekrutieren, die nicht mehr verhüteten, da sie schwanger werden wollten. Jede Frau notierte die Tage, an denen sie Geschlechtsverkehr hatte und die Menstruation einsetzte. Die Termine des Eisprungs wurden zuverlässig mittels Hormonanalysen von Harnproben ermittelt. 60 Prozent der Frauen wurden schwanger und brachten Kinder zur Welt. Die Wahrscheinlichkeit einer Empfängnis war am zwölften und dreizehnten Tag des Zyklus am höchsten, aber bei jeder Frau betrug die Zufallschance, zwischen dem sechsten und einundzwanzigsten Tag schwanger zu werden, mindestens zehn Prozent. Eine Empfängnis außerhalb dieses Bereichs kam zwar selten vor, war aber immerhin möglich. Wilcox und seine Kollegen zitierten ausdrücklich eine der früheren deutschen Studien und betonten die große Übereinstimmung mit ihren Ergebnissen. Sie kamen zu folgendem Schluss: »Frauen sollten darüber informiert werden, dass der Zeitraum ihrer Fruchtbarkeit auch bei einem regelmäßigen Zyklus sehr schwer zu berechnen sein kann. ... Unsere Daten deuten darauf hin, dass es nur wenige Tage im Menstrualzyklus gibt, an denen eine Frau nicht schwanger werden kann.«

In einem Artikel über künstliche Besamung mit Spermien lieferte der Gynäkologe Yutaka Yoshida 1960 wertvolle Informationen über den zeitlichen Zusammenhang von Eisprung, Besamung und Empfängnis. Sämtliche Männer der beteiligten Ehepaare galten als absolut unfruchtbar, weil

ihre Spermienmenge extrem niedrig war oder gar null betrug. Im Gegensatz zu vielen anderen praktizierenden Ärzten führte Yoshida pro Zyklus nur eine Besamung durch. Am Ende konnte er von mehr als 100 Fällen berichten, bei denen eine einmalige Besamung zur Schwangerschaft führte. Er zog zwei indirekte Hinweise auf den Eisprung heran — die basale Körpertemperatur und den Zustand des vom Gebärmutterhals abgeschiedenen Schleims — um den Zeitpunkt der Besamung zu optimieren. Der vermutete Zeitpunkt des Eisprungs fiel in den Zeitraum zwischen dem zehnten und dreiundzwanzigsten Tag des Zyklus, und Yoshida führte zwischen dem achten und achtundzwanzigsten Tag erfolgreich Besamungen durch, wobei der Höchstwert auf den vierzehnten Tag fiel. Besonders interessant ist die Tatsache, dass einmalige Besamungen, die zu einer Schwangerschaft führten, im Bereich von zehn Tagen vor dem geschätzten Zeitpunkt des Eisprungs bis vier Tage danach lagen. Dieses Ergebnis liefert den Beweis, dass menschliche Spermien nach der Besamung bis zu zehn Tage überleben können. Diese Zeitspanne ist bedeutend größer als die zwei Tage, die allgemein anerkannt sind. Yoshida verfolgte zwar die Absicht, die künstliche Besamung mit dem Eisprung zu koordinieren, doch die natürliche Schwankung des Menstrualzyklus hinderte ihn daran. Außerdem gibt es bei seinen Ergebnissen keinen klaren Höchstwert, wenn man die Quoten erfolgreicher Besamungen an jedem Zyklustag analysiert. Stattdessen erkennt man dieselbe flache Verteilung wie bei einmaligen Kopulationen von Rhesusaffen und Pavianen.

EINE BESONDERHEIT BEI DER FORTPFLANZUNG HÖHERER PRIMATEN IST ZWEIFELLOS, dass Kopulationen bei vielen Affen und Menschenaffen sowie beim Menschen während eines Großteils des Eierstockzyklus zur Empfängnis führen können. Einen neuen Blickwinkel auf dieses Sondermerkmal bescherte uns eine überraschende Quelle. In einem wegweisenden Artikel aus dem Jahr 1982 untersuchte der Zoologe Richard Kiltie die Dauer der Trächtigkeit bei fast 50 Säugetierarten und entdeckte eine durchschnittliche Schwankung von plus/minus drei Prozent. Seine Untersuchung betraf übrigens auch fünf Primatenarten — zufällig nur höhere Primaten — deren Trächtigkeitdauer stärker variierte. Davon fasziniert, stellte ich meine eigenen Aufzeichnungen der Trächtigkeitdauer von Säugetieren zusammen. Bei 27 Nichtprimaten betrug die Standardabweichung etwa zwei

Prozent, und das Gleiche galt für 12 Halbaffenarten. Dagegen war die Standardabweichung bei 15 Affen und Menschenaffen mit einem Durchschnittswert von etwa vier Prozent doppelt so hoch.

Für diesen Unterschied gibt es zwei mögliche Erklärungen. Die eine ist, dass die Trächtigkeitsdauer bei höheren Primaten schlichtweg mehr schwankt als bei anderen Säugetieren. Die Trächtigkeitsdauer bei Säugetieren ist jedoch in der Regel außerordentlich exakt, was uns zu der Frage führt, warum es bei Affen und Menschenaffen ungenauer zugeht? Die zweite Möglichkeit ist, dass die größere Schwankung der Trächtigkeitsdauer bei den höheren Primaten ein Artefakt ist, das durch die Methode zur Bestimmung der Beziehung von Kopulation und Empfängnis verursacht wurde. Die Trächtigkeitsdauern, die für höhere Primaten bekannt sind, stammen hauptsächlich aus Beobachtungen von Kopulationen in Gefangenschaft. Bei Säugetieren mit einem klar definierten Östrus, der auch für Halbaffen zutrifft, kann man das Empfängnisdatum ziemlich genau durch Beobachtung der Kopulationen feststellen. Bei den meisten Säugetieren spiegelt die Schwankung der Trächtigkeitsdauer, die auf Basis der Kopulationen ermittelt wurde, in der Regel die tatsächliche Schwankung der Zeitspanne zwischen Empfängnis und Geburt wider. Affen und Menschenaffen aber sind ganz anders. Da Kopulationen oft an mehreren Tagen des Eierstockzyklus stattfinden, weist die Begattung auf keinen präzisen Zeitpunkt der Empfängnis hin. Häufig wird selbstverständlich davon ausgegangen, dass sowohl Eisprung als auch jede Begattung, die zur Befruchtung führt, normalerweise in die Zyklusmitte fallen. Kann eine Kopulation zu einem anderen Zeitpunkt aber auch zur Empfängnis führen, gibt es eine Erklärung für die größere Schwankung der berechneten Trächtigkeitsdauern. Wenn beispielsweise Spermien im weiblichen Genitaltrakt gespeichert werden können, hat man eine Erklärung für die Differenz von mehreren Tagen zwischen der Kopulation und dem Zeitpunkt der Empfängnis. Diese Hypothese führt uns direkt zu einer überprüfbareren Vermutung: Die Variabilität der Trächtigkeitsdauern von Affen und Menschenaffen sollte abnehmen, wenn der Zeitpunkt der Empfängnis mit verlässlicheren Belegen veranschlagt wird.

Ein einfacher Weg, verlässlichere Daten zu bekommen, besteht darin, das Zusammentreffen von Männchen und Weibchen zeitlich zu beschränken. Bei mehreren Untersuchungen von Rhesusaffen hatten zum Beispiel die Weibchen unterschiedlich langen Kontakt mit Männchen. Verbrachten sie

viel Zeit zusammen, war die Trächtigkeitsdauer mit einer Standardabweichung von fast fünf Prozent mehr als doppelt so hoch wie bei anderen Säugetieren. Waren Weibchen und Männchen aber weniger als 15 Minuten pro Tag zusammen, betrug die Schwankung nur noch etwa drei Prozent. Können die Spermien aber irgendwo im weiblichen Genitaltrakt gespeichert werden, kann man auch bei genauer Kenntnis des Zeitpunkts der Kopulation den Zeitpunkt der Empfängnis nicht zuverlässig erkennen.

Anstatt sich auf Beobachtungen von Kopulationen zu verlassen, führen Forscher zunehmend Hormonmessungen durch, um den tatsächlichen Zeitpunkt des Eisprungs zu ermitteln. Die erhöhte Verfügbarkeit exakter Methoden zur Bestimmung des Hormonspiegels in Harn- oder Kotproben erleichterte diese Vorgehensweise bedeutend. Eierstockzyklen und Trächtigkeit können störungsfrei ohne wiederholtes, stressiges Einfangen der Weibchen zur Blutentnahme kontrolliert werden. Erstmals beteiligt war ich an solchen Untersuchungen in den 1970er Jahren an der Zoological Society of London, wo ich zusammen mit dem Fortpflanzungsbiologen Brian Seaton mit Harnproben von Gorillas arbeitete. Danach untersuchte ich gemeinsam mit meinen Kollegen die Hormone in Harnproben verschiedener Primatenarten. Während eines Forschungsprojekts mit bolivianischen Springtamarinen, das vom Fortpflanzungsbiologen Christopher Pryce in Zürich geleitet wurde, benötigten wir genaue Angaben der Trächtigkeitsdauer. Die bisherigen Werte, die auf indirekten Hinweisen — vorwiegend Kopulationsdaten — beruhten, waren widersprüchlich und nicht beweiskräftig. Da bei Springtamarinen Begattungen nur selten und während des ganzen Eierstockzyklus unregelmäßig vorkommen, und sie sich auch während der Trächtigkeit paaren, ist die Kopulation kein zuverlässiger Indikator für den Zeitpunkt der Empfängnis. Dagegen konnten wir durch Hormondaten den Zeitpunkt der Empfängnis auf einen Zeitraum von drei Tagen eingrenzen und eine durchschnittliche Trächtigkeitsdauer von 152 Tagen ermitteln. Die Variationsbreite lag bei lediglich plus/minus zwei Prozent. Mit anderen Worten brachte eine genaue Messung zum Vorschein, dass die Trächtigkeitsdauer bei Springtamarinen nicht mehr schwankt als bei Säugetieren mit einer eindeutigen Brunst.

MENSCHEN DAGEGEN SIND EINE ECHTE HERAUSFORDERUNG, wenn es darum geht, die Schwangerschaftsdauer zu bestimmen. Bei Frauen gibt es kein eindeutig erkennbares Anzeichen für den Eisprung. In medizinischen Kreisen wird die Schwangerschaftsdauer gewöhnlich ab dem ersten Tag der letzten Menstruation vor der Schwangerschaft berechnet. Aufgrund dieses Vorgehens ist die häufig zitierte menschliche Schwangerschaftsdauer von 40 Wochen, bzw. etwas mehr als neun Monaten, nicht mit der Trächtigkeitsdauer anderer Säugetiere vergleichbar, die vom Tag der Empfängnis an berechnet wird. Angesichts der üblichen Annahme, dass die Befruchtung normalerweise am vierzehnten Tag des Menstrualzyklus stattfindet, liegt die durchschnittliche Dauer einer Schwangerschaft beim Menschen bei etwa 38 Wochen. In einem Bericht aus dem Jahr 1950 analysierten die Ärzte J. R. Gibson und Thomas McKeown das komplette Datenmaterial des Jahres 1947 von mehr als 17.000 schwangeren Frauen aus der englischen Stadt Birmingham. Dabei berücksichtigten sie nur Fälle, die zu normalen Einzelgeburten führten. Bei der Berechnung der Schwangerschaftsdauer ab der letzten Menstruation kam ein Durchschnitt von etwas mehr als 280 Tagen heraus, und die Standardabweichung lag bei etwas mehr als plus/minus 5,5 Prozent. Ungeachtet der riesigen Stichprobe ist dies eine der größten Schwankungsbreiten, die jemals bei höheren Primaten und somit Säugetieren im Allgemeinen ermittelt wurde.

Wie bei den nicht-menschlichen Primaten bekommt man durch eine präzisere Bestimmung des wahrscheinlichen Zeitpunkts der Empfängnis auch präzisere Angaben zur menschlichen Schwangerschaftsdauer. Zum Beispiel konnte in einer Studie von R. Dyroff aus dem Jahr 1939 bei Schwangerschaften, die aus Heimatbesuchen von Soldaten resultierten, die Schwankung auf plus/minus 4,5 Prozent reduziert werden. Bei einer späteren Untersuchung wurde die Schwankungsbreite sogar noch weiter auf etwa 3,5 Prozent reduziert. Der Rückgang der geschätzten Schwangerschaftsdauer weist übrigens darauf hin, dass die Angaben der Frauen ziemlich zuverlässig waren.

Verfahren zur Behandlung von Unfruchtbarkeit liefern noch genauere Informationen zur menschlichen Schwangerschaftsdauer. In den letzten Jahrzehnten wurden Millionen Frauen durch medizinische Eingriffe wie künstliche Besamung und In-vitro-Fertilisation schwanger. Das eröffnete die einmalige Gelegenheit, die Schwangerschaftsdauer beim Menschen präziser zu bestimmen. Leider hat die Beantwortung dieser Frage für viele Fertilitäts-

spezialisten keine Priorität, wodurch enorme Mengen von Rohdaten bisher unveröffentlicht blieben. Glücklicherweise lernte ich den Geschäftsführer der Fertility Centers of Illinois, Howard Hamilton, über Freunde kennen, während ich dieses Buch schrieb. Diese Organisation ist bei weitem die größte, die sich in Illinois um die Behandlung von Unfruchtbarkeit kümmert, und eine Führung durch ihre hochmoderne Einrichtung in Chicago machte mich schlicht sprachlos.

Sowohl Dr. Hamilton als auch die Reproduktionsmediziner Kevin Lederer und Aaron Lifchez nahmen meinen Vorschlag, ihre Daten im Hinblick auf die mögliche Speicherung von Spermien zu analysieren, sehr positiv auf. Dr. Lifchez wies sogar auf einen entscheidenden Punkt hin, den ich übersehen hatte. Heutzutage bevorzugen Fertilitätsspezialisten für die künstliche Besamung eine Methode namens intrauterine Insemination, um den Samen direkt in die Gebärmutter zu injizieren, da die Erfolgsquote dadurch gesteigert wird. Dr. Lifchez stellte scharfsinnig fest, dass bei einer intrauterinen Insemination der Gebärmutterhals umgangen wird, wodurch es keine Verzögerung mehr zwischen Insemination und Empfängnis geben sollte. Dementsprechend könne man davon ausgehen, dass eine Analyse der Daten nicht nur bei der In-vitro-Fertilisation, sondern auch der intrauterinen Insemination präzisere Werte der tatsächlichen Dauer der menschlichen Schwangerschaft — von der Empfängnis bis zur Geburt — liefern würde. Nach Erledigung aller Maßnahmen zum Schutz der ärztlichen Schweigepflicht durfte ich zusammen mit meiner Praktikantin Hannah Koch einen umfangreichen Datensatz aus den Fertility Centers of Illinois auswerten.

Sehr schnell stießen wir aber auf ein unvorhergesehenes Problem. Nach intrauteriner Insemination und In-vitro-Fertilisation kommt es deutlich häufiger zu Frühgeburten, und dies liegt vermutlich daran, dass bei diesen Verfahren die normale Filterwirkung des Gebärmutterhalses umgangen wird. Infolgedessen ist der Zeitraum zwischen Empfängnis und Geburt variabler, weshalb wir die Schwankung der Schwangerschaftsdauer nicht zur Präzisierung verwenden konnten. Glücklicherweise ist es möglich, dieses Problem zu vermeiden, indem man den Zusammenhang zwischen Geburtsgewicht und dem Zeitraum zwischen Besamung bzw. Befruchtung und Geburt untersucht. Im Prinzip sollte das Gewicht eines Neugeborenen immer mehr zunehmen, je länger er in der Gebärmutter war. Das Geburtsgewicht hängt jedoch nur schwach mit der Schwangerschaftsdauer zusammen, wenn diese

ab dem ersten Tag der letzten Menstruation berechnet wird. Das ist eines der auftretenden Probleme, wenn der Zeitpunkt der Empfängnis nicht zuverlässig bekannt ist. Bei der In-vitro-Fertilisation kann der Zeitpunkt der Empfängnis dagegen exakt datiert werden. Als wir die Daten von etwa 300 Fällen analysierten, zeigte sich dann auch, dass der Zusammenhang zwischen Geburtsgewicht und dem Zeitraum zwischen In-vitro-Fertilisation und Geburt viel stärker und hochsignifikant ist. Es zeigte sich eine klare Tendenz, dass das Geburtsgewicht in starkem Zusammenhang zur Aufenthaltsdauer in der Gebärmutter steht, sofern das genaue Datum der Empfängnis bekannt ist. Danach konnten wir auch auf die Frage eingehen, die Dr. Lifchez aufgeworfen hatte. Die Analyse von fast 100 Fällen ergab, dass der Zusammenhang zwischen Geburtsgewicht und dem Zeitraum zwischen intrauteriner Insemination und Geburt genauso stark ist wie bei der In-vitro-Fertilisation. Dies lässt vermuten, dass im Gebärmutterhals in der Tat Spermien gespeichert werden, und dass nach einer Besamung direkt in der Gebärmutter relativ rasch die Empfängnis erfolgt.

DIE BESTIMMUNG DES ZEITPUNKTS MENSCHLICHER EMPFÄNGNIS ist zum Teil deshalb so schwierig, weil es kein extern sichtbares Zeichen für den weiblichen Eisprung gibt. Viele Autoren behaupteten, dass dieser »versteckte« Eisprung nur beim Menschen vorkommt. Obwohl Schimpanzen und verschiedene Altweltaffen in der Tat auffällige, äußerlich sichtbare Sexuelschwellungen aufweisen, die den ungefähren Zeitpunkt des Eisprungs kennzeichnen, fehlt bei der großen Mehrzahl der Primatenarten jegliches äußerliche, physische Anzeichen. Weder bei Halbaffen noch bei Neuweltaffen findet man Sexuelschwellungen, und Schimpansen sind die einzigen Menschenaffen, die auffällige Sexuelschwellungen haben. Tatsächlich kommen Sexuelschwellungen so selten vor, dass sie von Zoobesuchern falsch interpretiert werden. Sowohl in London als auch in Zürich zeigte mir der zuständige Zookurator wütende Briefe von Besuchern, die eine chirurgische Entfernung dieser unansehnlichen Geschwülste vom Hinterteil weiblicher Schimpansen verlangten. Solche Schwellungen sind aber völlig normal, und männliche Schimpansen finden sie vermutlich ganz attraktiv.

In Wirklichkeit ähneln die meisten höheren Primaten dem Menschen, indem sie kein äußerlich sichtbares Anzeichen für den Eisprung aufweisen.

Obendrein häufen sich die Indizien, dass sogar die scheinbar vorhandenen äußeren Anzeichen des Eisprungs bei höheren Primaten nicht verlässlich sind. Bei Halbaffen ist der Zeitpunkt des Eisprungs zumindest indirekt offensichtlich, da sie wie andere Säugetiere einen eng eingegrenzten Östrus haben. Bei höheren Primaten dagegen ist der versteckte Eisprung eher die Regel als die Ausnahme. Der versteckte Eisprung ist ein Merkmal, das wie die ausgiebigere Kopulation während des Eierstockzyklus und die größere Schwankung des Zeitraums zwischen Kopulation und Geburt wahrscheinlich schon beim gemeinsamen Vorfahren der höheren Primaten vorhanden war. Die wirklich interessante Frage lautet dann, warum diverse Altweltaffen und Schimpansen offensichtliche Sexuelschwellungen aufweisen, die in der Tat ein äußerliches Anzeichen für den ungefähren Zeitpunkt des Eisprungs sind. Aber das ist eine andere Geschichte.

Eine Besonderheit des menschlichen Paarungsverhaltens, die mit dem Zeitpunkt der Empfängnis während des Zyklus zusammenhängt, bleibt noch zu diskutieren. Es handelt sich um Schwankungen des Sexualtriebs und der sexuellen Aktivität von Frauen im Verlauf des Eierstockzyklus.

ÜBER DEN ANGEBLICH EINZIGARTIGEN VERLUST DES ÖSTRUS beim Menschen wurde viel geschrieben. Gleichzeitig versuchte man hartnäckig, zumindest Überreste der zyklischen Schwankung des Sexualtriebs zu entdecken. Zwar kann es beim Menschen praktisch jederzeit zur Kopulation kommen, aber trotzdem gibt es während des Zyklus ein klares Muster hormoneller Veränderungen. Dieses Muster ist vergleichbar mit dem der Halbaffen und verschiedener anderer Säugetiere mit einem deutlichen Östrus. Aus verschiedenen Gründen schlucken Millionen Frauen heutzutage natürliche oder synthetische Steroidhormone, über deren möglichen Auswirkungen auf die Sexualität und das sexuelle Verhalten wissen wir aber nur wenig. Um zyklische Veränderungen des Sexualverhaltens aufzudecken, müssen wir die Veränderungen verstehen, die mit dem hormonellen Muster des menschlichen Zyklus einhergehen.

1933 veröffentlichte der Anatom Georgios Papanicolaou eine faszinierende Studie über die Veränderungen in der menschlichen Scheide während des Zyklus, die lange Zeit nicht beachtet wurde. 16 Jahre zuvor hatte er mit seinem Kollegen Charles Stockard eine neue Methode zur Untersuchung

des Eierstockzyklus bei weiblichen Hamstern eingeführt, bei der die Zellen in einer flüssigen Probe aus der Scheide entnommen wurden. Diese Flüssigkeit, die normalerweise eine schleimige Konsistenz hat, enthält von der Scheidenwand abgesonderte Zellen sowie rote und weiße Blutkörperchen und zahlreiche Bakterien. Dieser Scheidenabstrich, wie er genannt wird, weist bei verschiedenen Säugetieren zuverlässig auf den Zeitpunkt des Eisprungs hin. Berühmt wurde Papanicolaou später wegen einer ähnlichen Entdeckung: Er fand heraus, dass man mit einer Stichprobe von Zellen am Gebärmutterhals — einem Zervixabstrich — frühzeitig eine Krebserkrankung erkennen kann. Gemeinsam mit Herbert Traut veröffentlichte er 1943 die bahnbrechende Monographie *Diagnosis of Uterine Cancer by the Vaginal Smear*. Der darin eingeführte »Pap-Abstrich« wird heutzutage weltweit verwendet.

Obwohl Papanicolaous Name wegen seines Tests bis heute weiterlebt, ist seine informative Veröffentlichung aus dem Jahr 1933 über die Untersuchung des weiblichen Menstrualzyklus durch Scheidenabstriche gänzlich in Vergessenheit geraten. Abgesehen von vereinzelten Spezialfällen war es in den vergangenen 30 Jahren Standard, die Zyklen hormonell zu untersuchen und nicht mit Scheidenabstrichen. Papanicolaous Entdeckungen sind jedoch immer noch relevant. Die Veränderungen der Scheidenabstriche im Verlauf des Eierstockzyklus schwanken beim Menschen zwar mehr als bei vielen anderen Säugetieren, ein grundlegendes Muster ist aber dennoch zu erkennen. Mithilfe seiner Ergebnisse von mehr als 1.000 individuellen Abstrichen konnte Papanicolaou den weiblichen Menstrualzyklus in vier grundlegende Phasen unterteilen: eine Anfangsphase vom ersten Tag der Menstruation bis zum siebten Zyklustag, eine »kopulative Phase« zwischen Tag acht und Tag zwölf, eine anschließende Vermehrungsphase, die bis Tag 17 dauert und eine prämenstruale Phase ab Tag 18 bis zum Beginn der nächsten Menstruation. Scheidenabstriche während der kopulativen Phase weisen ein Muster auf, das mit dem von Nagetieren während der Begattungsperiode vergleichbar ist. Kennzeichnend dafür ist unter anderem, dass in reichlichen Mengen flache Zellen und Schleim von der Scheidenwand abgesondert werden.

Papanicolaou stellte ausdrücklich einen Zusammenhang zwischen der kopulativen Phase vom achten bis zwölften Tag und Befunden her, dass es vor allem während dieses Zeitraums zur Befruchtung kommt. Er vermerkte

konkrete Belege für einen Höhepunkt des Sexualtriebs im Zeitraum nach der Menstruation, der seiner kopulativen Phase entspricht. Allerdings tauchten widersprüchliche Schilderungen über den Zeitpunkt des Höhepunkts im Zyklus auf — während einige Autoren diesen direkt vor der Menstruation ansetzten, verorteten ihn andere sowohl vor als auch nach der Menstruation. Marie Stopes beispielsweise, die als wegweisende schottische Frauenrechtlerin 1921 die erste britische Familienberatungsstelle eröffnete, nannte zwei Höhepunkte. Ihr einflussreiches Buch *Married Love* aus dem Jahr 1918 (in den Vereinigten Staaten bis 1931 verboten) enthielt ein Schema, laut dem das sexuelle Verlangen bei gesunden Frauen den ersten Höhepunkt zwei oder drei Tage vor der Menstruation und den zweiten Höhepunkt acht bis neun Tage nach der Menstruation aufweist.

Ein Meilenstein zu diesem Thema war auch die Veröffentlichung eines wissenschaftlichen Artikels von Robert McCance und Elsie Widdowson im Jahr 1937. Sie verwendeten Standardfragebögen, um die Beziehung zwischen den Hormonen und der Psychologie während des Menstrualzyklus zu erforschen. Wenig überraschend, stieß diese Umfrage auf Widerstand, als sie vor 75 Jahren durchgeführt wurde. Laut den Autoren »nahmen einige Leiter medizinischer Fakultäten Anstoß an den Formularen, weil sexuelle Gefühle bei ledigen Studentinnen anormal wären, und verboten die Verteilung in ihren Instituten.« Trotz dieses Widerstands war es letztlich möglich, Angaben zu fast achthundert vollständigen Zyklen von etwa 200 Frauen zu sammeln, von denen mehr als die Hälfte ledig waren. Verheiratete Frauen berichteten innerhalb der Studie, dass sie pro Zyklus im Durchschnitt fünfmal Koitus hatten, wobei das Maximum bei 18 Malen lag. Bemerkenswert war der Befund, dass der Höchstwert der Kopulationen auf den achten Tag des Zyklus, also in die Mitte der Follikelphase fiel. Entgegen der Erwartung stimmte der Höchstwert also nicht mit dem wahrscheinlichsten Zeitpunkt des Eisprungs am vierzehnten Tag überein. McCance und Widdowson kommentierten diesen Widerspruch mit einer Prophezeiung: »Wenn ... menschliche Spermien kaum mehr als zwei Tage im weiblichen Genitaltrakt überleben können, ist schwer zu verstehen, warum zwischen der Phase der maximalen weiblichen Lust und dem Zeitpunkt des Eisprungs sieben Tage liegen sollten.«

NACH EINER MEHR ALS ZWANZIGJÄHRIGEN UNTERBRECHUNG tauchte die Frage der zyklischen Schwankung des sexuellen Verlangens der Frau wieder als beliebtes Thema wissenschaftlicher Untersuchungen auf. Besonders erwähnenswert sind mehrere Veröffentlichungen der Gesundheitswissenschaftler Richard Udry und Naomi Morris. Nach zahlreichen Datenanalysen konnten sie einen Höhepunkt des weiblichen sexuellen Verlangens während der Follikelphase feststellen. In einem 1971 erschienenen Artikel analysierte der Biologe William James die Daten aus den Untersuchungen von McCance und Widdowson und von Udry und Morris erneut und konnte ihre Ergebnisse bestätigen.

1982 veröffentlichten die Psychiater Diana Sanders und John Bancroft eine wichtige Studie über die Beziehung zwischen weiblicher Sexualität und Menstrualzyklus. Ihre Übersicht enthielt eine Zusammenfassung eigener Untersuchungen von mehr als 50 Frauen, deren Stimmungen und sexuelles Verhalten sie anhand regelmäßig geführter Tagesbücher auswerteten. Zur Bestimmung der Zyklusphasen untersuchten sie die Hormone mit Blutproben, die etwa jeden zweiten Tag genommen wurden. Die sexuelle Aktivität mit dem Partner wies ein zyklisches Muster mit einem signifikanten Höhepunkt in der Mitte der Follikelphase auf, der vom sechsten bis zum zehnten Tag andauerte. Eine damit verbundene Messung der sexuellen Gefühle brachte einen ähnlichen Höhepunkt in der Mitte der Follikelphase zum Vorschein, außerdem wurde aber noch ein zweiter Höhepunkt während der späten Lutealphase, also kurz vor der Menstruation festgestellt. Einige Frauen gaben auch an, ob sie oder ihr Partner die sexuelle Aktivität initiiert hatten. Dass die Initiative von der Frau oder beiden Partnern ausging, war ebenfalls in der Mitte der Follikelphase wahrscheinlicher. Im Gegensatz ging während der Lutealphase die Initiative häufiger vom männlichen Partner aus. Unterm Strich lieferte diese Untersuchung Hinweise, dass das sexuelle Interesse und die sexuelle Aktivität in der Mitte der Follikelphase zunimmt. Einige Belege deuteten auch auf eine Zunahme des sexuellen Interesses in der späten Lutealphase hin, aber nichts darauf, dass es einen Höhepunkt in der Mitte des Zyklus zum Zeitpunkt des Eisprungs gibt.

Bei ihren Untersuchungen des Zusammenhangs von sexuellem Verlangen und Menstrualzyklus wählten der Psychologe Harold Stanislaw und der Biologe Frank Rice einen anderen Ansatz. Sie stellten fest, dass in früheren Studien oft die Verteilung des Geschlechtsverkehrs innerhalb des Zyklus

überprüft worden war. Zwar wurde oft berichtet, dass es direkt nach Ende der Menstruation am häufigsten zur Kopulation kommt, doch könnte dies daher rühren, dass die meisten Paare während der Menstruation auf Geschlechtsverkehr verzichten. Die Häufigkeit der Kopulation kann auch durch andere Faktoren wie den Wochentag, einen willigen Partner, männliche Initiative und die bewusste Vermeidung des Geschlechtsverkehrs im Bereich der Zyklusmitte als Verhütungsmaßnahme beeinflusst werden. All diese Faktoren können den Zusammenhang zwischen der Häufigkeit des Geschlechtsverkehrs und den zyklischen Schwankungen der weiblichen Hormone schmälern. Deshalb entwickelten Stanislaw und Rice eine zukunftsweisende Studie, bei der das Verhältnis von sexuellem Verlangen und Erhöhung der basalen Körpertemperatur, die häufig auf den Eisprung hinweist, aufgezeichnet werden konnte. Sie fanden heraus, dass in jedem Zyklus das sexuelle Verlangen gewöhnlich einige Tage vor dem wahrscheinlichen Datum des Eisprungs einsetzt.

Untersuchungen des Zusammenhangs von sexuellem Verlangen und weiblichem Zyklus lieferten unterschiedliche Ergebnisse. Da es mehrere Störfaktoren gibt, war nichts anderes zu erwarten. In den meisten Fällen wurde der Zeitpunkt des Eisprungs nicht direkt ermittelt, sondern bloß annähernd geschätzt. Trotzdem kann man die Veränderung einiger allgemeiner Tendenzen erkennen, wenn Frauen orale Kontrazeptiva nehmen. Ohne Einnahme von Steroidhormonen weist der weibliche Sexualtrieb meist einen Höhepunkt in der Woche nach dem Ende der Menstruation (Tage 8 bis 14) auf, dem manchmal ein sekundärer Höhepunkt in der Woche vor der nächsten Menstruation (Tage 22 bis 28 in einem vierwöchigen Zyklus) folgt. Obwohl es innerhalb des Zyklus Tendenzen des sexuellen Interesses gibt, besteht kein offensichtlicher Zusammenhang mit zirkulierenden Hormonen. Der prämenstruale Höhepunkt des Sexualtriebs konnte bisher nicht erklärt werden. Aber der Höhepunkt in der Mitte der Follikelphase und die kopulative Phase, die Papanicolaou mit Scheidenabstrichen entdeckte, fallen etwa auf den gleichen Zeitraum. Wie wir gesehen haben, weisen zahlreiche Einzelfälle darauf hin, dass es in der Woche nach Ende der Menstruation am häufigsten zur Befruchtung kommt. Zufall? Ich denke nicht.

KAPITEL 4

Lange Schwangerschaften und schwierige Geburten

2006 wurde im The Field Museum von Chicago die Dauerausstellung *Evolving Planet* eröffnet. Seither nutzte ich jede Gelegenheit, um einen Rundgang durch die Geschichte unseres irdischen Lebens zu machen. Zu meinen Lieblingsfossilien in der Ausstellung zählt ein hervorragend erhaltener Rochen, der aus 50 Millionen Jahre alten Seeablagerungen in Wyoming stammt. Durch sachkundige Präparierung wurde nicht nur das Skelett eines erwachsenen Weibchens, sondern auch das eines Jungtiers in seinem Leib freigelegt. Rochen und Haie gehören zu einer kleinen Gruppe von Fischarten, die anstatt Eier zu legen, lebende Jungtiere gebären. Lebhaft erinnere ich mich auch an meine erste Begegnung mit einem fossilisierten trächtigen Ichthyosaurier, die ich vor vielen Jahren im Londoner Natural History Museum machte. Ichthyosaurier sind delphinartige Reptilien, die vor 90 bis 250 Millionen Jahren im Meer lebten und etwa 25 Millionen Jahre vor den Dinosauriern ausstarben. In der Vergangenheit wurden viele Skelette trächtiger Ichthyosaurier entdeckt. Rochen und Ichthyosaurier sind zwei Beispiele von Wirbeltieren, die wie die Säugetiere lebende Jungtiere gebären. Tatsächlich tragen, von den Säugetieren abgesehen, über 100 gegenwärtig lebende Arten, darunter verschiedene Fischen, einige Lurche (beispielsweise die Alpensalamander) und unter den Reptilien ziemlich viele Eidechsen und Schlangen ihre Jungtiere aus. Außerhalb der Säugetiere ist diese Form der Fortpflanzung aber immer ein seltenes Phänomen geblieben, das bei Vögeln sogar nie vorkommt. Angesichts des hohen Energieverbrauchs und des hohen Auf-

wands, der mit einer Trächtigkeit verbunden ist, muss man sich allerdings die Frage stellen, wie sich dieser Fortpflanzungsmodus überhaupt entwickeln konnte?

Die Jungen von Säugetieren haben generell einen tollen Start ins Leben, weil ihre Mütter sie mit Nahrung versorgen und ihnen einen warmen Platz zum Wachsen bieten. Die einzigen Ausnahmen sind einige australasiatische Kloakentiere (Schnabeltiere und Ameisenigel), die sich noch an die uralte Tradition des Eierlegens klammern. Bei der überwiegenden Mehrheit der Säugetiere — nämlich bei sämtlichen Beuteltieren und Plazentatieren — bleibt das befruchtete Ei in der Gebärmutter der Mutter, wo es sich entwickelt. Der Ursprung der Lebendgeburten bei Säugetieren geht vermutlich mindestens 125 Millionen Jahre auf die gemeinsamen Vorfahren der Beuteltiere und Plazentatiere zurück. Obwohl es heute keine überlebenden Verwandten mehr von ihnen gibt, bewohnten mehr als 100 Millionen Jahre lang nagetierähnliche Multituberculata den Planeten, die eigenartige Molarzähne mit zahlreichen Höckerchen besaßen. Sie starben schließlich vor etwa 40 Millionen Jahren aus. Da ihr kleines Becken vorne zusammengewachsen war, kam die führende Paläontologin Zofia Kielan-Jaworowska zu dem Schluss, dass sie keine Eier legen konnten, die ausreichend Dotter für die Entwicklung außerhalb des Mutterleibs enthielten, und stattdessen kleine lebende Jungtiere gebären mussten. Anders gesagt, ist es möglich, dass die Anfänge der menschlichen Schwangerschaft mehr als 140 Millionen Jahre zurückliegen.

Die menschliche Schwangerschaft hat also eine sehr lange Evolutionsgeschichte hinter sich. Wie bei anderen Aspekten der menschlichen Fortpflanzung kann die historische Erforschung die entscheidenden Fragen in den Vordergrund rücken und gelegentlich sogar beantworten. Unser Immunsystem beispielsweise entwickelte sich so, dass es fremde Proteine in unserem Körper erkennen und beseitigen kann. An diesem Punkt stellt sich die Frage, warum ein Embryo, der ein fremdartiger Eindringling mit vielen anderen Proteinen ist, von der Gebärmutter einer schwangeren Frau nicht abgestoßen wird? Diese Frage ist besonders passend, weil die menschliche Plazenta (Mutterkuchen) tief in die Gebärmutterwand eindringt, und es somit wenige Hindernisse gibt, die das Eindringen von fremden Proteinen des Embryos in den Blutkreislauf der Mutter verhindern können. Das ganze Thema steht im engen Zusammenhang mit dem invasiven Zustand der menschlichen Pla-

zenta, der im Allgemeinen als Anpassung für einen effizienteren Austausch zwischen Mutter und Embryo gedeutet wird, der wiederum mit der Entwicklung unseres sehr großen Gehirns in Verbindung gebracht wird. Aber ist diese Erklärung überzeugend? Hier hat man ein Prachtbeispiel, wann Vergleiche mit anderen Primaten und allen anderen Säugetieren wertvolle Hinweise liefern können. Hinzu kommen grundlegende Fragen zur Länge der menschlichen Schwangerschaft. Wie im vorherigen Kapitel dargelegt, berechnen Ärzte die Dauer der Schwangerschaft traditionell ab dem Anfang der letzten Menstruation, da der Eisprung schwer nachzuweisen ist. Eine derartige Methode erlaubt nur eine grobe Prognose des vermutlichen Geburtsdatums. Gibt es eine bessere Vorgehensweise? Schließlich kann das Verständnis der Evolutionsgeschichte ja sogar die Ursprünge solcher merkwürdiger Aspekte wie der Schwangerschaftsübelkeit, der Geburtszeit und des Auffressens der Plazenta bei Säugetieren erhellen.

LEBENDGEBURTEN BERGEN ZWEI GROSSE VORTEILE. Zunächst profitiert die Entwicklung des Säuglings vom Schutz einer sicheren Kammer mit geregelter Temperatur. Zweitens werden die Ressourcen mit hoher Effizienz direkt von der Mutter an den Nachwuchs weitergegeben. Im Vergleich dazu ist das Eierlegen in einem Nest mit großem Ressourcen- und Energieverlust verbunden. Selbst gewissenhafte Vogeleltern riskieren, dass ihre Eier bei einer Störung abkühlen oder gar gestohlen werden. Außerdem ist es weniger effizient, die mütterliche Versorgung in einen großen Dotter umzuwandeln, der anschließend nach dem Legen des Eis zur Produktion des Jungtiers wieder verwertet werden muss. Wenn eine Lebendgeburt aber so viele offensichtliche Vorteile bietet, warum legen dann die meisten anderen Wirbeltiere Eier (Oviparie) anstatt wie Beuteltiere und Plazentatiere ihren Nachwuchs lebend zur Welt zu bringen? Die natürliche Selektion kann lediglich Merkmale filtern, die durch zufällige Mutation und Rekombination entstehen. Daher muss eine zufällige Entwicklung zur Lebendgeburt bei frühen Säugetieren geführt haben, die sich dann aufgrund bestimmter Vorteile als universelles Merkmal bei Beuteltieren und Plazentatieren etablierte.

Die natürliche Selektion musste aber auch mehrere Hindernisse überwinden, bevor die Lebendgeburt zum dominanten Muster werden konnte.

Sobald ein Säugetierembryo eine enge Verbindung mit der Innenwand der Gebärmutter eingeht, entstehen Kompatibilitätsprobleme zwischen der Mutter und ihrem Jungen. Da die Hälfte der Gene des Embryos vom Vater kommt, werden viele Proteine erzeugt, die sich von denen der Mutter unterscheiden. Die intime Verbindung von Mutter und Embryo erhöht die Effizienz die Nahrungsübertragung, erhöht aber gleichzeitig die Anforderungen an ihr Immunsystem. Da die natürliche Reaktion des Körpers der Mutter darin besteht, die fremden Proteine anzugreifen und zu beseitigen, sind spezielle Anpassungen notwendig, damit ihr Immunsystem den Embryo nicht abstößt.

Beuteltiere und Plazentatiere bringen ihre Nachkommen aber nicht nur lebend zur Welt, sondern haben auch die Eigenart, ihren Nachwuchs zu säugen. Da die eierlegenden Kloakentiere ihre Nachkommen ebenfalls säugen, muss die Evolution von Lebendgeburten später stattgefunden haben. Möglicherweise ist die Lebendgeburt mit anschließendem Säugen eine Kombination, die im Tierreich nicht nur einzigartig, sondern auch ideal ist. Sie bedeutet aber auch eine einzigartige Belastung für das Weibchen, da es sowohl für die Schwangerschaft als auch für das Säugen zuständig ist und dabei keine direkte Hilfe vom Männchen bekommt.

* * *

BEVOR WIR MEHR ÜBER DIE EVOLUTION VON LEBENDGEBURTEN erfahren, müssen wir zuerst die Geschichte der Gebärmutter erkunden, denn in ihr hat alles ihren Ursprung. Fische, Lurche, Reptilien und Vögel haben normalerweise keine Gebärmutter, sondern lediglich Eileiter, mit denen ihre Eier an die Außenwelt befördert werden. Nur Säugetiere haben eine richtige Gebärmutter. Bei den eierlegenden Kloakentieren ist das untere Ende des Eileiters erweitert, die dadurch gebildete Struktur wird manchmal als Gebärmutter bezeichnet. Eine eindeutig entwickelte Gebärmutter haben aber nur die Beuteltiere und die Plazentatiere.

Wie die meisten anderen Körpersysteme sind auch die Fortpflanzungsorgane jedes Säugetierweibchens auf der rechten und linken Seite mehr oder weniger spiegelbildlich ausgebildet. Auf beiden Seiten wird aus einer Röhre, die vom Eierstock nach außen führt, ein weiblicher Genitaltrakt mit Eileiter,

Gebärmutter und Scheide gebildet. Zunächst entwickeln sich der rechte und linke Trakt unabhängig voneinander, später können sie sich aber in unterschiedlichem Ausmaß verbinden. Bei sämtlichen Plazentatieren zum Beispiel werden die linke und die rechte Scheidenröhre an der Körpermittellinie zu einer Scheide vereint. Beuteltiere jedoch sind ganz anders: Bei ihnen bleiben die linke und die rechte Scheidenröhre bestehen, und dazwischen wird ein spezieller Geburtskanal gebildet.

Von der Scheide abgesehen, bleiben bei Säugetieren im übrigen weiblichen Genitaltrakt gewöhnlich zwei weitgehend getrennte Hälften erhalten. Beuteltiere und die meisten Plazentatiere haben linke und rechte Gebärmutterkammern, die jeweils mit einem eigenen Eileiter verbunden sind. Eine derart doppelte »zweihörnige« Gebärmutter existiert auch bei den größten Plazentatieren wie den Nashörnern, Elefanten und Walen. Bei einigen Plazentatieren gibt es jedoch eine besondere Anordnung: Statt zwei voneinander getrennten linken und rechten Kammern haben sie nur eine einzige auf der Mittellinie. Höhere Primaten — Affen, Menschenaffen und Menschen — haben eine solche Gebärmutter mit nur einer Kammer, und dasselbe trifft auch auf Faultiere, Gürteltiere und einige Fledermäuse zu. Im Gegensatz sind dazu alle Halbaffen — Lemuren, Loris und Koboldmakis — primitiv geblieben und haben wie die meisten anderen Säugetiere zwei Gebärmutterkammern behalten. Demzufolge handelt es sich bei der Gebärmutter mit einer Kammer der höheren Primaten offensichtlich um eine evolutionäre Neuentwicklung, die auf den gemeinsamen Vorfahren vor etwa vierzig Millionen Jahren zurückgeht.

Im Einklang mit ihrer Abstammung vom gemeinsamen Vorfahren der höheren Primaten haben Menschen normalerweise eine Gebärmutter mit nur einer Kammer. Das Verständnis des evolutionären Hintergrunds ist in diesem Fall von medizinischer Bedeutung, weil gelegentlich Fehler bei der Entwicklung auftreten. Während seiner Entwicklung folgt der menschliche Genitaltrakt vorerst dem uralten Muster anderer Säugetiere. Wie bei einem Rückgriff auf ein früheres Stadium der Evolution kommt es manchmal vor, dass die Verbindung der linken und rechten Hälfte ausbleibt. Eine Gebärmutter mit zwei Kammern ist selten und kommt bei erwachsenen Frauen nur einmal in 3.000 Fällen vor. In solchen Fällen ist die Scheide ebenfalls zweigeteilt. Bemerkenswert ist, dass eine Frau mit zwei Gebärmutterkammern eine relativ normale Schwangerschaft haben und sogar Mehrlings-

geburten zur Welt bringen kann. Allerdings kommt es dabei häufiger zu Komplikationen wie Frühgeburten.

Da eine Gebärmutter mit nur einer Kammer bei Säugetieren sehr selten vorkommt, muss bei ihrer Evolution ein besonderer Selektionsdruck geherrscht haben. Wahrscheinlich besteht ein Zusammenhang zu der Tatsache, dass höhere Primaten auf Einzelgeburten ausgerichtet sind. Wie wir in Kapitel 7 sehen werden, haben sie beispielsweise alle nur ein Paar Zitzen, und jede Säugetierart hat in der Regel ein Paar für jedes geborene Jungtier. Wirft man einen Blick über die Primaten hinaus, stellt man fest, dass Faultiere ebenfalls nur ein Jungtier gebären. Scheinbar liefern Gürteltiere ein Gegenbeispiel, da sie trotz einer Gebärmutter mit nur einer Kammer Mehrlingsgeburten zur Welt bringen. Allerdings liegt hier eine ungewöhnliche Wendung vor. Alle Nachkommen eines Gürteltierwurfs sind Klone, die durch mehrmalige Teilung nur eines befruchteten Eis erzeugt werden. Dies bedeutet, dass der gemeinsame Vorfahre der Gürteltiere vermutlich auf Einzelgeburten ausgerichtet war. Das einzigartige Muster mit Klonen war vermutlich das Ergebnis späterer Selektion, die Mehrgeburten bevorzugte, um die Vermehrungsquote zu erhöhen. Die abstammungsgeschichtliche Anpassung auf nur ein Jungtier kann daher zum Teil die Entstehung einer Gebärmutter mit nur einer Kammer erklären, aber nicht vollständig. Obwohl einige Halbaffen jeweils zwei bis vier Jungtiere gebären können, sind bei den meisten Arten Einzelgeburten die Regel, und viele haben nur ein Paar Zitzen. Neben gewissen Halbaffen bringen viele andere Säugetiere ihre Jungen normalerweise einzeln auf die Welt und haben auch nur zwei Zitzen, haben aber trotzdem meist weiterhin eine Gebärmutter mit zwei Kammern.

Um den genauen evolutionären Verlauf bis zur Gebärmutter mit nur einer Kammer zu rekonstruieren, müssen wir die Zwischenstufen kennen. Zwar gibt es bei Primaten keine Zwischenstufen, bei bestimmten Fledermausarten aber schon. Der erste wesentliche Punkt ist, dass alle Fledermause, die eine Gebärmutter mit nur einer Kammer oder eine Zwischenstufe zwischen einer Kammer und den ursprünglichen zwei Kammern aufweisen, ihre Jungen einzeln zur Welt bringen und nur ein Paar Zitzen haben. In diesem Fall hat sich der Zusammenhang zwischen einer Gebärmutter mit einer Kammer und der Einzelgeburt bestätigt. Verschiedene Fledermausarten weisen verschiedene Zwischenstufen auf, die von einer mäßigen Vergrößerung einer Gebärmutterkammer auf Kosten der anderen bis

zur klaren Dominanz einer Kammer reichen. Eine Frage bleibt jedoch immer noch offen: Warum haben sehr viele Säugetiere, die ihre Jungen einzeln zur Welt bringen und nur ein Paar Zitzen haben, eine Gebärmutter mit zwei Kammern?

BEI SÄUGETIEREN BEGINNT DIE SCHWANGERSCHAFT mit der Empfängnis, bei der ein Spermium das Ei befruchtet. Die Befruchtung findet hoch oben im Eileiter statt in einer leicht wulstigen Region, die Ampulla genannt wird. Der junge Embryo wandert anschließend den Eileiter hinunter bis zur Gebärmutter. Während seiner zehntägigen Wanderung kommt es zu mehreren Zellteilungen. Beim Erreichen der Gebärmutterkammer hat sich der Embryo zu einer hohlen Kugel mit etwa hundert Zellen entwickelt, den man Keimblase (Blastozyste) nennt. Trotz der raschen Zellteilung bleibt die Gesamtgröße unverändert, weil die Mutter keinerlei Nahrung abgibt, bis sich die Keimblase an der Innenwand der Gebärmutter durch sogenanntes Einnisten angelagert hat. Die äußere Zellschicht der Keimblase, der Trophoblast, ist für die ursprüngliche Anlagerung zuständig und kann bei manchen Säugetierarten anschließend in die innere Wand der Gebärmutter eindringen. Dies ist der Anfang der Plazenta, auch Mutterkuchen genannt. Bei Säugetieren sowie den meisten Primaten lagert sich die Keimblase an der Oberfläche an. Bei großen Menschenaffen und beim Menschen gräbt sich die Keimblase jedoch in die Gebärmutterwand hinein, bis sie von einem kleinen Hohlraum umschlossen ist. Ein derartiges Einnisten ist bei Säugetieren äußerst selten. Selbst Wissenschaftler kennen nicht den Grund für dieses Eindringen, es könnte aber sein, dass die Keimblase dadurch einen zusätzlichen Schutz bekommt und zugleich die Entwicklung der Plazenta beschleunigt wird.

Durch das Einnisten entsteht eine direkte Lebensader zwischen Mutter und Embryo. Dies ebnet den Weg für eine effiziente, direkte Nahrungsversorgung und die unverzügliche Beseitigung von Abfallprodukten. An dieser Stelle müssen unbedingt zwei Grundbegriffe geklärt werden, die mit der Entwicklung des Jungen in der Gebärmutter zu tun haben. Die Wörter »Embryo« und »Fötus« werden häufig gleichbedeutend benutzt. Für Fortpflanzungsbiologen haben sie jedoch völlig unterschiedliche Bedeutungen. Die Embryonalphase ist die erste Entwicklungsperiode, während der lang-

sam die verschiedenen Gewebearten und das Grundgerüst des Körpers gebildet werden. Sie fängt mit der Empfängnis und dem Einnisten an und setzt sich dann in der ersten Phase des Austausches durch die Plazenta fort. Der Ausdruck »Fötus« wird erst gebraucht, wenn die einzelnen Hauptorgane des Körpers — Gehirn, Herz, Verdauungstrakt und Urogenitalsystem — erkennbar sind, und gilt dann bis zur Geburt. Im Gegensatz zu einem Embryo ähnelt ein Fötus in seinen Grundzügen weitgehend einem Neugeborenen und unterscheidet sich von diesem hauptsächlich durch die geringere Größe. Beim Menschen dauert die Embryonalphase bis acht Wochen nach der Empfängnis, während das fötale Stadium die verbleibenden 30 Wochen bis zur Geburt beansprucht.

* * *

ALS AUSGANGSPUNKT FÜR DAS THEMA SCHWANGERSCHAFTSDAUER können wir eine Anekdote der Paläoanthropologin Mary Leakey aufgreifen. In ihrem Buch *Disclosing the Past* beschrieb Leakey die Entdeckung eines Teilskeletts des 20 Millionen Jahre alten fossilen Menschenaffen *Proconsul* am 2. Oktober 1948 auf der kenianischen Insel Rusinga. Zu Recht schätzte Leakey dies als einen »absolut aufregenden Fund« ein, »der Humanpaläontologen auf der ganzen Welt erfreuen würde«. Bis zum heutigen Tag ist der *Proconsul* ein wichtiger Zeuge für die frühe Evolution der Gruppe der Menschenaffen und Menschen. Diese großartige Entdeckung hatte eine weitere bedeutende Auswirkung: »Nachdem uns nach unserer Rückkehr in unser Lager in Kathwanga das Ausmaß dieser Entdeckung bewusst geworden war, wollten Louis und ich groß feiern. Wir waren in Hochstimmung und im völligen Einklang miteinander, so dass es uns am schönsten erschien, mit der Zeugung eines weiteren Kindes zu feiern.« Und so begab es sich, dass ihr Sohn Philip nach 262 Tagen am 21. Juni 1949 geboren wurde. In diesem Fall haben wir einen einigermaßen sicheren Beleg für die menschliche Schwangerschaftsdauer. Zumindest liefert diese Geschichte ein plastisches Beispiel, wie die Erkundung unserer Ursprünge zur menschlichen Fortpflanzung beitragen kann.

Bei Säugetieren bezeichnet man den Zeitraum zwischen Empfängnis und Geburt als Schwangerschaftsdauer oder Tragzeit. Wie im vorherigen

Kapitel erläutert, bewegen sich die Tragzeiten von Säugetieren in engen Grenzen. Die Standardabweichung liegt bei plus/minus zwei Prozent. Was heißt das für eine menschliche Schwangerschaft mit einer Dauer von etwa 38 Wochen oder 266 Tagen von der Empfängnis bis zur Geburt? Es bedeutet, dass zwei Drittel der Geburten normalerweise im Bereich von fünf Tagen darüber oder darunter liegen sollten. Mit 262 Tagen liegt Mary Leakeys vom Fund des *Proconsul* ausgelöste Schwangerschaft im errechneten Gesamtbereich von 261 bis 271 Tagen. Gleichzeitig kann man aber auch davon ausgehen, dass eine von zwanzig Frauen ihr Kind mehr als zehn Tage vor oder nach dem Durchschnitt von 38 Wochen auf die Welt bringt. Die meisten normalen Schwangerschaften beim Menschen dauern also zwischen 36 und 40 Wochen, doch dieser Zeitraum ist für einen biologischen Marathon mit derart vielen komplexen Vorgängen bemerkenswert präzise. Wie dem auch sei, die Prognose eines Geburtsdatums mit einer Schwankungsbreite von plus/minus zwei Wochen ist immerhin ein wenig vage. Wie kann man einer modernen und viel beschäftigten Frau angesichts solcher Ungewissheit die erfolgreiche Planung ihres Lebens zutrauen?

In der Praxis ist die Situation deutlich schwieriger wegen des üblichen medizinischen Vorgehens, die Dauer der Schwangerschaft ab dem ersten Tag der letzten Menstruation vor der Empfängnis und nicht ab dem Zeitpunkt der Empfängnis selbst zu berechnen. Seit 1812 verwenden Ärzte im Allgemeinen die Naegele-Regel zur Berechnung des voraussichtlichen Geburtstermins: Das Datum wird ermittelt, indem man zuerst sieben Tage zum ersten Tag der letzten Menstruation addiert, dann drei Monate subtrahiert und schließlich ein Jahr addiert. Das Ergebnis entspricht einer Schwangerschaftsdauer von ungefähr 40 Wochen. Im Durchschnitt findet der Eisprung etwa zwei Wochen nach dem ersten Tag der letzten Menstruation statt. Daher wird die eigentliche Schwangerschaftsdauer von etwa 38 Wochen durch die medizinische Definition um 14 Tage erhöht. Nimmt man die Standardabweichung von plus/minus 5,5 Prozent der Birmingham-Studie von Gibson und McKeown, die im vorherigen Kapitel diskutiert wurde, kann man davon ausgehen, dass zwei Drittel der ab der letzten Menstruation berechneten Geburtstermine normalerweise innerhalb eines Bereichs von zwei Wochen über oder unter dem Durchschnitt von 40 Wochen und nicht bei plus/minus fünf Tagen liegen sollten. 95 Prozent der Geburten liegen in einem Bereich von plus/minus vier Wochen zwischen Woche 36 und 44.

Dennoch kommt es bei einer von zwanzig Frauen zu einer ansonsten normalen Geburt, die mehr als einen Monat vor oder nach dem Durchschnittsdatum von 40 Wochen liegt. Finden wir keine bessere Methode, werden Schwangere weiterhin mit einer mehrwöchigen Ungewissheit klarkommen müssen.

Es gibt aber noch einen weiteren Grund für die auffallend große Schwankung der menschlichen Schwangerschaftsdauer. In den meisten Fällen haben Frauen Einzelgeburten, und bei der bisherigen Diskussion wurde diese Bedingung stillschweigend angenommen. Kommt mehr als ein Baby zur Welt, was in den Vereinigten Staaten bei mehr als 100.000 Geburten pro Jahr vorkommt, ist alles grundlegend anders. Die Ursache ist ganz einfach: Da sich die Gebärmutter nicht unbegrenzt ausdehnen kann, werden die Babys mit zunehmender Anzahl immer kleiner und nach immer kürzeren Schwangerschaften geboren. Mehrlingsgeburten werden auch zunehmend seltener, je mehr Babys zur Welt gebracht werden. In Nordamerika kommt eine Zwillinggeburt etwa einmal pro 83 Schwangerschaften vor und eine Drillingsgeburt einmal pro 8.000 Schwangerschaften. Diese Zahlen folgen der allgemeinen Regel, laut der Zwillinge nichts Außergewöhnliches sind, Drillingsgeburten ziemlich selten vorkommen und die Quoten von Vierlingen, Fünflingen, Sechslingen, Siebenlingen, Achtlingen und Neunlingen immer weiter abnehmen. Von Neunlingen sind nur wenige Fälle bekannt. Die meisten wurden tot geboren, und kein Kind lebte länger als ein paar Tage. Berichte von menschlichen Mehrlingsgeburten mit mehr als neun Babys gab es keine.

1895 stellte der Arzt Dionys Hellin eine interessante Regelmäßigkeit bei den Quoten menschlicher Mehrlingsgeburten fest. Wenn Zwillinge beispielsweise einmal bei 80 Geburten vorkommen, dann kommen Drillingsgeburten einmal bei 802 Geburten (einmal in 6.400 Fällen), Vierlinge einmal bei 803 Geburten (einmal in 512.000 Fällen), und so weiter vor. Nach dieser Formel müsste die Quote von Neunlingen bei einem Fall bei 808 Geburten betragen, was einen astronomischen Wert von einem Neunlingsfall bei 1.677.721.600.000.000 Geburten ergibt. Diese Zahlenreihe entspricht genau der Erwartung, wenn es eine Standardwahrscheinlichkeit für jeden zusätzlichen Fötus in der Gebärmutter (etwa 1 in 80) gibt. Obwohl dieses von Hellin entdeckte Prinzip häufig als »Gesetz« bezeichnet wurde, ist es in Wirklichkeit nur eine Faustregel. Die Quoten können sich mit der Zeit ändern. Zum Beispiel steigt mit dem Alter einer Frau die Wahrscheinlichkeit, dass sie eine Mehrlingsgeburt haben wird.

Außerdem gibt es bei den Quoten für Mehrlingsgeburten regionale Unterschiede, und die Quote in einer bestimmten Region kann sich im Laufe der Zeit verändern. 2011 veröffentlichten der Wirtschaftswissenschaftler Jeroen Smits und der Soziologe Christiaan Monden einen umfassenden Überblick über die Quoten von Zwillingsgeburten in Entwicklungsländern. Dieser bestätigte, dass die Quoten für Zwillingsgeburten in Ostasien niedrig sind, und zeigte, dass dieses Muster, mit einem Durchschnitt von einer Zwillingsgeburt pro 130 Geburten, im gesamten Raum Süd- und Südostasien gilt. Vergleichbare Zwillingsquoten kommen auch in allen lateinamerikanischen Ländern vor. Im Gegensatz dazu erwies sich die häufig zitierte und auffallend hohe Quote, die ursprünglich nur für Nigeria angegeben wurde, als typisch für Afrika. Im Durchschnitt beträgt die Quote auf dem gesamten Kontinent eine Zwillingsgeburt pro 60 Geburten. Es stellte sich heraus, dass ein Nachbarstaat Nigerias, nämlich Benin, mit einer Zwillingsgeburt pro 35 Geburten Zwillingsweltmeister ist. Im Vergleich mit Afrika und Asien bzw. Lateinamerika liegen Europa und Nordamerika dazwischen, mit etwa einer Zwillingsgeburt pro 80 Geburten.

ALS MEILENSTEIN GILT EINE VERÖFFENTLICHUNG der beiden Epidemiologen Thomas McKeown und Reginald Record aus dem Jahr 1952 über das Wachstum der Föten bei Mehrlingsschwangerschaften, die zeigte, dass die Schwangerschaftsdauer mit steigender Anzahl der Föten in der Regel abnimmt. Während die Schwangerschaftsdauer bei Einzelgeburten durchschnittlich 40 Wochen ab dem Beginn der letzten Menstruation beträgt, sinkt sie bei Zwillingen auf etwa 37 Wochen, bei Drillingen auf 35 Wochen und bei Vierlingen auf 34 Wochen. Entsprechend kommen Vierlinge sechs Wochen früher als ein einzelnes Kind zur Welt. Mit anderen Worten kommt es bei Mehrlingsschwangerschaften deutlich häufiger zu Geburten vor der medizinisch anerkannten Frühgeburtsschwelle von 37 Wochen. Bei Einzelgeburten ist das Baby nur in zehn Prozent der Fälle verfrüht, bei Zwillingen steigt die Quote der Frühgeburten auf 50 Prozent und bei Drillingen auf 90 Prozent.

Wie zu erwarten, nimmt das Geburtsgewicht mit sinkender Schwangerschaftsdauer ab. McKeown und Record registrierten ein durchschnittliches Geburtsgewicht von 3,5 Kilogramm bei Einzelgeburten, 2,5 Kilogramm bei

Zwillingen, 1,75 Kilogramm bei Drillingen und etwas weniger als 1,5 Kilogramm bei Vierlingen. Dementsprechend wiegt ein Vierling etwas weniger als die Hälfte eines einzeln geborenen Babys. Bemerkenswert ist allerdings, dass das Gesamtgewicht der Neugeborenen mit der Anzahl zunimmt: 3,5 Kilogramm bei Einzelgeburten, 5 Kilogramm bei Zwillingen, 5,5 Kilogramm bei Drillingen und 5,75 Kilogramm bei Vierlingen.

Interessanterweise wird das Gewicht eines einzelnen Fötus bei Mehrlingsschwangerschaften etwa bis zur 27. Woche nicht beeinträchtigt. Erst danach lässt das Wachstum mit steigender Anzahl der Föten signifikant nach. Die Verlangsamung des fötalen Wachstums bei Mehrlingsschwangerschaften hängt zumindest zum Teil mit der räumlichen Enge in der Gebärmutter, die wahrscheinlich durch die Plazenten verursacht wird, zusammen. Die Ausdehnung oder Aufblähung der Gebärmutter ist zweifellos der Grund für die frühere Geburt bei Mehrlingsschwangerschaften.

Da Mehrlingsschwangerschaften mit fünf Föten oder mehr — also Fünflinge, Sechslinge, Siebenlinge, Achtlinge und Neunlinge — sehr selten vorkommen, fehlen uns zuverlässige Daten für die Schwangerschaftsdauer und das Geburtsgewicht. Weil aber sowohl Schwangerschaftsdauer als auch Geburtsgewicht in engem Zusammenhang zu der Anzahl der Föten bei häufiger vorkommenden Mehrlingsschwangerschaften stehen, können wir wahrscheinliche Werte prognostizieren. Bei Achtlingen beispielsweise können wir von einer durchschnittlichen Schwangerschaftsdauer von ungefähr 31 Wochen und einem durchschnittlichem Geburtsgewicht von etwa einem Kilogramm, was ein Gesamtgewicht von etwa acht Kilogramm ergibt, ausgehen. Soweit bekannt, kamen 1998 in Texas die ersten US-amerikanischen Achtlinge auf die Welt. Sechs Mädchen und zwei Buben wurden geboren, aber einer der Säuglinge starb recht schnell. Die restlichen sieben Säuglinge erlebten zumindest ihren zehnten Geburtstag. Die zweiten Achtlinge, von denen wir wissen, brachte 2009 Nadya Suleman in den Vereinigten Staaten zur Welt, die anschließend als »Octomom« Bekanntheit erlangte. Das durchschnittliche Geburtsgewicht ihrer acht Säuglinge, die alle die ersten zwei Lebensjahre überlebten, betrug etwas mehr als ein Kilogramm. Die Achtlinge kamen nach einer Schwangerschaftsdauer von knapp über 30 Wochen, also fast zehn Wochen weniger als bei einer Einzelgeburt, auf die Welt. Sowohl das durchschnittliche Geburtsgewicht als auch die Schwangerschaftsdauer entsprechen ziemlich genau den prognostizierten Werten.

In vielen Ländern hat die Zahl der Mehrlingsgeburten seit den 1970er Jahren zugenommen. Eine Hauptursache ist die wachsende Nutzung moderner Verfahren der medizinisch unterstützten Fortpflanzung, vor allem der In-vitro-Fertilisation mit anschließendem Embryotransfer. Häufig wird eine Hormonbehandlung durchgeführt, um die Anzahl der Eier für die künstliche Befruchtung zu erhöhen, und meist werden zwei oder mehr Embryos transferiert, um die Wahrscheinlichkeit einer Schwangerschaft zu steigern. Bekannt sind Fälle von zehn, elf und sogar fünfzehn Embryos, die alle aus einer kombinierten Durchführung von Fruchtbarkeitsmedikation und Embryotransfer resultierten. Unter den 19 registrierten Fällen von Achtlingen kamen mindestens 13 mit Hilfe von Fruchtbarkeitsmedikamenten zustande. Aber die steigende Tendenz von Mehrlingsgeburten ist nicht ausschließlich der medizinisch unterstützten Fortpflanzung zuzuschreiben. Wie die kanadischen Ärzte Deshayne Fell und K. S. Joseph 2012 in einem Übersichtsartikel deutlich zeigten, ist auch das Durchschnittsalter der Mutter ein wichtiger Faktor. Ältere Frauen neigen stärker zu Mehrlingsgeburten, außerdem gründen Frauen heutzutage zunehmend später eine Familie. Dennoch sind solche Tendenzen alarmierend, weil, wie bereits festgestellt wurde, Mehrlingsschwangerschaften häufiger zu Frühgeburten führen. Aus diesem Grund haben Fertilitätskliniken vernünftigerweise begonnen, die Anzahl der transferierten Embryos strenger zu beschränken. Ein Gerichtsverfahren enthüllte aber, dass Dr. Michael Kamrava, der als behandelnder Arzt für die Achtlinge von Nadya Suleman verantwortlich war, zwölf Embryos transferiert hatte. Nachdem sein Vorgehen als unverantwortlich eingestuft worden war, wurde Dr. Kamrava aus der American Society for Reproductive Medicine ausgeschlossen. Außerdem entzog ihm das Medical Board of California in erster Instanz seine Lizenz, allerdings empfahl ein Richter anschließend, die Strafe zu einer Bewährung von fünf Jahren auszusetzen.

DIE GROSSE SCHWANKUNGSBREITE DER SCHWANGERSCHAFTSDAUER, die beim Menschen auch bei ganz normalen Einzelgeburten vorkommt, spiegelt vor allem die Unsicherheit über den Zeitpunkt des Eisprungs während des Menstrualzyklus wider. Unsicherheit herrscht aber auch bezüglich des Zyklus, während dessen die Empfängnis stattfindet. Gemäß dem »Eieruhr-Modell«, das als Norm gilt, hat eine Frau regelmäßige

Menstrualzyklen, die mit einem Eisprung in der Mitte jeweils einen Monat dauern, bis es zur Empfängnis kommt. Sobald eine Empfängnis stattfindet, hört die Menstruation automatisch auf. Das zumindest ist die allgemeine Annahme. Bei dieser Denkweise kann man die letzte Menstruation als zuverlässigen Anhaltspunkt betrachten, dass die Schwangerschaft mehrere Tage danach angefangen hat.

Aber so einfach ist es nicht immer. Bis zu drei Monate nach der Empfängnis können Blutungen auftreten, die der Menstruation ähneln. Starke Anzeichen sprechen dafür, dass bei nicht-menschlichen Primaten und auch bei anderen Säugetieren in der Frühschwangerschaft häufig eine Form des monatlichen Zyklus bestehen bleibt. Leider wurde dieses Thema bislang kaum erforscht. Bei der Untersuchung eines trächtigen Gorillas, die ich gemeinsam mit Kollegen der Zoological Society of London in den 1970er Jahren durchführte, konnten wir den Zeitpunkt der Empfängnis durch Hormonbestimmungen mittels täglicher Harnproben identifizieren. Das Hormonprofil dokumentierte eindeutig, dass eine zyklische Schwankung, die mit Begattungen und Blutungen einige Wochen danach einherging, zumindest während der ersten zwei Monate der Schwangerschaft weiter existierte. Kommen zu Beginn der Schwangerschaft auch beim Menschen menstruationsähnliche Blutungen vor, kann man bei der Berechnung des Geburtsdatums einen Monat zu spät liegen, wenn man sich ausschließlich auf die Menstruation stützt.

Die Fortdauer der zyklischen Menstrualblutung in der Frühschwangerschaft könnte eine Beobachtung erklären, die vor fast einem Jahrhundert eine Weile großes Interesse hervorrief. Diverse Berichte von Gynäkologen wiesen darauf hin, dass es bei Frauen ungefähr einen Monat nach der letzten Menstruation etwa zum Zeitpunkt des Einnistens der Keimblase zu leichten Blutungen kommen kann. Eine derartige Blutung wurde als mögliches Zeichen einer Schwangerschaft gedeutet. In den 1930er Jahren stellte der Fortpflanzungsbiologe Carl Hartman bei seiner Zuchtkolonie von Rhesusaffen ähnliche Blutungen im Bereich des Zeitpunkts des Einnistens fest. In der Folge wurden Blutungen, die im Bereich des Zeitpunkts des Einnistens auftraten, sowohl beim Menschen als auch bei anderen Primaten als »Hartman-Zeichen« bezeichnet. Diese Deutung war verführerisch, aber wahrscheinlich falsch. Es ist gut möglich, dass Hartman und die anderen Autoren nur die relativ häufig auftretende leichte Blutung einen Monat nach der letz-

ten Menstruation festgestellt hatten. Es ist reiner Zufall, dass diese etwa zwei Wochen nach der Empfängnis auftritt.

Die Deutung der Menstruation als Indikator für normale bzw. anormale Zyklen kann auch auf andere Weise irreführend sein. Eine Frau kann zu Unrecht denken, sie wäre schwanger, weil sie nicht zur erwarteten Zeit menstruiert. Solche Unregelmäßigkeiten kommen jedoch häufig vor. Auch Frauen, die sexuell inaktiv sind und daher unmöglich schwanger werden können, haben gelegentlich ansonsten normale Zyklen ohne offenkundige Menstruation. Bei sexuell aktiven Frauen dagegen kann eine Empfängnis ohne anschließendes Einnisten vorkommen. Jedes frühzeitige Ende einer Schwangerschaft innerhalb der ersten 18 Wochen nach der Empfängnis wird als Fehlgeburt bezeichnet. Da der Embryo aber in allen Entwicklungsstadien zwischen der Befruchtung und dem Einnisten winzig klein ist, bleiben sehr frühe Abgänge leicht unbemerkt. Daher wissen wir so wenig darüber.

Sorgfältige Kontrollen einschließlich Hormonuntersuchungen sind notwendig, um zwischen Fehlgeburten im Frühstadium und unregelmäßiger Menstruation zu unterscheiden. Fehlgeburten vier bis achtzehn Wochen nach der Empfängnis sind auffälliger als Verluste während des ersten Monats. Dies ergibt Sinn, da man logisch davon ausgehen kann, dass jeder natürliche Mechanismus zur Selektion anormaler Embryos früh eintreten sollte. In einer bahnbrechenden Studie aus dem Jahr 1980 untersuchte der Gynäkologe J. F. Miller Schwangerschaftsverluste eingehend. Jede Empfängnis wurde durch Ermittlung von humanem Choriongonadotropin (hCG) — ein Hormon, das nur während der Schwangerschaft produziert wird — in den Harnproben nachgewiesen. Die Produktion von hCG fängt etwa eine Woche nach der Befruchtung mit dem Einnisten an. Miller und seine Kollegen stellten 152 Schwangerschaften fest, davon überlebten 87 Embryos die zwölfte Woche, die bis auf zwei auch alle lebend zur Welt kamen. 65 nachgewiesene Schwangerschaften wurden während der ersten Hälfte unterbrochen, was eine Verlustrate von 43 Prozent ergibt. Bei den unterbrochenen Schwangerschaften endeten 15 mit klinisch erkennbaren Fehlgeburten, aber in 50 Fällen war der Nachweis von hCG in den Harnproben der einzige Indikator für eine Schwangerschaft. Weil hCG erst nach dem Einnisten produziert wird, konnte man mit dieser Untersuchung zudem keine Verluste nachweisen, die in der Woche zwischen der Befruchtung und dem Einnisten auftraten.

Ein Jahr später präsentierte der Frauenarzt Tim Chard ein vollständiges Bild der Verluste nach einer Empfängnis, indem er verschiedene Hinweise kombinierte und zu dem Schluss kam, dass im Durchschnitt sieben von zehn Empfängnissen vor der Hälfte der Schwangerschaft fehlschlugen. Seine Schätzungen verwiesen auf eine Verlustrate von 30 Prozent in der Woche zwischen Empfängnis und Einnisten, also dem Zeitpunkt, an dem hCG erstmals nachweisbar wird. Kommt es bei solchen Verlusten zu einer Blutung, können sie leicht als Menstruation fehlinterpretiert werden. Chard stellte ebenfalls eine Verlustrate von 30 Prozent zwischen dem Einnisten und dem Ende des ersten Schwangerschaftsmonats fest, wonach Fehlgeburten klinisch erkennbar sind. Insgesamt war eine von sieben erfolglosen Schwangerschaften als klinisch nachweisbare Fehlgeburt zu erkennen.

Man interpretierte die beträchtlichen Verluste — über zwei Drittel — zwischen der Empfängnis und der Hälfte der Schwangerschaft als natürlichen Mechanismus, mit dem die Entwicklung von missgebildeten Embryos verhindert wird. Bei Fehlgeburten findet man häufig anormale Chromosomen. Bei mindestens der Hälfte der Schwangerschaften, die während der ersten drei Monate fehlschlugen, wurden chromosomale Anomalien festgestellt, und diese Quote dürfte bei den Verlusten zwischen Empfängnis und Einnisten noch höher sein. 1990 veröffentlichte der klinische Genetiker Bernd Eiben seine Befunde von Plazentaprobe, die er von 750 Fehlgeburten mit verschiedenen chromosomalen Anomalien in den Zellen entnommen hatte. Offenbar gibt es einen Selektionsmechanismus in der Frühschwangerschaft, der zur Abstoßung von Embryos und Föten mit anormalen Chromosomen führt.

KEHREN WIR ZUR FRAGE DES ZEITLICHEN ABLAUFES ZURÜCK. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse, die für die genaue zeitliche Festlegung des Eisprungs und der Empfängnis bei Frauen und anderen Primaten notwendig sind, stehen uns schon seit Jahrzehnten zur Verfügung. Mittels Hormonuntersuchungen kann man erhöhte Östrogenwerte vor dem Eisprung, der mit dem Eisprung verbundene starke Anstieg des luteinisierenden Hormons und erhöhte Progesteronwerte nach dem Eisprung, die alle auf den Zeitpunkt des Eisprungs hindeuten, nachweisen. Nach der Empfängnis sind die Östrogen- und Progesteronwerte stark und anhaltend erhöht. Verständ-

licherweise werden komplizierte und kostspielige Hormonuntersuchungen vor allem bei Problemfällen oder in der Forschung und nur selten bei der Kontrolle normaler Schwangerschaften eingesetzt. Aber einfache, einmalige hormonbasierte Tests können ohne weiteres zur Ermittlung des Eisprungs und auch für die frühe Erkennung einer Schwangerschaft verwendet werden.

Das menschliche Hormon Choriongonadotropin (hCG) wird praktisch während der ganzen Schwangerschaft produziert. Da Menschenaffen und andere Affen ebenfalls Choriongonadotropin während der Schwangerschaft produzieren, ist dies ein weiteres Merkmal, das beim gemeinsamen Vorfahren der höheren Primaten wahrscheinlich schon vorhanden war. Wie bereits erwähnt, wird dieses Hormon beim Menschen ab dem Zeitpunkt des Einnistens etwa eine Woche nach der Befruchtung von der Keimblase produziert. Anschließend erzeugt die Plazenta das Hormon ununterbrochen bis zur Geburt. Gebräuchliche Schwangerschaftstests enthalten gewöhnlich Antikörper gegen hCG, das weitgehend intakt mit dem Urin ausgeschieden wird.

Da die hCG-Produktion bereits zehn Tage nach der Empfängnis beginnt, gestatten regelmäßige Kontrollen von Urinproben mit gebräuchlichen Tests nicht nur die Schwangerschaftsdiagnose, sondern auch die zuverlässige Ermittlung des Zyklus, in dem es zur Empfängnis kam. Wer ein Geburtsdatum zuverlässiger voraussagen will, kann dies leicht durch die regelmäßige Verwendung eines normalen Schwangerschaftstests erreichen. Die zuverlässige Erkennung des Empfängniszyklus sorgt für deutlich weniger Unsicherheit. Dies ist eine enorme Verbesserung gegenüber Daten, die auf der vermutlich letzten Menstruation basieren.

BEVOR WIR UNS IN DIE EINZELHEITEN DER ENTWICKLUNG VON EMBRYOS UND FÖTEN VERTIEFEN, sollten wir unsere Aufmerksamkeit einer Besonderheit der Frühschwangerschaft zuwenden, der sogenannten Morgenübelkeit. Rund zwei Drittel schwangerer Frauen befällt in den ersten Wochen nach der Empfängnis eine mäßig bis stark ausgeprägte Übelkeit, die gelegentlich sogar Erbrechen auslöst. Genauso häufig kommt es während der Schwangerschaft zu Ekel vor Lebensmitteln. Tatsächlich ist Übelkeit häufig das erste Anzeichen, dass eine Frau schwanger ist. Da es während der Frühschwangerschaft zu menstruationsähnlichen Blutungen kommen

kann, kann die Übelkeit auftreten, bevor von einer Schwangerschaft ausgegangen wird. Meist beginnt die Übelkeit ungefähr in der zweiten Schwangerschaftswoche und hört in der zwölften Woche auf, allerdings kann sie in vereinzelt Fällen auch bis zur Geburt andauern. Die volkstümliche Bezeichnung dieses Zustands ist aber irreführend, da die Schwangerschaftsübelkeit keineswegs nur am Vormittag vorkommt — genauso gut könnte man von »Nachmittagsübelkeit« oder »lästiger ganztägiger Übelkeit« reden. Bei einer extremen Form, die *Hyperemesis gravidarum* genannt wird, kann es zu heftigem Erbrechen kommen, was Dehydrierung, Gewichtsverlust, Säurebildung im Blut und Kaliummangel zur Folge haben kann. Derart schwächende Folgen, die glücklicherweise bei weniger als einem Prozent aller Schwangerschaften vorkommen, müssen medizinisch behandelt werden.

Eine weitere Besonderheit, die vermutlich damit zusammenhängt und vorwiegend während der Frühschwangerschaft vorkommt, sind Gelüste nach außergewöhnlichen Lebensmitteln oder Getränken. Traditionell werden Übelkeit, Ekel vor Lebensmitteln oder besondere Gelüste häufig als Folge der hormonellen Veränderungen während der Frühschwangerschaft erklärt. Diese Erklärung ist jedoch zu einfach. Der Spiegel bestimmter Hormone, besonders der Östrogene, ist gegen Ende der Schwangerschaft, wenn Phasen der Übelkeit und Gelüste seltener auftreten, in Wirklichkeit viel höher. Außerdem konnte nicht nachgewiesen werden, dass sich der Hormonspiegel von Frauen mit Symptomen von dem von Frauen unterscheidet, die keine Veränderungen feststellen.

Bevor sie die Evolution der Menstruation erforschte, widmete sich die Autorin Margie Profet dem Thema Schwangerschaftsübelkeit. Sie vermutete, dass der Embryo während seiner Entwicklung wahrscheinlich ziemlich anfällig für Giftstoffe ist, und eine stärkere Neigung zum Erbrechen möglicherweise eine mütterliche Anpassung zur Ausscheidung von Giftstoffen ist, die die Entwicklung des Embryos bedrohen könnten. Eine ähnliche Ursache könnte auch für die Gelüste nach außergewöhnlichen Lebensmitteln oder Getränken gelten — sie sind vielleicht das Ergebnis einer positiven Selektion, die die Aufnahme spezifischer Nährstoffen für den Embryo förderte. Profet hatte besonders potentielle Giftstoffe aus pflanzlicher Herkunft im Auge, wobei sie intensiv schmeckende Gemüsesorten, Alkohol und koffeinhaltige Getränke hervorhob. Die Palette der Möglichkeiten ist aber noch viel breiter, zu ihnen zählen auch Tierprodukte, Parasiten und Krankheits-

erreger. Es überrascht kaum, dass Profets »Gemüse-Hypothese« zum Teil auf scharfe Kritik stieß. Anhand einer Stichprobe von mehr als 500 schwangeren Frauen untersuchten die Epidemiologin Judith Brown und ihre Kollegen den Zusammenhang zwischen Übelkeit, Schwangerschaftsverlauf und der Zufuhr angeblich schädlicher Gemüse. Sie fanden keinen statistischen Zusammenhang zwischen verdächtigem Gemüse und Übelkeit oder Erbrechen in der Frühschwangerschaft. Überdies gab es keine Korrelation zwischen der Zufuhr von solchem Gemüse und einem negativen Schwangerschaftsverlauf.

Eine andere Möglichkeit ist, dass die Schwangerschaftsübelkeit nicht nur den Embryo, sondern auch die Mutter schützt. In einer umfassenden Übersicht prüften die Neurobiologen Samuel Flaxman und Paul Sherman verschiedene Belege, die diese Deutung unterstützen. Zum einen erreichen die Symptome ihren Höhepunkt, wenn auch die Entwicklung des Säuglings für Schädigungen durch Chemikalien am anfälligsten ist — zwischen vier und sechzehn Wochen nach der Empfängnis. Zudem zeigten neun Studien, dass bei Frauen, die unter Schwangerschaftsübelkeit leiden, deutlich weniger Fehlgeburten vorkommen als bei Frauen, die keine Übelkeitssymptome haben. Überdies gibt es noch weniger Fehlgeburten, wenn die Mutter nicht nur unter Übelkeit leidet, sondern sogar erbrechen muss. Im Gegensatz dazu gibt es keine Korrelation zwischen Übelkeit oder Erbrechen und Totgeburten zu einem späteren Zeitpunkt in der Schwangerschaft. Anscheinend lautet die Quintessenz normaler Übelkeit in der Frühschwangerschaft: »Kampf nicht dagegen an, sie ist gut für das Baby.«

Flaxman und Sherman zeigten, dass Schwangerschaftsübelkeit oft durch die Zufuhr bestimmter Lebensmittel ausgelöst wird. Viele schwangere Frauen entwickeln vor allem während des ersten Drittels der Schwangerschaft eine Abneigung gegen Alkohol, bestimmte andere (häufig koffeinhaltige) Getränke und Gemüse mit intensivem Geschmack. Die stärksten Abneigungen von schwangeren Frauen betreffen aber tierische Produkte wie Fleisch, Fisch, Geflügel und Eier. Kulturübergreifende Analysen, die von den Evolutionspsychologen Gillian Pepper und Craig Roberts durchgeführt wurden, zeigten, dass in zwanzig traditionellen Gesellschaften Schwangerschaftsübelkeit auftritt, und in sieben nicht. In den Gesellschaften ohne Schwangerschaftsübelkeit gehörten tierische Produkte nicht zu den Hauptnahrungsquellen, sondern deutlich öfter Pflanzen, vor allem Mais. Flaxman

und Sherman schlossen übrigens auch die Vermutung aus, dass Schwangerschaftsübelkeit zu weniger Geschlechtsverkehr führt und dadurch das Auftreten von Krämpfen in der Gebärmutter vermindert, die zu einer Fehlgeburt führen könnten.

Insgesamt scheint es, dass Erbrechen den Embryo generell vor Krankheitserregern und schädlichen Chemikalien und nicht nur vor Abwehrgifstoffen schützt, die von Pflanzen erzeugt werden. In diesem Zusammenhang ist es für eine schwangere Frau besonders wichtig, mit der Nahrung keine Parasiten und Krankheitserreger aufzunehmen. Zur Verringerung der Wahrscheinlichkeit, dass ihr Körper den Embryo abstößt, ist ihr Immunsystem schwächer. Folglich sind schwangere Frauen für ernsthafte und oftmals lebensbedrohliche Infektionen anfälliger. Aber wie sieht es bei unseren Verwandten, den Primaten aus? Bei nicht-menschlichen Primaten gibt es nur wenige Hinweise auf Übelkeit oder außergewöhnliche Essensgelüste während der Frühschwangerschaft. Man kann kaum davon ausgehen, dass angebliche negative Nebenwirkungen hormoneller Veränderungen während der Frühschwangerschaft nur für unsere Art gelten. Jedes allgemeine Argument, bei dem man sich auf positive oder negative Auswirkungen von Nahrungsmitteln auf die Entwicklung des Embryos beruft, sollte gleichermaßen für andere Primaten gelten. Andererseits ist es durchaus möglich, dass Übelkeit und/oder Gelüste tatsächlich erst während der Evolution des Menschen entstanden, weil unsere Ernährung sehr variabel wurde und oft Fleisch enthielt, wodurch größere Risiken entstanden. Eine überzeugende evolutionäre Erklärung zu formulieren, ist jedoch äußerst schwierig, wenn die Stichprobe auf eine einzige Art beschränkt ist.

NUN KÖNNEN WIR UNS DER ENTWICKLUNG DES BABYS in der Gebärmutter zuwenden. Wie der Name schon vermuten lässt, haben alle Plazentatiere eine spezielle Verbindung zwischen dem heranwachsenden Nachkommen und der umgebenden Innenwand der Gebärmutter, die als Plazenta (Mutterkuchen) bezeichnet wird.

In der Philosophie hat die Vorstellung einer Großen Kette des Seins (*Scala naturae*) eine lange Tradition. Seit Menschengedenken werden Gegenstände und Lebewesen auf einer Stufenleiter als Symbol des Fortschritts angeordnet. Es versteht sich von selbst, dass Menschen immer die höchste

Stufe auf der Leiter der Lebewesen einnahmen. Einige Philosophen ermittelten sogar eine Reihe von Zwischenstadien wie Engel und Erzengel, um eine Brücke für die tiefe Kluft zwischen dem Menschen und dem allmächtigen Gott in der Großen Kette des Seins zu schlagen. Da diese uralte Vorstellung einer Stufenleiter im westlichen Denken zutiefst verankert ist, erstaunt es kaum, dass sie auch Schriften über die Evolution beeinflusst hat. Ein Ergebnis ihres tückischen Einflusses war, dass alte Evolutionsforscher häufig die Säugetiere in einer aufsteigenden Skala einreihen. Selbstverständlich belegten die eierlegenden Kloakentiere die unterste Stufe. Beuteltiere wurden als Zwischenformen betrachtet, da sie ihre Jungen zwar lebend zur Welt bringen, aber angeblich keine richtige Plazenta haben — stattdessen wird das Junge fast während der ganzen Tragzeit von einer Schalenmembran umhüllt, die als Überbleibsel eines eierlegenden Vorfahren gedeutet wird. Sämtliche Beuteltiere haben extrem kurze Tragzeiten und gebären winzige Jungtiere, die sich oft in einem Beutel am Bauch der Mutter entwickeln. Die Plazentatiere belegten die oberste Stufe, weil sie sich durch eine voll ausgebildete Plazenta und Lebendgeburten von relativ großen Jungtieren auszeichnen. Wir sollten aber nicht vergessen, dass die Beuteltiere und die Plazentatiere sich seit mindestens 125 Millionen Jahren unabhängig voneinander entwickelten. Ist es vernünftig, ein modernes Beuteltier als »unveränderlichen Vorfahren« zu betrachten, der sowohl für Beuteltiere als auch für Plazentatiere den Ausgangszustand darstellt? In Wirklichkeit deuten mehrere Hinweise darauf hin, dass die Tragzeit der Beuteltiere im Laufe der Evolution zurückging. Anscheinend wurde die Entwicklung in einem Beutel gegenüber der Gebärmutter bevorzugt.

Ungeachtet der Wahrheit über die Evolution der Beuteltiere, steht auf jeden Fall fest, dass die modernen Plazentatiere generell eine gut entwickelte Plazenta haben. Sie haben auch die Grundausrüstung zusammenhängender Membrane (Embryonalhüllen) gemeinsam. Unabhängig von allen anderen Geschehnissen wird das embryonale/fötale System bis zum Zeitpunkt der Geburt von einer Membran, dem Chorion (Zottenhaut), vollständig umhüllt. Das Chorion umschließt drei andere Membranen, die während der Entwicklung konkrete Bedeutungen haben. Die erste Membran, das Amnion, umhüllt und schützt das Junge. Das Amnion ist ein mit Flüssigkeit gefülltes Kissen, das die Entwicklung des Jungen gegen jegliche äußere Erschütterung schützt. Die Geburt geht einher mit dem Bruch des Amnions

und dem Freisetzen der Flüssigkeit — bekannt als Platzen der Fruchtwasserblase bei einer menschlichen Geburt. Die zwei verbleibenden Membransysteme, der Dottersack und die Allantois, versorgen den Säugling mit Nährstoffen und entfernen Abfallprodukte. Genauer gesagt sind es die Blutgefäße dieser zwei Membransysteme, die die Nährstoffe von der Mutter aufnehmen und die Abfallprodukte zum Abtransport in ihren Blutkreislauf einspeisen.

Ein typisches Merkmal der Evolution durch natürliche Selektion ist die Umwandlung bereits existierender Strukturen zur Erfüllung neuer Funktionen. Diese Entwicklung findet auf allen Ebenen statt — von anatomischen Eigenschaften bis zu einzelnen Molekülen. Derartige »Flickschusterei« ist ein Markenzeichen der Evolution, und der Dottersack und die Allantois sind hervorragende Beispiele dafür. Der gemeinsame Vorfahre aller auf dem Land lebenden Wirbeltiere legte Eier, die alles, was für die Entwicklung der Jungtiere notwendig war, in einer schützenden Schale enthielten. Viele moderne Nachkommen jenes Vorfahren — Reptilien, Vögel und Kloakentiere — legen immer noch derartige Eier. Die eierlegende Mutter stellt die Nährstoffe für ihr Jungtier in Form von Dotter bereit, der sich in seinem Sack befindet. Blutgefäße, die über die Oberfläche des Dottersacks verteilt sind, nehmen diese Nährstoffe sukzessive auf und transportieren sie zum Nachkommen. Von der Diffusion der Atemluft durch die durchlässige Schale abgesehen, ist das Ei nach dem Legen ein geschlossenes System. Deshalb müssen die von der Mutter ursprünglich bereitgestellten Nährstoffe für die ganze Entwicklung des Nachwuchses reichen. Zudem müssen Abfallprodukte wie Harnstoff, die die Schale nicht passieren können, bis zum Schlüpfen an einem sicheren Ort gespeichert werden. Die ursprüngliche Funktion der Allantois war eine Art biologischer Mülleimer. Blutgefäße, die auf der Oberfläche der Allantois verteilt sind, entsorgen sukzessive lästige Nebenprodukte der Entwicklung. Beim Schlüpfen wird die mit Abfall gefüllte Allantois dann abgeworfen.

Im Gegensatz dazu ist das Junge eines Beuteltiers oder Plazentatiers auf die Entwicklung innerhalb der Gebärmutter angepasst, wo er direkt durch die Mutter versorgt wird. Da umfangreiche Nährstoffvorräte gar nicht notwendig sind, gibt es sehr wenig Dotter. Außerdem benötigt das Junge keinen eingebauten Mülleimer, weil über die Blutgefäße der Mutter alle Abfallprodukte abtransportiert werden. Im Verlauf der Evolution von Lebendgeburten

verloren der Dottersack und die Allantois ihre ursprüngliche Funktion, aber ihre Blutgefäße übernahmen eine neue. Die Blutgefäße des Dottersacks nahmen keine gespeicherten Nährstoffe mehr auf, sondern wurden für den Austausch von Nährstoffen und Abfallprodukten mit den Blutgefäßen der Mutter in der Gebärmutterwand angepasst. Und die Blutgefäße der Allantois wurden auf ähnliche Weise für den Austausch mit der Mutter umfunktio- niert, anstatt Abfallprodukte zu entsorgen.

OBWOHL ALLE PLAZENTATIERE EINE GUT ENTWICKELTE PLA- ZENTA haben, gibt es vor allem zwischen den Säugetierordnungen erhebliche Unterschiede im Detail. Einige Plazentatypen haben eine räumlich be- grenzte, gewöhnlich scheibenförmige Verbindungsfläche, während andere eine erweiterte Kontaktfläche haben, die sich über den Großteil des Chorions erstreckt. Eine räumlich begrenzte Plazenta dringt immer in gewissem Masse in die innere Gebärmutterwand ein, allerdings ist das Ausmaß von Art zu Art variabel. Im Unterschied dazu befindet sich eine erweiterte Pla- zenta grundsätzlich an der Oberfläche und ist nicht-invasiv.

1909 legte der deutsche Arzt Otto Grosser eine Einteilung von drei Pla- zentatypen vor, die sehr einflussreich war: nicht-invasiv, mäßig invasiv und hochinvasiv. Bei einer nicht-invasiven, erweiterten Plazenta befinden sich das Chorion und die Innenwand der Gebärmutter in engem Kontakt, aber es gibt keinen sonderlich großen Abbau von mütterlichem Gewebe. Eine mä- ßig invasive, räumlich begrenzte Plazenta dringt bis zu einem gewissen Grad in die Innenwand der Gebärmutter ein, und die Blutgefäße der Mutter haben direkten Kontakt mit dem Chorion. Bei einer hochinvasiven, räumlich begrenzten Plazenta ist das Eindringen in die Innenwand der Gebärmutter noch stärker ausgeprägt. Die Wände der mütterlichen Blutgefäße werden aufgelöst, und das Chorion wird mit Blut überschwemmt.

Eine der großen Stärken der Klassifikation von Grosser ist, dass die meis- ten Säugetierordnungen ausschließlich durch einen bestimmten Typus ge- kennzeichnet sind. Alle Huftiere, Wale und Schuppentiere beispielsweise haben eine nicht-invasive Plazenta. Raubtiere, Elefanten, Seekühe und Spitz- hörnchen haben normalerweise eine mäßig invasive Plazenta. Kaninchen und Hasen, die meisten Nagetiere, Klippschiefer und Rüsselspringer haben dagegen eine hochinvasive Plazenta.

Die Ordnung der Primaten jedoch ragt wie ein bunter Hund heraus. Innerhalb dieser Ordnung kommen beide Extremformen der Plazenta vor, was einzigartig unter den Säugetieren ist. Alle Lemuren und Loris haben eine nicht-invasive Plazenta, die in starkem Kontrast zu der hochinvasiven Plazenta steht, die bei Koboldmakis und höheren Primaten ausnahmslos vorhanden ist. In der Tat war es 1898 die hochinvasive Plazenta der Koboldmakis, die den Biologen Anton Hubrecht — den Begründer der vergleichenden Embryologie — als Ersten dazu brachte, von einer Verwandtschaft mit den Affen, Menschenaffen und Menschen auszugehen. Die Merkmale der Plazenta zählen immer noch zu den überzeugendsten Hinweisen, dass die Koboldmakis und die höheren Primaten von einem gemeinsamen Vorfahren abstammen.

WIE ABER GING DIE EVOLUTION DER PLAZENTA VONSTATTEN?

Um die Evolution der Plazenta bei Primaten zu rekonstruieren, müssen wir zuerst den Ausgangspunkt herausfinden — den Urzustand beim gemeinsamen Vorfahren aller lebendgebärenden Säugetiere. Erst dann können wir schlussfolgern, welche Form der Plazenta der gemeinsame Vorfahre aller Primaten wahrscheinlich hatte. Dabei sind wir aber sofort mit einem großen Hindernis konfrontiert: Es ist kaum davon auszugehen, dass wir aus der Fossilgeschichte viel über die Entwicklung der Weichteile lernen werden, daher müssen wir uns auf logische Schlussfolgerungen verlassen.

Eine Weile glaubten viele Fortpflanzungsbiologen, das Problem der Evolution der Plazenta wäre zufriedenstellend gelöst. Der nicht-invasive Zustand wurde weithin als Urzustand anerkannt. Die Argumentationskette ist ziemlich simpel: Die Säugetiere stammen von eierlegenden Vorfahren ab. Die erste Entwicklungsstufe ist der Verbleib des befruchteten Eis im Mutterleib. Zunächst ist der Säugling im Ei fast vollständig vom eigenen Dottervorrat abhängig, aber die Gebärmutter trägt zunehmend zu seiner Entwicklung bei, zunächst mit Feuchtigkeit und später mit richtigen Nährstoffen. Damit dies möglich ist, muss die Eischale dünner und durchlässiger werden. Schließlich erlaubt die direkte Diffusion zwischen den mütterlichen Blutgefäßen in der Gebärmutterwand und den Blutgefäßen des Keimlings eine noch bessere Zufuhr von Nährstoffen und die Entfernung von Abfallprodukten. Mit zunehmender Nahrungszufuhr durch die Mutter wird der Bedarf

von Eidotter immer geringer. In ähnlicher Weise nimmt die Notwendigkeit der Lagerung von Abfallprodukten ab, wenn die Abfuhr verbessert wird. An einem gewissen Punkt führt dieser Vorgang zur Erzeugung eines Eis mit sehr wenig Dotter, das sich nach der Befruchtung in der Gebärmutter mit direkt von der Mutter gelieferter Nahrung entwickelt. Zu Beginn ist der Kontakt zwischen dem Jungen und der Innenwand der Gebärmutter aber zwangsläufig nicht-invasiv. Als Modell für dieses Stadium der Evolution dienten moderne Beuteltiere. Davon ausgehend scheint es nur logisch, dass die Plazenta beim gemeinsamen Vorfahren der Plazentatiere immer noch nicht-invasiv war.

Diese stufenweise Deutung der Evolution der Plazenta wird durch Faktoren gestützt, die mit Effizienz zu tun haben. Allgemein anerkannt ist, dass die mütterliche Versorgung mit zunehmender Effizienz erfolgen kann, je weniger Hindernisse zwischen ihr und ihrem Jungen liegen. Da Kloakentiere Eier legen, ist ihre Versorgungseffizienz zwangsläufig sehr niedrig. Bei Beuteltieren bleibt das Junge zwar in der Gebärmutter, aber er wird fast die ganze Zeit von einer Schalenmembran umhüllt, und in den meisten Fällen wird keine eigentliche Plazenta gebildet. Dementsprechend gelten Beuteltiere als weniger effizient als die Plazentatiere, die eine richtige Plazenta haben. Unter den heutigen Plazentatieren gibt es einige, die eine nicht-invasive Plazenta mit mehreren Hindernissen haben, die zwischen den mütterlichen Blutgefäßen und denen des Jungen bestehen. Meist wird davon ausgegangen, dass die Effizienz der mütterlichen Versorgung mit zunehmendem Eindringen der Plazenta steigt. Nach dieser Deutung ist die hochinvasive Plazenta, die auch als der Typ mit der höchsten Effizienz angesehen wird, zwangsläufig am weitesten fortgeschritten.

Hier sieht man einen klassischen Fall für die Verzerrungen, die durch die Große Kette des Seins entstehen können. Das Ergebnis dieser Denkweise ist die allgemeine Akzeptanz der Vorstellung, dass bei den gemeinsamen Vorfahren der Plazentatiere — als Überbleibsel eines früheren beuteltierähnlichen Zustandes — die Plazenta noch nicht-invasiv war. Folglich hat man bei der Evolution der Plazentatiere häufig die vermeintlich primitive und ineffiziente nicht-invasive Plazenta als Ausgangspunkt angenommen. Der Fortpflanzungsbiologe Patrick Lockett befürwortete diese Deutung mit Nachdruck. Er argumentierte, dass die Lemuren und Loris mit ihrer nicht-invasiven Plazenta in jeder Hinsicht primitiv geblieben seien, während die

Koboldmakis und die höheren Primaten mit ihrer hochinvasiven Plazenta sehr fortgeschritten seien. Luckett entdeckte innerhalb der letztgenannten Primatengruppe zudem eine Reihe fortgeschrittener Stadien. Gemäß seiner Rekonstruktion haben Koboldmakis die primitivste Form der hochinvasiven Plazenta, während die Neuweltaffen etwas weiter und die Altweltaffen deutlich weiter fortgeschritten sind. Nach Luckett findet man den am weitesten fortgeschrittenen Zustand bei Menschenaffen und Menschen. Obwohl es uns womöglich gefiele, dass der Mensch die höchste Stufe auf der evolutionären Treppe einnimmt, bricht diese Rekonstruktion bei näherer Betrachtung zusammen, wenn wir die Dauer der Tragzeit und den Zustand des Jungtiers bei der Geburt berücksichtigen.

ERWARTUNGSGEMÄSS NIMMT DIE DAUER DER TRAGZEIT mit steigender Körpergröße zu. Die längste dokumentierte Tragzeit bei Säugetieren sind die durchschnittlich 22 Monate bei den afrikanischen Elefanten. Natürlich halten wir Menschen unsere neunmonatige Schwangerschaft für eine ziemlich lange Zeitspanne, aber wir sind mittelgroße Säugetiere, und für diese ist unsere Tragzeit keineswegs ungewöhnlich. Wir müssen also bei Vergleichen die Körpergröße berücksichtigen. Für einen sinnvollen Vergleich unserer Schwangerschaftsdauer mit den Tragzeiten anderer Säugetiere müssen wir aber auch einen wesentlichen Unterschied im Zustand des Nachwuchses bei der Geburt berücksichtigen.

Wer Hamster, Ratten oder Mäuse gezüchtet hat, weiß, dass die Mütter Würfe mit schwach entwickelten Jungtieren zur Welt bringen. Bei der Geburt sind die Neugeborenen rosafarbene, haarlose Winzlinge und ihre Augen und Ohren sind mit Membranen verschlossen. Dagegen gebären Pferde, Kühe und Schimpansen normalerweise einzelne, gut entwickelte Jungtiere. Sie werden meist mit einem Haarleid geboren, und ihre Augen und Ohren sind bereits bei der Geburt offen. Vor allem dem Zoologen Adolf Portmann ist es zu verdanken, dass der entscheidende Unterschied zwischen den schwach entwickelten *Nesthockern* und den gut entwickelten *Nestflüchtern* heutzutage allgemein anerkannt wird. In der Regel werden schwach entwickelte Jungtiere in einem Nest geboren, wo sie sich weiterentwickeln, bis sie sich unabhängig bewegen können. Die Augen und Ohren werden während der Phase im Nest geöffnet. Im Gegensatz dazu können sich die meisten

Jungtiere von Nestflüchtern, die gewöhnlich Einzeltiere sind, ab der Geburt unabhängig bewegen, und ein Nest ist kaum notwendig.

Portmann stellte fest, dass die Tragzeiten bei Müttern von Nesthockern relativ kurz sind und bei Nestflüchtern deutlich länger. Ein Extrembeispiel für einen Nesthocker ist der Große Tanrek, ein igelähnliches Säugetier auf Madagaskar, das nach einer Tragzeit von weniger als zwei Monaten ungefähr 24 Jungtiere wirft. Ein Beispiel für das andere Extrem eines Nestflüchters ist ein indisches Elefantenweibchen, das drei Tonnen wiegt und nach einer Tragzeit von 21 Monaten ein einzelnes gut entwickeltes Jungtier zur Welt bringt.

Unabhängig von der Körpergröße ist die Tragzeit einer Mutter von Nestflüchtern drei- bis viermal so lang wie die einer Mutter von Nesthockern. Ein weiblicher Gepard zum Beispiel — mit einem Körpergewicht, das mit dem Menschen vergleichbar ist — gebiert normalerweise vier nesthockende Jungtiere nach einer Tragzeit, die kaum mehr als drei Monate dauert. Dagegen bringt der Mensch gewöhnlich nur ein gut entwickeltes Kind auf die Welt, aber nach einer Schwangerschaft, die dreimal so lange dauert. Im Vergleich mit unseren nächsten zoologischen Verwandten, den anderen Primaten, entspricht die Dauer der menschlichen Schwangerschaft fast genau dem, was angesichts unserer Körpergröße zu erwarten wäre.

Interessanterweise gibt es einen ziemlich klaren Unterschied fast ohne Überschneidungen zwischen Nesthockern und Nestflüchtern, was die Dauer der Tragzeit und die Körpergröße betrifft. In den meisten Fällen gebären Plazentatiere entweder mehrere Jungtiere nach einer kurzen Tragzeit oder ein einzelnes Jungtier nach einer langen Tragzeit. Aus irgendeinem Grund kommt der Kompromiss, also die Geburt einer mittleren Wurfgröße nach einer mittleren Trächtigkeitsdauer, sehr selten vor. Natürlich muss es einen Abgleich zwischen der Anzahl der Jungtiere und der Trächtigkeitsdauer geben. Wie wir bei menschlichen Mehrlingsgeburten bereits gesehen haben, hat die Gebärmutter eine begrenzte Kapazität, und eine Mutter kann entweder ein relativ großes Kind oder mehrere kleine gebären. Der unausweichliche Abgleich zwischen Anzahl und Größe der Neugeborenen erklärt aber nicht, warum die natürliche Selektion die Plazentatiere in zwei klare Kategorien mit erstaunlich wenig Überschneidungen trennte. Dies ist eine wichtige Frage zur Evolution der Fortpflanzung bei Säugetieren, die bisher nicht beantwortet werden konnte.

PORTMANN MACHTE EINE WEITERE ENTSCHIEDENDE BEOBACHTUNG: Innerhalb jeder Säugetierordnung wird gewöhnlich nur eine Sorte Jungtiere geboren. Beuteltiere, Raubtiere, Insektenfresser, Kaninchen und Spitzhörnchen haben beispielsweise generell kurze Tragzeiten und bringen ganz oder fast haarlose nesthockende Jungtiere zur Welt. Dagegen haben sämtliche Huftiere, Wale, Elefanten, Fledermäuse und Primaten normalerweise lange Tragzeiten und gebären behaarte nestflüchtende Jungtiere. Die Nagetiere sind außergewöhnlich, da bei ihnen zum Teil nesthockende — Mäuse und Ratten zum Beispiel — aber auch nestflüchtende Jungtiere — Meerschweinchen — geboren werden. Allerdings gibt es bei ihnen normalerweise nur eine Jungtiersorte bei jeder Unterordnung. Da jede Hauptgruppe der Säugetiere eine typische Jungtiersorte hat, nahm Portmann an, dass dieser Unterschied schon in einem frühen Evolutionsstadium etabliert wurde.

Es trifft sich, dass wir bei der Erforschung der Evolution der Neugeborenentypen das seltene Glück haben, dass der Urzustand deutlich erkennbar ist. Portmann und sein Kollegen entdeckten, dass bei nestflüchtenden Säugtieren die Augen und Ohren während der Trächtigkeit mit Membranen verschlossen werden, aber vor der Geburt wieder geöffnet. In der Mitte einer menschlichen Schwangerschaft beispielsweise sind die Augen und Ohren des Fötus eindeutig verschlossen, öffnen sich aber etwa drei Monate vor der Geburt wieder. Bei nestflüchtenden Säugetieren wie den Primaten wurde bei der Entstehung längerer Tragzeiten eine vorher bestehende Nestphase offenbar in die Entwicklung in der Gebärmutter integriert.

Hierzu liefern Vergleiche mit Vögeln wertvolle Belege. Vögel sind wie Säugetiere entweder Nesthocker oder Nestflüchter. Schlüpfende nesthockende Vögel ähneln den Neugeborenen von nesthockenden Säugetieren darin, dass sie größtenteils nackt sind und verschlossene Augen und Ohren haben. Bei Vögeln sind aber die Nestflüchter mit nur schwach entwickelter elterlicher Versorgung der Urzustand. Das heißt, dass Vögel ursprünglich von Vorfahren ohne ausgedehnte Nestphase abstammen. Und tatsächlich ist es so, dass bei der Entwicklung eines nestflüchtenden Vogels im Ei die Augen und Ohren nicht wie beim Fötus aller nestflüchtenden Säugetiere vorübergehend verschlossen werden.

Höchstwahrscheinlich brachten die Vorfahren der Plazentatiere wie die Beuteltiere nesthockende Jungtiere zur Welt. Der Zustand bei nestflüchten-

den Jungtieren, der mit längeren Tragzeiten und meist nur noch Einzelgeburten einhergeht, ist daher eine spätere und fortschrittlichere Entwicklung. Mit diesem Wissen können wir die Evolution des Neugeborenentypus mithilfe eines DNA-basierten Stammbaums für Säugetiere nachverfolgen. Davon ausgehend, dass alle evolutionären Veränderungen seit dem Nesthockerzustand des gemeinsamen Vorfahren ohne jegliche Umkehrung stattfanden, kommt man zu dem Schluss, dass der Wechsel zum Nestflüchter in mindestens zehn unterschiedlichen Stammlinien unabhängig erfolgte. Eine dieser zehn Stammlinien führte zu den nestflüchtenden Primaten. Oder anders ausgedrückt, die Integration einer ursprünglichen Nestphase in die Trächtigkeit kam mindestens zehnmal in unterschiedlichen Stammlinien vor. Hier sehen wir ein wirklich bemerkenswertes Beispiel der mehrfachen Konvergenz in der Evolution.

Kehren wir nun zu Portmanns Vorschlag zurück, dass bei der Evolution jeder Hauptgruppe der Säugetiere sehr früh ein bestimmter Neugeborenentypus festgelegt wurde. Da Nesthocker der Urzustand ist, muss der Übergang von nesthockenden zu nestflüchtenden Jungtieren während der frühen Evolution bei mindestens zehn Hauptgruppen der Plazentatiere unabhängig voneinander stattgefunden haben. Als Portmann seine Schlussfolgerung äußerte, rechnete er wahrscheinlich nicht damit, dass sie eines Tages durch Fossilbelege bestätigt würde.

Eine Säugetierordnung, die mittlerweile einheitlich durch Einzelgeburten nestflüchtender Jungtiere gekennzeichnet wird, ist die Gruppe der Unpaarhufer. Zu ihr gehören die Pferde, deren Evolution durch die Fossilgeschichte bis zum frühen Eozän vor 55 Millionen Jahren zurückverfolgt werden kann. Die fast 50 Millionen Jahre alte Eozän-Fundstelle im süddeutschen Messel ist wegen ihrer vorzüglich erhaltenen Fossilien weithin berühmt. Unter den zahlreichen Fossilien befinden sich mehr als 60 Skelette des Urpferds *Eurohippus*, das etwa so groß wie ein Foxterrier war. Bei näherer Betrachtung stellte man fest, dass acht dieser fossilisierten Pferde Reste eines gut entwickelten Fötus aufwiesen. Dadurch weiß man, dass Pferde bereits vor 50 Millionen Jahren nur ein nestflüchtendes Jungtier zur Welt brachten. An der Messeler Fundstelle wurden auch fossilisierte Skelette von über 100 Fledermäusen entdeckt. Eines davon, ein Skelett der Gattung *Palaeochiropteryx*, enthält die Reste von zwei gutentwickelten Föten. Anhand dieses Exemplars können wir schlussfolgern, dass Fledermäuse auch vor 50

Millionen Jahren eine begrenzte Anzahl nestflüchtender Jungtiere gebären. Diese Befunde stützen die Schlussfolgerung, dass die gemeinsamen Vorfahren der heutigen Primaten, die einheitlich nestflüchtende Jungtiere zur Welt bringen, wahrscheinlich auch bereits Nestflüchter waren.

NEUGEBORENE PRIMATEN SIND GUT ENTWICKELT und entsprechen allgemein der Standarddefinition nestflüchtender Säugetiere. Neugeborene Primaten haben ein Haarkleid, und die Augen und Ohren sind gewöhnlich offen. Sie haben auch relativ lange Tragzeiten und gebären in den meisten Fällen einzelne Jungtiere. Zwischen neugeborenen Primaten und den Jungtieren anderer nestflüchtender Säugetiere gibt es aber auch wichtige Unterschiede. Die meisten nestflüchtenden Jungtiere können sich bald nach der Geburt unabhängig bewegen. Dies gilt beispielsweise für alle Huftiere, Wale und Elefanten. Bei den Primaten dagegen werden die Jungtiere, die sich am Fell der Mutter oder eines anderen Gruppenmitglieds festklammern, im Allgemeinen längere Zeit nach der Geburt herumgetragen. Primatenjungtiere sind per Definition also Nestflüchter, aber nicht so unabhängig wie die Jungtiere anderer nestflüchtender Säugetiere. Wie wir in Kapitel 7 sehen werden, hat diese Tatsache für die elterliche Versorgung eine große Bedeutung.

Obwohl die neugeborenen Jungtiere der nicht-menschlichen Primaten generell ins Muster der Nestflüchter passen, werden Menschenkinder häufig als Nesthocker bezeichnet. Menschliche Neugeborene sind im Vergleich zu anderen Primaten in der Tat unterentwickelt. Trotzdem wäre es irreführend, sie als Nesthocker zu bezeichnen. Zunächst sind Menschen, wie schon erklärt, wie andere Primaten und nestflüchtende Säugetiere relativ lang schwanger. Und bei der Geburt sind die Augen und Ohren eines Kindes bereits offen.

Man könnte meinen, dass ein neugeborener Mensch nicht der Standarddefinition der nestflüchtenden Säugetiere entspricht, weil er nur wenig Haare hat. Es hat sich aber eindeutig herausgestellt, dass unser Haarverlust eine evolutionäre Sekundarentwicklung ist, wie der Buchtitel *Der nackte Affe* von Desmond Morris nachdrücklich herausstellt. In der Tat ist der menschliche Fötus zwischen dem fünften und siebten Schwangerschaftsmonat mit feinen, seidigen, hellen Haaren bedeckt, die er normalerweise vor der Geburt verliert. Falls das Kind acht Wochen vor dem Geburtsdatum oder noch

früher auf die Welt kommt, ist diese sogenannte Lanugobehaarung (benannt nach dem lateinischen Wort *lanugo* für Daunenfedern) noch vorhanden. Seltsamerweise wird diese fötale Behaarung bei schweren Fällen von Mager-sucht wieder entwickelt, womöglich um bei einem stark abgemagerten Körper den Wärmeverlust zu reduzieren. Es gibt auch einen dominanten genetischen Zustand, bei dem die Lanugobehaarung bis ins Erwachsenenalter bestehen bleibt. Da dieses Merkmal in der Familie liegt, gab es gelegentliche Berichte über »Affmen-schen« oder Reliktpopulationen von Neandertalern, die in abgelegenen Regionen Asiens überlebt haben.

Obwohl Menschen größtenteils der Standarddefinition der nestflüchtenden Säugetiere entsprechen, unterscheiden sich Neugeborene aufgrund einiger ungewöhnlicher Merkmale durchaus von den Jungtieren anderer Primaten. Relativ gesehen, sind Säuglinge hilflos: Unsere Babys bewegen sich viel weniger und sind nach der Geburt viel stärker von elterlicher Fürsorge abhängig als andere Primatenkinder. Im Gegensatz zu diesen können neugeborene Menschen nach der Geburt nicht mit ihren Füßen greifen und sich daher nicht am Fell der Mutter festklammern. Und ihre Abhängigkeit dauert sehr lange. Unsere einzigartige Fähigkeit, auf zwei Beinen zu gehen, entwickelt sich erst etwa ein Jahr nach der Geburt. Bis zu diesem Zeitpunkt ist das Kind zunächst unbeweglich und anschließend darauf beschränkt, auf Händen und Knien herumzukriechen oder auf dem Po hin und her zu rutschen. Wir sind die einzigen Primaten, bei denen die Kinder sich ganz anders als Erwachsene bewegen. Alle genannten Unterschiede gehen auf eine Hauptursache zurück: Bei der Geburt ist das menschliche Gehirn nicht so weit entwickelt. Im nächsten Kapitel werden wir diesen Unterschied genauer unter die Lupe nehmen. Portmann war sich selbstverständlich bewusst, dass unsere Kinder im Vergleich zu anderen nestflüchtenden Jungtieren eigenartig sind. Deswegen bezeichnete er das neugeborene Baby als »sekundären Nesthocker«.

EINE EINGEHENDE PRÜFUNG des Themas Neugeborenenengröße führt zu weiteren Erkenntnissen bezüglich der Tragzeit und des Jungtiertypus. Wegen der beschränkten Kapazität der Gebärmutter ist es nur naheliegend, dass neugeborene Nesthocker relativ klein sein müssen, während neugeborene Nestflüchter verhältnismäßig groß sind. Mit Analysen, die die Körper-

größe der Mutter entsprechend berücksichtigten, konnte bestätigt werden, dass nestflüchtende Neugeborene in der Tat größer als nesthockende sind.

Innerhalb einzelner Säugetiergruppen bestehen noch feinere Unterschiede zwischen Neugeborenen. Ein wichtiger Befund, der auf das Jahr 1973 und den Anthropologen Walter Leutenegger zurückgeht, zeigte, dass Koboldmakis und höhere Primaten einheitlich größere Neugeborene zur Welt bringen als Lemuren und Loris. Der Unterschied ist beträchtlich. Bei Koboldmakis oder höheren Primaten ist das neugeborene Jungtier durchschnittlich etwa dreimal so groß wie ein typischer Lemur oder Lori mit einer vergleichbaren Muttergröße. Aus diesem Grund wäre der Schluss naheliegend, dass dieser Befund die Deutung bestätigt, dass eine invasive Plazenta zwangsläufig effizienter ist. Dies ist aber nur ein weiteres Beispiel der »Storch-Baby-Falle«, bei dem im Hintergrund Störfaktoren lauern. Vergleiche mit anderen Säugetieren bieten sich als idealer Test an. Wenn eine nicht-invasive Plazenta ineffizient ist, sollten alle Säugetiere mit einer derartigen Plazenta relativ kleine Neugeborene zur Welt bringen.

Vergleiche der Körpergröße ergaben tatsächlich, dass bei Primaten Neugeborene — sogar diejenigen von Koboldmakis und höheren Primaten — allgemein kleiner sind als andere nestflüchtende Säugetiere. Relativ zur Körpergröße der Mutter gebären Huftiere, Wale, Elefanten und Seekühe die größten Neugeborenen, aber eine hochinvasive Plazenta kommt bei keiner einzigen Gruppe vor. Elefanten und Seekühe haben eine mäßig invasive Plazenta, während die Plazenta bei allen Huftieren und Walen nicht-invasiv ist. Übergreifende Vergleiche unter Säugetieren zeigen deutlich, dass keine Verbindung zwischen der Größe des Neugeborenen und dem Eindringungsgrad der Plazenta besteht. Folglich ist eine nicht-invasive Plazenta an sich keineswegs ineffizient.

AN DIESER STELLE KÖNNEN WIR ZUR URSPRÜNGLICHEN FRAGE ZURÜCKKEHREN, wie handfest die Belege sind, die angeblich zeigen, dass eine nicht-invasive Plazenta bei den Plazentatieren der Urzustand ist. Wie bereits gezeigt, gibt es mehrere Hinweise, dass diese häufig geäußerte Schlussfolgerung unberechtigt ist. Unter Säugetieren sind Nesthocker vermutlich der primitive Zustand und Nestflüchter fortgeschritten. Wenn die nicht-invasive Form der Plazenta tatsächlich primitiv und ineffizient wäre,

müsste es einen Zusammenhang mit nesthockenden Jungtieren geben, doch genau das Gegenteil ist der Fall. Säugetiere mit einer nicht-invasiven Plazenta bringen in aller Regel nestflüchtende Jungtiere zur Welt. Nesthockende Jungtiere kommen fast ausschließlich bei Säugetieren mit einer mäßig invasiven oder hochinvasiven Plazenta vor, obwohl verschiedene Säugetiere mit einer invasiven Plazenta auch nestflüchtende Jungtiere gebären. Die einzige sichere Schlussfolgerung, die wir ziehen können, ist, dass eine nicht-invasive Plazenta praktisch nie mit dem primitiven nesthockenden Jungtiertypus einhergeht.

Ein komplementärer Ansatz besteht darin, die Verteilung der Plazentatypen auf einem DNA-basierten Stammbaum der Plazentatiere zu untersuchen. Eine allgemeine Richtlinie, der man in der Evolutionsforschung häufig folgt, ist der Grundsatz der Sparsamkeit: Wenn man unter alternativen Rekonstruktionen auswählen muss, ist die Variante, die am wenigsten Veränderungen erfordert, am ehesten die richtige. Wir beginnen mit einem Vergleich der drei alternativen Stammbäume von Säugetieren, bei denen man jeweils von einem der drei Plazentatypen als Urzustand ausgeht. Als nächsten Schritt berechnen wir für jeden Stammbaum die Mindestanzahl der Veränderungen, die für die Verteilung der Plazentatypen unter den heutigen Säugetiergruppen nötig sind. Vier unabhängige Untersuchungen — darunter meine eigene — die diese Methode verwendeten, kamen zu dem Schluss, dass die Plazenta beim gemeinsamen Vorfahren der Plazentatiere wahrscheinlich invasiv war. Die Ergebnisse gingen aber auseinander bezüglich der Frage, ob der ursprüngliche Zustand mäßig invasiv oder hochinvasiv war. Meine eigene Schlussfolgerung ist, dass die Plazenta beim gemeinsamen Vorfahren der Plazentatiere mäßig invasiv war. Dieses Ergebnis bedeutet, dass die Evolution der Plazenta bei Primaten in zwei sehr unterschiedliche Richtungen verlief. Beim gemeinsamen Vorfahren der Lemuren und Loris fand eine Verschiebung zu einer weniger invasiven Plazenta statt, die zum heutigen nicht-invasiven Zustand führte. Beim gemeinsamen Vorfahren der Koboldmakis und höheren Primaten dagegen wurde die Plazenta hochinvasiv.

Tatsache bleibt, dass es während der Evolution der Plazenta zwangsläufig ein nicht-invasives Stadium gab, in dem sich das Ei mit dem Jungen in der Gebärmutter befand und nur oberflächlichen Kontakt mit deren Innenwand hatte. Aber dieser ursprüngliche, nicht-invasive Zustand existierte vermutlich lange vor der Entstehung des gemeinsamen Vorfahren der heutigen Pla-

zentatiere. Wir dürfen nicht vergessen, dass die getrennte Entwicklung der Beuteltiere und der Plazentatiere vor mindestens 125 Millionen Jahren begann. Dagegen ist der gemeinsame Vorfahre der heutigen Plazentatiere gar nicht so alt, vielleicht etwa 100 Millionen Jahre. Damit bleibt ein Zeitraum von 25 Millionen Jahren oder mehr für die Evolution einer mäßig invasiven Plazenta übrig.

AN DIESER STELLE DENKT DER LESER WOMÖGLICH, »Na, und? Welche Relevanz hat die Evolutionsgeschichte der Plazenta bei Säugetieren für den modernen Menschen?« Meiner Meinung nach eine sehr große. Die schon lange herrschende Meinung, die hochinvasive Plazenta des Menschen wäre nicht nur extrem fortgeschritten, sondern auch extrem effizient, stimmt gar nicht. Vergleichbares Material von Plazentatieren zeigt ganz klar, dass eine nicht-invasive Plazenta die mütterliche Versorgung der Jungtiere genauso effizient umsetzen kann. Was aber ist seine Bedeutung, wenn zwischen dem Plazentatypus und der mütterlichen Versorgungseffizienz kein Zusammenhang besteht?

Sehr wahrscheinlich spiegelt der Plazentatypus stattdessen einen Abgleich mit immunologischen Faktoren wider. Wie am Anfang dieses Kapitels festgestellt, hat ein Junges, das sich im Mutterleib entwickelt, viele fremde Proteine, die mit den Genen des Vaters programmiert sind. Entsprechend muss es spezielle Mechanismen geben, die das Immunsystem der Mutter davon abhalten, den Säugling abzustoßen. Je mehr die Plazenta aber in das mütterliche Gewebe eindringt, desto größer wird die Herausforderung für das Immunsystem. Die eigentliche Frage lautet daher: Warum existiert ein invasiver Plazentatypus überhaupt, wenn die mütterliche Versorgung mit gleicher Effizienz durch eine nicht-invasive Plazenta zum Säugling gelangen könnte? Immunologisch gesehen, muss eine invasive Plazenta Vorteile und nicht nur Nachteile besitzen. Anstatt weiter die überholte Vorstellung zu verfolgen, dass eine hochinvasive Plazenta zwangsläufig effizienter sein müsste, sollte sich die Forschung in Zukunft mehr auf das Immunsystem konzentrieren.

Wenn alles gut geht, steht am Ende einer neunmonatigen Schwangerschaft die Geburt eines Menschen. Im nächsten Kapitel werden wir einige zentrale Aspekte des Geburtsvorgangs selbst diskutieren. Der Geburtszeit-

punkt und das Schicksal der Plazenta sind aber zwei Besonderheiten, die zuvor eine Erörterung verdienen.

WIE DIE BIOLOGIN ALISON JOLLY 1972 NACHWIES, kommt es bei nicht-menschlichen Primaten am häufigsten zur Geburt, wenn die Mutter sich in der Ruhephase ihres Tageszyklus befindet. Dieses Muster ist unter Säugetieren im Allgemeinen weit verbreitet und zweifellos für viele baumlebende Primaten von Vorteil. Um der Aufmerksamkeit von Raubtieren zu entgehen, muss die Geburt möglichst unauffällig in den Ästen eines Baumes vonstattengehen.

Im Gegensatz zu vielen anderen tagaktiven Primaten finden menschliche Geburten — wie alle Eltern wissen — keineswegs nur während der Nacht statt. Trotzdem gibt es ein grundlegendes Muster. Allerdings sind medizinische Eingriffe bei der Geburt dermaßen weit verbreitet, dass es schwierig geworden ist, an zuverlässige Informationen zu gelangen. Bevor diese intensive Manipulation aber alltäglich wurde, wurden in früheren Berichten die natürlichen Geburtszeiten dokumentiert. Adolphe Quetelet, der als erster ein jahreszeitliches Geburtenmuster beim Menschen entdeckte, stellte auch einen täglichen Geburtsrhythmus mit einem Höchstwert um Mitternacht und einem Tiefpunkt um die Mittagszeit fest. 1933, also einige Jahrzehnte später, fasste der Kinderarzt Edouard Jenny die Daten von mehr als 350.000 Geburten in der Schweiz im Zeitraum von 1926 bis 1930 zusammen. Er stellte fest, dass es zwar jederzeit zur Geburt kommen kann, am häufigsten aber zwischen 2 Uhr und 5 Uhr und am seltensten zwischen 13 Uhr und 19 Uhr. Während des Höhepunkts am frühen Morgen gab es etwa 40 Prozent mehr Geburten als während der Nachmittagsstunden. Andere Studien, beispielsweise jene der Amerikaner Irwin Kaiser und Franz Halberg und der Deutschen C. F. Danz und C. F. Fuchs bestätigten dieses Muster. Diese Befunde sind besonders wertvoll, da sie aus einer Zeit stammen, als die ärztliche Manipulation menschlicher Geburten noch eingeschränkt war. Sehr interessant war die Entdeckung, dass die Wehen während der Spitzenzeiten für Geburten signifikant kürzer dauerten, und am längsten während der Zeit, zu der weniger Geburten vorkommen.

Sämtliche verfügbare Hinweise deuten darauf hin, dass ein natürlicher Rhythmus das Einsetzen der Wehen und daher die Geburtszeit beim Men-

schen beeinflusst, sofern es keine künstlichen Eingriffe gibt. Spontane Geburten kommen rund um die Uhr vor, während der frühen Morgenstunden aber häufiger als nachmittags oder abends. Eine genauere Prüfung lässt erkennen, dass das Einsetzen der Wehen das deutlichste zeitliche Muster aufweist und nicht die Geburtszeit. Bei allen Müttern — auch bei denen, die zum ersten Mal niederkommen — gibt es etwa um 2 Uhr einen deutlichen Höchstwert für das Einsetzen der Wehen. Dieses Muster ist womöglich nur ein Überbleibsel unserer Vorfahren, die vorwiegend auf nächtliche Geburten angepasst waren, um Raubtieren aus dem Weg zu gehen. Überaus wahrscheinlich ist aber, dass der Grundrhythmus biologisch weiterhin von Bedeutung ist, und dass die frühen Morgenstunden die optimale Zeit für eine menschliche Geburt sind.

Die physiologischen Vorgänge, die dem zeitlichen Verlauf der Geburt zugrunde liegen, wurden leider wenig erforscht, aber in einem 1994 auf ihrer Doktorarbeit basierenden Artikel veröffentlichte die Gynäkologin Maria Honnebier einige interessante Ergebnisse. Sie führte eine vergleichende Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Schwangerschaft und der Geburtswehen bei Frauen und Rhesusaffen durch. Verschiedene physiologische Merkmale wie Körpertemperatur, Blutdruck, Herzschlag, Hormonspiegel während der Schwangerschaft und kleine Muskelzuckungen (Kontraktionen) in der Gebärmutterwand variieren rund um die Uhr. Sowohl bei Rhesusaffen als auch bei Frauen werden die Kontraktionen kurz vor der Geburt von den eigentlichen Wehen (Kontraktionen) abgelöst. Bei diesem Wandel spielt das Hormon Oxytocin eine bedeutende Rolle. Bei Rhesusaffen gibt es einen eindeutigen täglichen Rhythmus des Oxytocinspiegels im Blut, und die höchste Konzentration findet zur gleichen Zeit wie die Wehen statt. Honnebier führte bei Rhesusaffen auch Impulstests mit Oxytocin durch, um die Reaktionsfähigkeit der Gebärmutter zu bewerten. Die stärkste Reaktion wurde während der Nachtstunden festgestellt. Bei neun Frauen, die zwischen den Schwangerschaftswochen 19 und 20 getestet wurden, kam sie zu demselben Ergebnis. Allem Anschein nach gibt es somit eine physiologische Basis für den täglichen Rhythmus der spontanen Geburten beim Menschen. Wie Jolly 1972 schlussfolgerte, unterliegt die menschliche Geburtszeit wahrscheinlich noch der natürlichen Selektion.

DAS SCHICKSAL DER PLAZENTA bei der menschlichen Geburt ist ebenfalls von besonderem Interesse. Bei den meisten Plazentatieren frisst das Weibchen die Plazenta kurz nach der Geburt auf. Wie Benjamin Tycko und Argiris Efstratiadis in einem Kommentar in der Zeitschrift *Nature* treffend bemerkten, »haben sie ihren Kuchen und essen ihn auch.« (Das Wort »Plazenta« stammt vom griechischen Ausdruck für »flacher Kuchen«.) Besonders auffällig beim Auffressen der Plazenta (Plazentophagie) ist, dass Pflanzenfresser wie Ziegen, die normalerweise kein Fleisch fressen, die Plazenta genauso eifrig wie Raubtiere verschlingen. Bemerkenswerte Ausnahmen sind Robben, Seelöwen, Delphine, Wale und, aus irgendeinem Grund, Kamele. Wie die meisten anderen Säugetiere fressen alle nicht-menschlichen Primaten die Plazenta nach der Geburt ganz unabhängig von ihrem normalen Nahrungsverhalten auf. Falls eine Mutter in einer Zuchtkolonie von Primaten nach der Geburt nicht die Plazenta verspeist, ist das ein ziemlich klares Zeichen, dass sie ihr Jungtier nicht aufziehen wird. Bei den großen Menschenaffen — Schimpansen, Gorillas und Orang-Utans — ist es immer noch so, dass etwa ein Viertel der in Gefangenschaft geborenen Jungtiere nicht von der Mutter aufgezogen wird. In solchen Fällen wird die Plazenta meist nicht aufgeessen.

Das Auffressen der Plazenta wird seit langem damit erklärt, dass es dazu dient, die Geburt vor Raubtieren zu verheimlichen. Weitere Möglichkeiten sind, dass das Auffressen der Plazenta für die Gesundheit der Mutter vorteilhaft ist und/oder den Beginn der mütterlichen Fürsorge auslöst. Die Plazenta enthält beträchtliche Mengen von Prostaglandinen, die die Rückentwicklung der Gebärmutter zu ursprünglicher Größe und Zustand fördern. Sie enthält auch Spuren von Oxytocin, das die Anstrengungen der Geburt reduziert und die Kontraktion der Muskeln an den Milchdrüsen und dadurch den Ausstoß der Milch fördert.

In vielen menschlichen Gesellschaften hat die Plazenta eine besondere kulturelle Bedeutung, aber nur selten wird sie nach der Geburt aufgeessen. In einem 1945 veröffentlichten Übersichtsartikel, der auf der *Cross-Cultural Survey* der Yale University basierte, hielt der amerikanische Anthropologe Clellan Ford fest, dass die Plazenta bei der Hälfte der untersuchten Gesellschaften begraben wurde. Einige Gesellschaften glauben jedoch, dass das Essen der Plazenta wohltuende Wirkungen wie die Linderung der Wochenbettdepression und anderer Komplikationen der Schwangerschaft hätte. Be-

kannt ist, dass es auf Hawaii, in Mexiko, auf einigen Pazifikinseln und in China Populationen gibt, die die Plazenta aufessen. Die Plazenta ist auch ein Bestandteil bestimmter Medikamente in der traditionellen chinesischen Medizin. Es liegen aber keine eindeutigen wissenschaftlichen Beweise vor, dass das Aufessen der Plazenta irgendeinen direkten Nutzen für die Mütter mit sich bringen würde. Dennoch ist in letzter Zeit in den Vereinigten Staaten und in Europa das Interesse an möglichen wohltuenden Eigenschaften markant gestiegen. Ein prominentes Beispiel ist die amerikanische Psychologin Jodi Selander, die 2006 die Website PlacentaBenefits.info gründete, auf der sie Mütter für das Aufessen der Plazenta nach der Geburt begeistern möchte. Sie entwickelte eine kommerzielle Methode zur Verkapselung der Plazenta, die auf Verfahren der traditionellen chinesischen Medizin basiert. Laut ihrer Website beschleunigt der Verzehr von Plazentakapseln die Erholung nach der Geburt und verringert das Risiko einer postnatalen Depression. Wollen Sie ihre Plazenta für den späteren Verzehr verkapseln lassen, steht Ihnen aber ein mühseliger Kampf bevor. Wie es heißt, sind einige Krankenhäuser nicht bereit, einer frisch gebackenen Mutter ohne Weiteres die Plazenta auszuhändigen, damit sie diese zum Verzehr mit nach Hause mitnehmen kann. Planen Sie ihre Geburt also sorgfältig im Voraus.

KAPITEL 5

Die Entwicklung eines großen Gehirns

Immer wenn ich in meiner Jugend bei einer Prüfung erfolgreich abgeschnitten hatte, meinte meine Mutter: »Deinen Verstand hast Du von Deinem Vater.« Das erschien mir unwahrscheinlich, da die Hälfte meiner Gene von ihr und die andere Hälfte von meinem Vater stammen. Später zeigten meine Untersuchungen der Evolution des Gehirns letztlich, dass meine Mutter in falscher Bescheidenheit den entscheidenden Beitrag zur Gehirnentwicklung, den alle Mütter leisten, dementiert hatte. Zumindest im Hinblick auf die investierten Mittel verdanken alle Säugetiere ihren Müttern ihre Gehirne.

Das Gehirn ist die Kommandozentrale des Körpers und zählt zu unseren wichtigsten Organen. Die Evolution des Gehirns bei Säugetieren, besonders die außergewöhnliche Größe des menschlichen Gehirns, wurde intensiv erforscht. Trotz dieses gewaltigen Interesses blieb der enge Zusammenhang zwischen Fortpflanzung und Entwicklung des Gehirns aber oft unerwähnt. Wegen seines hohen Energieverbrauchs ist das Gehirn eines der aufwändigsten Körperorgane. Bei erwachsenen Säugetieren ist der durchschnittliche Energieverbrauch pro Gramm Hirngewebe etwa zehnmal höher als der anderer Gewebearten. Obwohl das Gehirn bei einem erwachsenen Menschen mit durchschnittlich 1.350 Gramm nur zwei Prozent des gesamten Körpergewichts ausmacht, verbraucht es etwa ein Fünftel des Energieumsatzes des Körpers.

Die Entwicklung des Gehirns kostet sogar noch mehr Energie. Vereinfacht gesagt, kommen zu den normalen Betriebskosten noch die Entwick-

lungskosten hinzu, wodurch die Ressourcen stark beansprucht werden. Wie jeder Betrieb (von öffentlichen Einrichtungen abgesehen) muss der Körper einen ausgeglichenen Haushalt erzielen, um erfolgreich zu sein. Die höheren Kosten für die Entwicklung und den Betrieb eines größeren Gehirns müssen daher irgendwie ausgeglichen werden. Dieser Ausgleich kann durch eine Kombination von gespeicherten Ressourcen (Rückgriff auf Reserven), erhöhter Energieaufnahme (Erhöhung der Einnahmen) oder gesunkenen Aufwendungen für andere Körperteile (Abbau in anderen Bereichen) erfolgen. Um einen ausgeglichenen Haushalt zu erzielen, gibt es häufig einen Abgleich zwischen den Kosten für das Gehirn und anderen Aufwendungen, vor allem solchen im Bereich der Fortpflanzung.

WIE ES DER ZUFALL WOLLTE, begünstigte meine Erforschung der Evolution der Primaten von vornherein eine ungewöhnliche Kombination aus Fragen zur Fortpflanzungsbiologie und zur Evolution des Gehirns. Diese Themenmischung machte mich auf Querverbindungen zwischen diesen beiden Bereichen aufmerksam. Sie wies mich vor allem auf die Investitionen hin, die jede Mutter für die Entwicklung ihrer Nachkommen erbringt. Im Allgemeinen neigen Evolutionsbiologen zu der Frage, *wozu braucht* eine bestimmte Säugetierart überhaupt ein großes Gehirn. Mein Ansatz war stattdessen, die Frage zu stellen, wie sich eine Säugetierart ein großes Gehirn *leisten kann*.

Biologisch gesehen, besteht der entscheidende Punkt darin, dass bei allen Säugetieren die Mutter den größten Beitrag zur Gehirnentwicklung der Jungtiere leistet. Zunächst wird der Nachwuchs während der Schwangerschaft durch die Plazenta versorgt. Anschließend säugt die Mutter das Jungtier nach der Geburt und versorgt es mit ihrer Milch bis zur Entwöhnung mit weiteren Nährstoffen. Abgesehen davon, dass das Gehirn auffällig viel Energie verbraucht, ragt es im Vergleich zu anderen Organen auch in anderer Hinsicht heraus: Durch schnelles Wachstum zu Beginn seiner Entwicklung erreicht es rasch die endgültige Größe. Diese rasche Entwicklung ist nachvollziehbar, da das Gehirn — der Bordcomputer des Körpers — funktionsfähig sein muss, sobald sich das Jungtier unabhängig bewegt. Bei Säugetieren ist das Wachstum des Gehirns, zumindest im Hinblick auf seine Größe, normalerweise bis zum Zeitpunkt der Entwöhnung weitgehend ab-

geschlossen. Nach der raschen Entwicklung zu Beginn folgt ein relativer Stillstand. Dies erklärt, warum der Kopf eines neugeborenen Säugetiers im Vergleich zum Rest des Körpers unverhältnismäßig groß ist und sich dann bis zum Erwachsenenalter immer mehr angleicht.

Im Gegensatz zum Gehirn wachsen andere wichtige Organsysteme — Herz, Lungen, Leber, Nieren, Verdauungstrakt, Muskeln und Skelett — zwischen der Geburt und der Geschlechtsreife ziemlich gleichmäßig und kontinuierlich. Beim Menschen beispielsweise erreicht das Gehirn bis zum Alter von sieben Jahren nahezu die endgültige Größe, aber der restliche Körper wächst etwa vierzehn Jahre lang weiter. Im Verlauf der späteren Entwicklung wird das Gehirn also zunehmend von anderen Organen überholt. Bei einem neugeborenen Menschen macht das Gehirn ungefähr zehn Prozent des Körpergewichts aus, bei Erwachsenen aber nur noch zwei Prozent. Weil sein Energiebedarf so hoch ist und es ein Zehntel des Körpergewichts ausmacht, verbraucht das Gehirn eines neugeborenen Menschen tatsächlich etwa 60 Prozent des gesamten Energieumsatzes. Dieser hohe Verbrauch nimmt dann allmählich ab, bis der normale Erwachsenenwert von ungefähr 20 Prozent erreicht wird.

MEINE VERGLEICHE ZWISCHEN SÄUGETIEREN ergaben, dass die Größe des Gehirns im Erwachsenenalter nicht nur mit dem Energieverbrauch, sondern auch stark mit der Trächtigkeitsdauer zusammenhängt. Diese Entdeckung bestätigte mein Bauchgefühl, dass die Entwicklung des Gehirns eng mit der Fortpflanzung verbunden ist. Der erste klare Hinweis auf diesen Zusammenhang stammte von den Biologen George Sacher und Everett Staffeldt. Sie analysierten 1974 die Daten einer repräsentativen Auswahl von Säugetierarten und zeigten, dass die Trächtigkeitsdauer stärker mit der Gehirngröße der neugeborenen Jungtiere zusammenhängt als mit deren Körpergröße. Aus diesem Befund zogen Sacher und Staffeldt den Schluss, dass das Gehirn möglicherweise als Schrittmacher für die Entwicklung des Fötus dient. Dieser Ansatz wurde noch keiner weiteren Prüfung unterzogen, aber es steht auf jeden Fall fest, dass die Gehirngröße bei der Geburt in starkem Zusammenhang mit der Trächtigkeitsdauer steht.

Nach der Geburt wird das Wachstum des Gehirns mithilfe der Nährstoffe in der Muttermilch fortgesetzt. Dies bedeutet, dass der Zeitraum, in dem der

Nachwuchs gesäugt wird, ebenfalls mit der endgültigen Größe des Gehirns korreliert. Trotzdem hängt die endgültige Größe des Gehirns vor allem mit der Trächtigkeitsdauer zusammen. Bei Säugetieren erreicht das Gehirn bis zum Ende der Säugezeit normalerweise etwa 90 Prozent seiner endgültigen Größe. Deshalb kann es keinen Zweifel geben, dass die Mutter den Löwenanteil zur Entwicklung des Gehirns beisteuert.

Neben der Verbindung zur Trächtigkeitsdauer steht die Gehirngröße bei Säugetieren auch in einem klaren statistischen Zusammenhang zum Energieumsatz. Letztlich führte mich die Erkenntnis, dass Gehirngröße, Trächtigkeitsdauer und Energiekosten zusammenhängen, zur »Hypothese der mütterlichen Energie«. Gemäß dieser Hypothese beeinflusst der Energieumsatz der Mutter während der Trächtigkeit direkt die Größe des Gehirns bei ihrem Jungtier. Je länger die Trächtigkeit dauert oder je höher ihr Energieumsatz ist, desto mehr Nährstoffe kann die Mutter durch die Plazenta unter ansonsten identischen Bedingungen zur Förderung der Gehirnentwicklung an den Fötus weitergeben. Auf ähnliche Weise beeinflusst der Energieumsatz der Mutter ihren Beitrag zum Gehirnwachstum des Jungtiers nach der Geburt, während sie es säugt. Mit der steigenden kombinierten Dauer von Trächtigkeit und Säugezeit nimmt auch der Zeitraum zu, in dem die Mutter ihren Nachwuchs mit Nährstoffen für das Gehirnwachstum versorgt. Wenn das Jungtier schließlich das Erwachsenenalter erreicht hat, kann man seine endgültige Gehirngröße tatsächlich vorwiegend der Versorgung mit mütterlichen Nährstoffen zuschreiben.

Diese allgemeine Regel gilt für alle Primaten, sie weisen aber auch ein einzigartiges Verhältnis zwischen dem Wachstum des Gehirns und der Entwicklung des restlichen Körpers auf. Während der gesamten fötalen Entwicklung unterscheiden sich Primaten durchweg von allen andern Säugetieren. Auch in diesem Zusammenhang leistete George Sacher — diesmal 1982 — einen bahnbrechenden Beitrag für unser Verständnis der Entwicklung des Gehirns. Er entdeckte ein wichtiges Prinzip, das heutzutage als »Sachersche Regel« bekannt ist: In allen Trächtigkeitsstadien hat ein Primatenfötus ungefähr zweimal so viel Gehirngewebe wie ein gleich großer Fötus aller anderen Säugetiergruppen. Mit anderen Worten: Die Entwicklung des Gehirns wird bei Primaten vorrangig behandelt.

Die Informationen, die Sacher bei seiner Untersuchung zur Verfügung standen, waren aber stark eingeschränkt, da Gehirn- und Körpergröße wäh-

rend der Fötalentwicklung sowohl bei Primaten als auch bei anderen Säugetieren selten gemessen wurden. Zum Glück gibt es einen indirekten Weg, um die Sachersche Regel zu überprüfen. Da sich Primaten und andere Säugetiere in allen Stadien der Fötalentwicklung unterscheiden, gilt dies auch noch bei der Geburt. Im Gegensatz zum fötalen Stadium sind die Daten von Gehirn- und Körpergröße bei neugeborenen Säugetieren verhältnismäßig leicht zu ermitteln. Nachdem ich einen größeren Datenbestand zusammengetragen hatte, bestätigte die Analyse in der Tat, dass jede Primatenart in Relation zum Gewicht des Neugeborenen etwa zweimal so viel Gehirngewebe wie die anderen Säugetierarten hat. Damit wurde die Sachersche Regel eindrucksvoll bestätigt.

In dieser Beziehung gleichen sich menschliche Neugeborene und die Neugeborenen anderer Primatenarten. Mittels einer Formel, die für nicht-menschliche Primaten ermittelt wurde, kann man anhand des Körpergewichts zuverlässig das durchschnittliche Gewicht des Gehirns eines neugeborenen Menschen bei der Geburt voraussagen. Bei einem Geburtsgewicht von etwa dreieinhalb Kilogramm wiegt das menschliche Gehirn bei der Geburt ungefähr 340 Gramm. Das entspricht ziemlich genau dem, was man im Vergleich zu nicht-menschlichen Primaten erwarten würde. Im Gegensatz dazu beträgt das Gewicht des Gehirns eines neugeborenen Jungtiers aus einer anderen Säugetiergruppe mit einem Geburtsgewicht von dreieinhalb Kilogramm in der Regel lediglich etwa 170 Gramm. Da bei allen Primaten das Gehirn während der ganzen Fötalentwicklung bevorzugt behandelt wird, haben ihre Neugeborenen zu Beginn des Lebens einen Vorsprung. Dieses Merkmal muss wohl bei ihrem gemeinsamen Vorfahren bereits vorhanden gewesen sein. Der erste Impuls für die Vergrößerung des menschlichen Gehirns und ihr Zusammenhang mit der Fortpflanzung haben tiefe Wurzeln in unserer evolutionären Vergangenheit.

UM DAS WACHSTUM DES GEHIRNS NACH DER GEBURT ZU VERSTEHEN, müssen wir seinen Entwicklungsstand beim Neugeborenen berücksichtigen. In Kapitel 4 wurde bereits die grundlegende Unterscheidung zwischen schwach entwickelten (nesthockenden) und gut entwickelten (nestflüchtenden) Jungtieren eingeführt. Nesthockende Säugetiere — beispielsweise Mäuse, Hamster, Igel, Spitzhörnchen, Kaninchen und Katzen —

haben verhältnismäßig kurze Tragzeiten. Wie zu erwarten, sind nesthockende Neugeborene im Verhältnis zur Körpergröße der Mutter relativ klein und sie haben auch kleine Gehirne. Entsprechend muss das Gehirn zu einem größeren Teil nach der Geburt wachsen, in der Regel während der Entwicklung des Jungtiers im Nest.

Als allgemeine Regel gilt, dass das Gehirn bei nesthockenden Säugetieren zwischen der Geburt und dem Erwachsenenalter ungefähr um das Fünffache wächst. Das rasche Gehirnwachstum des Fötus hält etwa bis zu dem Stadium an, an dem die Augen und Ohren geöffnet werden und der Körper vollständig behaart ist. Dieses Entwicklungsstadium entspricht ungefähr dem Geburtszustand bei nestflüchtenden Säugetieren. Nach der Öffnung der Augen und Ohren geht das Tempo, mit dem das Gehirn wächst, bei nesthockenden Säugetieren stark zurück. Dieses geringere Tempo hält dann an, bis das Gehirn die endgültige Größe erreicht hat.

In scharfem Gegensatz dazu sind die Neugeborenen nestflüchtender Säugetieren — beispielsweise Primaten, Huftiere, Walfische und Elefanten — verhältnismäßig groß und haben ziemlich große Gehirne, so dass das Gehirn nach der Geburt weniger wächst. Die allgemeine Regel für nestflüchtende Säugetiere ist, dass die Größe des Gehirns zwischen der Geburt und dem Erwachsenenalter mehr oder weniger verdoppelt wird. Das Gehirn wächst also viel weniger als bei nesthockenden Säugetieren, bei denen es die fünffache Größe entwickelt. Außerdem setzt bei nestflüchtenden Säugetieren, einschließlich der nicht-menschlichen Primaten, der Wechsel vom schnellen zum langsameren Gehirnwachstum normalerweise etwa zum Zeitpunkt der Geburt ein.

In dieser Beziehung aber ist der Mensch unter den Säugetieren einzigartig. Wie bereits erwähnt, entspricht das Verhältnis zwischen Gehirn- und Körpergröße bei einem menschlichen Fötus bzw. Neugeborenen dem allgemeinen Muster der Primaten. Nach der Geburt aber unterscheidet sich das Muster des menschlichen Gehirnwachstums stark von allen anderen Primaten und auch von allen anderen Säugetieren. Verblüffenderweise wächst das Gehirn beim Menschen nach der Geburt um das Vierfache, während es bei den anderen Primaten nur zur Verdoppelung kommt. Diese markante Zunahme der Größe des menschlichen Gehirns nach der Geburt geht mit einer weiteren einzigartigen Eigenschaft einher: Die Wachstumsrate des Gehirns verlangsamt sich nicht um die Zeit der Geburt herum wie bei den

nicht-menschlichen Primaten und bei anderen nestflüchtenden Säugetieren. Und auch einige Wochen nach der Geburt gibt es keine Verlangsamung der Wachstumsrate des Gehirns, wie dies bei nesthockenden Säugetieren der Fall ist. Das verlangsamte Wachstum des Gehirns setzt beim Menschen erst ungefähr ein Jahr nach der Geburt ein.

Anders ausgedrückt, ist die Wachstumsrate des menschlichen Gehirns während des ganzen ersten Lebensjahrs so hoch wie bei einem Fötus. Die Beibehaltung des fötalen Musters des Gehirnwachstums über einen so langen Zeitraum nach der Geburt erklärt, warum ein neugeborener Mensch im Vergleich zu den Neugeborenen anderer Primatenarten besonders hilfsbedürftig ist. Der Zoologe Adolf Portmann bemerkte treffend, dass die Dauer der menschlichen Schwangerschaft eigentlich mit 21 Monaten angegeben werden sollte: neun Monate in der Gebärmutter plus zwölf weitere Monate außerhalb. Der Anthropologe Ashley Montagu drückte es etwas anders aus, indem er bemerkte, dass beim Menschen auf die neunmonatige Phase der normalen Schwangerschaft in der Gebärmutter (»Uterogestation«) weitere neun Monate fötusähnlicher Entwicklung in der Außenwelt (»Exterogestation«) folgen.

Es ist klar ersichtlich, dass das Gehirn und verwandte anatomische Strukturen beim menschlichen Neugeborenen im Vergleich zu nicht-menschlichen Primaten und anderen nestflüchtenden Säugetieren generell unfertig sind. Diese Tatsache hat mehrere Auswirkungen im medizinischen Bereich. Eine davon ist ein verstärktes Auftreten von Erkrankungen im Hals-Nasen-Ohren-Bereich. Viele dieser Erkrankungen bessern sich während des ersten Lebensjahrs oder verschwinden völlig. Ein Paradebeispiel ist die Mittelohrentzündung (*Otitis media*) bei Babys, die in schwerwiegenden Fällen zum Verlust des Gehörs führen kann. Mittelohrentzündungen kommen bei Kindern häufig vor, weil die eustachische Röhre, die den Luftstrom zwischen dem hinteren Rachen und der Paukenhöhle ermöglicht, bei der Geburt noch relativ unfertig ist.

DAS SCHNELLE WACHSTUM DES GEHIRNS während des ersten Lebensjahrs ist mit einem außergewöhnlichen Merkmal des menschlichen Neugeborenen verbunden: sein auffällig rundliches Äußeres. Bei einem durchschnittlichen Neugeborenen mit einem Gewicht von rund dreieinhalb

Kilogramm gehen etwa 14 Prozent auf das Konto von Fettgewebe. Unsere Babys zählen zu den rundlichsten unter den Säugetieren überhaupt. Menschliche Babys sehen bei der Geburt ganz anders aus als die dünnen Neugeborenen anderer Primatenarten, wie Schimpansen oder Rhesusaffen. Der Anteil des Fettgewebes bei einem neugeborenen Menschen entspricht etwa dem von Säugetieren, die unter arktischen Bedingungen leben, und ist sogar höher als bei Seehundbabys. Der Anthropologe Christopher Kuzawa wies nach, dass menschliche Neugeborene einen ungefähr viermal so hohen Fettanteil haben, als man bei neugeborenen Säugetieren derselben Körpergröße im Durchschnitt erwarten könnte. In der Tat nimmt der Anteil des Fettgewebes bei einem menschlichen Baby während der ersten neun Monate nach der Geburt weiter zu, bis er etwa ein Viertel des Körpergewichts erreicht hat. Während dieser Periode werden etwa 70 Prozent der Energie, die für das Wachstum investiert wird, für Fettablagerung verwendet. Kurz gesagt, verlieren gesunde Säuglinge ihren Babyspeck keineswegs direkt nach der Geburt, sondern erhalten diesen bis zu drei Jahre lang. Vor allem durch das Stillen trägt die Mutter noch lange nach der Geburt zum Aufbau der Fettreserven ihres Babys bei.

Als Standarderklärung, warum unsere Babys so rundlich sind, nahm man an, dass die natürliche Selektion eine Zunahme des Fettgewebes begünstigte, um den Verlust der isolierenden Körperbehaarung zu kompensieren. Es ist bekannt, dass die optimale Temperatur für ein menschliches Baby in einem Inkubator ungefähr 32° Celsius beträgt, womit die Gefahr der Abkühlung bestehen könnte. Der Babyspeck ist eindeutig verteilt und wird hauptsächlich unter der Haut abgelagert. Im Gegensatz zu den Fettablagerungen bei Erwachsenen befindet sich in der Bauchhöhle relativ wenig Fett. Der Anthropologe Bogusław Pawłowski unterstützte diese Ansicht und argumentierte, dass sich beim frühen Vertreter der Gattung *Homo* verschiedene Merkmale des menschlichen Neugeborenen entwickelten, mit denen übermäßiger Abkühlung während der kalten Nächte in offener Savanne entgegengewirkt wurde. Zu diesen Merkmalen zählen eine überdurchschnittliche Körpergröße und ein größerer Anteil von Unterhautfettgewebe. Ein schlafendes Menschenbaby ist auch darin außergewöhnlich, dass es seine Körpertemperatur aktiv regulieren kann.

Kuzawas Untersuchungen lieferten jedoch kaum Belege für die Rolle des Unterhautfettgewebes, die Pawłowski angenommen hatte. Kuzawa gab eine

wahrscheinlichere Erklärung für unsere außerordentlich rundlichen Babys an, die in eine andere Richtung geht: Laut ihm geht es um die Erhöhung der Fettreserven als Energiepuffer. Während der Phase des raschen Gehirnwachstums im ersten Lebensjahr sind diese Reserven besonders vorteilhaft, weil der heranwachsende Säugling jede Störung der Zufuhr von Nährstoffen kompensieren kann. Einen Schritt weiter gingen die Ernährungsforscher Stephen Cunnane und Michael Crawford 2003, indem sie argumentierten, dass rundliche Babys den Schlüssel zur Entstehung des großen menschlichen Gehirns bieten, und das nicht nur wegen der Energiezufuhr. Etwa die Hälfte des Gehirns besteht aus Fett, und die Fettreserven eines Babys enthalten besondere Fettsorten — langkettige mehrfach ungesättigte Fettsäuren (LMUFs) — die für die normale Entwicklung des Gehirns unentbehrlich sind. Berechnungen weisen darauf hin, dass die bei der Geburt im Baby-speck enthaltenen LMUFs vermutlich drei Monate für das Gehirnwachstum ausreichen. Cunnane diskutiert dieses Thema ausführlich in seinem 2005 erschienenen Buch *Survival of the Fattest*, in dem das normale menschliche Baby als »zweifelloso fettleibig« bezeichnet wird. Beim menschlichen Fötus kommt es nur im letzten Drittel der Schwangerschaft zu Fettablagerungen, dagegen ist während der ersten sechs Monate praktisch kein Fett vorhanden. Infolgedessen sind die Fettpolster bei Frühgeburten weit unter dem Normalwert. Ein Baby, das fünf Wochen zu früh geboren wird, hat nur halb so viel Fett wie normal, und ein Baby, das zehn Wochen zu früh geboren wird, sogar weniger als ein Sechstel. Bei derartigen Frühgeburten stechen die Rippen und die Brustmuskeln hervor, weil sich unter der Haut so wenig Fettgewebe befindet. Bei unzureichenden Fettpolstern haben zu früh geborene Babys keinen ausreichenden Puffer für das rasche Wachstum des Gehirns, das nach der Geburt erfolgen soll. Bei ausreichender Ernährung kann das Gehirn zwar dennoch normal wachsen, es ist aber äußerst wichtig, die besonderen Bedürfnisse von Frühgeburten zu erkennen. Cunnane bezeichnet das gespeicherte Fett beim menschlichen Neugeborenen treffend als »Versicherung«.

VON DER GEHIRNENTWICKLUNG ABGESEHEN ähneln neugeborene Menschenbabys, wie bereits erläutert, in fast jeder Hinsicht den Jungen anderer nestflüchtender Säugetiere. Unsere Babys sind nur in einem speziellen

Sinne »nesthockend«: Verglichen mit seiner endgültigen Größe ist das Gehirn bei der Geburt deutlich unterentwickelt, und es wächst während des ersten Lebensjahrs schnell weiter. Portmanns Bezeichnung des menschlichen Neugeborenen als »sekundären Nesthocker« ist durchaus zutreffend. Das Missverhältnis zwischen der Entwicklung des Gehirns und dem restlichen Zustand bei der Geburt zeichnet unsere Babys aus. Eine Begleiterscheinung, die damit zusammenhängt, ist die Tatsache, dass die Schädelknochen bei der Geburt nicht vollständig entwickelt sind. Deshalb gibt es auf dem Kopf und auf beiden Seiten des Schädels Stellen — die sogenannten Fontanellen — an denen die Schädeldecke vorübergehend noch nicht geschlossen ist. Bei Menschenbabys werden diese Stellen, die bei den Affen bereits vor der Geburt verbunden werden und bei neugeborenen Menschenaffen weitgehend verschwunden sind, erst anderthalb bis zwei Jahre nach der Geburt geschlossen.

Die Fortführung der fötalen Struktur mit raschem Gehirnwachstum während des ersten Lebensjahrs zieht einige wichtige Auswirkungen nach sich. Zunächst erfolgt der Wechsel von einem schnellen zu einem langsameren Gehirnwachstum bei einem Menschenbaby nicht etwa gleichzeitig mit der Öffnung der Augen und Ohren, wie dies sonst bei Säugetieren typisch ist. Eine Besonderheit von Menschenbabys ist, dass ihre Augen und Ohren ein ganzes Jahr offen sind, während das Gehirn mit fötaler Geschwindigkeit weiterwächst. Diese außerordentliche Eigenschaft ermöglicht einem Menschenbaby, mit einem recht unfertigen Gehirn mit der Umwelt zu interagieren. Wie alle Eltern wissen, lernen Babys während des ersten Lebensjahrs eine ganze Menge und sind schon zu differenziertem sozialen Austausch fähig. Diese Eigenschaft war für das allmähliche Entstehen erhöhter Anpassungsfähigkeit und Verhaltensflexibilität während der Evolution des Menschen äußerst wichtig.

In diesem Zusammenhang ist es kein Zufall, dass die artspezifische Bewegungsform des Menschen — der aufrechte Gang — erst etwa ein Jahr nach der Geburt richtig entwickelt wird. Mehrere Monate lang bewegt sich ein Menschenbaby auf eigentümliche Weise, indem es auf Händen und Knien herumkrabbelt oder auf dem Hintern herumrutscht. Das ist ein weiteres kennzeichnendes Merkmal des Menschen, da die anderen Primaten sich direkt nach der Geburt auf ihre artspezifische Weise bewegen. Bemerkenswert ist auch, dass der aktive Gebrauch der Sprache erst mit dem zweiten

Lebensjahr einsetzt, obwohl sich der Säugling während des ersten Lebensjahrs eifrig viele Regeln der Verständigung aneignet. Zusammengefasst kann man sagen, dass menschliche Babys aktiv mit ihrer Umgebung interagieren können, obwohl ihr Gehirn nach der Geburt noch ein ganzes Jahr ein fötales Wachstumsmuster beibehält.

Diese Eigenart führt uns aber zu einer wichtigen Frage: Warum entwickelte sich dieses spezielle Muster der Gehirnentwicklung im Verlauf der Evolution des Menschen? Die Antwort ist ganz einfach. Nach neun Monaten der Entwicklung in der Gebärmutter erreicht die Gehirngröße des menschlichen Fötus die oberste Grenze, um noch sicher durch den Geburtskanal im Becken transportiert werden zu können. Gäbe es wegen des Geburtskanals keine Größenbeschränkung, würde die Schwangerschaft womöglich etwa einundzwanzig Monate dauern, um mit einer Verlängerung des normalen Geburtstermins um ungefähr ein Jahr die volle Entwicklung des Gehirns in der Gebärmutter zu ermöglichen.

Die Entwicklung des Gehirngewebes ist erheblich effizienter, wenn die notwendige Versorgung direkt durch die Plazenta erfolgt. Nach der Geburt muss die Mutter ihre Nährstoffe zuerst in Milch umwandeln, um sie anschließend dem Säugling zur Verdauung weiterzugeben. In gewissem Maße erklären diese Umstände, warum sich der Mensch bis zu der Grenze, die ihm durch die Ausmaße des Geburtskanals gesetzt sind, in der Gebärmutter entwickelt. Die Kopfmaße des Neugeborenen spiegeln dies wider. Eine allgemeine biologische Regel besagt, dass die Varianz der Maße einer Spezies einer typischen Glockenkurve (Normalverteilung) entspricht. Der Maximalwert der Glockenkurve entspricht dem Durchschnitt, und die Häufigkeit der kleineren und größeren Werte nimmt spiegelbildlich auf jeder Seite kontinuierlich ab. Der Kopfumfang bei menschlichen Neugeborenen jedoch stellt eine auffallende Ausnahme von dieser typischen Verteilung dar. Die Kopfmaße, die unter dem Durchschnitt liegen, nehmen wie erwartet ab. Oberhalb des Durchschnitts gibt es aber bei den größten Kopfmaßen einen abrupten Rückgang. Diese Reduktion am oberen Ende der Varianz ist ein sicheres Anzeichen für die Filterwirkung der natürlichen Selektion, die Kopfmaße beseitigt, die zu groß für eine sichere Geburt sind.

Vergleiche mit den großen Menschenaffen, unseren nächsten Verwandten in der Tierwelt, verstärken diese Schlussfolgerung. Alle haben kürzere Tragzeiten: die Orang-Utans 35 Wochen, die Gorillas 37 Wochen und die

Schimpansen sogar nur 33 Wochen. Weibliche Schimpansen und Orang-Utans sind zwar im Allgemeinen kleiner als Menschen, aber weibliche Gorillas sind etwas größer. Unsere tatsächliche Schwangerschaftsdauer von 38 Wochen ist also zwischen einer und fünf Wochen länger als die der großen Menschenaffen, und dieser Unterschied kann nicht durch die unterschiedlichen Körpergrößen erklärt werden. Und ganz bestimmt auch nicht der dramatische Unterschied beim Geburtsgewicht: Im Durchschnitt wiegen neugeborene Orang-Utans und Schimpansen etwas weniger als zwei Kilogramm und Gorillababys knapp über zwei Kilogramm, alle liegen damit deutlich unter dem Durchschnittswert von rund dreieinhalb Kilogramm bei neugeborenen Menschen. Oder anders ausgedrückt: Bei Affen und Menschenaffen beträgt das Körpergewicht eines Neugeborenen ungefähr drei Prozent des Körpergewichts der Mutter, während die Quote beim Menschen bei fast sechs Prozent liegt.

Bei der Geburt wiegt ein Menschenbaby also fast zweimal so viel wie ein Neugeborenes bei den großen Menschenaffen. Denken Sie an die Sacherse Regel: Bei den Primaten gibt es bei der Geburt ein einheitliches Verhältnis zwischen Hirn- und Körpergröße. Da ein neugeborenes Menschenbaby etwa doppelt so groß wie ein neugeborener Menschenaffe ist, ist sein Gehirn bei der Geburt dementsprechend auch etwa doppelt so groß. Aus diesem Unterschied kann man zwei wichtige Schlussfolgerungen ableiten: Erstens müssen Menschen zwangsläufig beträchtlich mehr in die Fötalentwicklung investieren als alle großen Menschenaffen, um ihre größeren Säuglinge mit größeren Gehirnen zur Welt zu bringen. Und zweitens zeigt er deutlich, dass der Mensch im Hinblick auf die Größe des Gehirns und des Körpers bei der Geburt tatsächlich bis an seine Grenzen geht. Dies erklärt auch, warum der menschliche Geburtsvorgang so langwierig und gefährlich ist.

Die außergewöhnliche Herausforderung, die eine Geburt darstellt, hat auch zu deutlichen Unterschieden in der Form des Beckens bei Männern und Frauen geführt. Bei Affen und Menschenaffen gibt es in der Beckenform keine offensichtlichen Unterschiede zwischen Männchen und Weibchen. Im Gegensatz dazu sind die Becken von Mann und Frau beim Menschen markant verschieden. Das Becken ist bei beiden Geschlechtern etwa gleich breit, bei Frauen aber im Verhältnis größer, da sie ansonsten im Durchschnitt kleiner sind. Denken Sie an die Körperform. Bei Frauen sind die Hüften gewöhnlich breiter als die Schultern, während bei Männern das

Gegenteil zutrifft. Auf der Innenseite des Beckens ist das untere Ende der Wirbelsäule bei Frauen nach hinten verlagert, damit es nicht in den abgerundeten Geburtskanal hineinragt. Bei Männern ist eine solche Verlagerung der Wirbelsäule gar nicht nötig, und die Beckenöffnung ist herzförmig. Außerdem ist die vordere Verbindung zwischen der linken und der rechten Hälfte des Beckens im Schambereich bei Frauen kürzer als bei Männern, und der Winkel darunter breiter. Da es zahlreiche weitere Unterschiede gibt, kann man relativ leicht bestimmen, ob ein menschliches Becken weiblich oder männlich ist. Anthropologen, die menschliche Skelette aus archäologischen Fundstellen oder von Tatorten untersuchen — Skelettermittler sozusagen — prüfen zuerst das Becken, um das Geschlecht zu bestimmen. Die geschlechtlichen Unterschiede beim Becken haben auch einen unterschiedlichen Gang zur Folge. Wenn Frauen gehen, schwingen ihre Hüften, weil das Becken stärker nach vorne geneigt ist und sich dadurch schräger nach oben und unten bewegt. Auch die Bewegungen der Hüft- und Kniegelenke unterscheiden sich leicht.

Die Annahme, dass die Beckenmaße die Kopfgröße des menschlichen Neugeborenen begrenzen, ist völlig logisch und kann auch mit einem indirekten Test unabhängig überprüft werden. Man braucht dafür nur ein Säugetier, dessen Junges ähnlich groß ist und ein ähnlich großes Gehirn hat wie ein menschliches Baby, dessen Geburtskanal aber nicht durch ein knöchernes Becken eingeschränkt wird. Dank der Wunder der biologischen Vielfalt existieren solche Säugetiere durchaus. Die Vorfahren der Wältiere kehrten sekundär zu einem Leben im Wasser zurück. Infolge dieser Neuanpassung wurde der gesamte Beckengürtel überflüssig, und bei den heutigen Nachkommen sind nur noch einige Knochenreste übrig. Und einige Delphinarten sind hinsichtlich des Körpergewichts, der Tragzeit und der Gehirngröße dem Menschen ziemlich ähnlich. Ein Delphin ohne Becken kann ein besonders großes Jungtier auf die Welt bringen, dessen Gehirn doppelt so groß ist wie das 340 Gramm schwere Gehirn eines menschlichen Neugeborenen. Die Größe des Gehirns wird bei den Delphinen zwischen der Geburt und dem Erwachsenenalter aber nur verdoppelt und nicht vervierfacht wie beim Menschen. Beckenlose Delphine, die im Wasser leben, haben es gar nicht nötig, die fötale Entwicklung des Gehirns nach der Geburt fortzusetzen.

Weil der Kopf eines menschlichen Neugeborenen im Vergleich zum Geburtskanal bereits so groß ist, ist der Transport durch das Becken voller

Schwierigkeiten. In gewissem Maße wird die Geburt durch die spezifische Wirkung des Hormons Relaxin erleichtert. Die Produktion von Relaxin — ein insulinähnliches Hormon, das von den Eierstöcken, der Plazenta und der Brust produziert wird — erreicht gegen Ende der Schwangerschaft ihren Höhepunkt. Unter anderem macht dieses Hormon das Gelenkband weich, das die linke und rechte Hälfte des Beckens im Schambereich verbindet. Es entspannt auch die Beckenmuskulatur, damit der Geburtskanal etwas flexibler wird. Die Fontanellen, die zwischen den Hauptknochen des Schädels sitzen und eine gewisse Flexibilität der Kopfform des Neugeborenen ermöglichen, erleichtern die Geburt ebenfalls. Dennoch ist der Weg eines Babys durch den Beckenkanal während der Geburt extrem eng. Bei einer von fünf Geburten kommt es zu Problemen.

Von jeher wurden die Schwierigkeiten beim menschlichen Geburtsvorgang besonders betont. Die Bibel beispielsweise legte Eva und jeder Frau, die seither gelebt hat, folgende göttliche Strafe für die Ursünde auf (Genesis 3:16): »Ich will dir viel Schmerzen schaffen, wenn du schwanger wirst; unter Mühen sollst du Kinder gebären.« Dieser biblische Zusammenhang zwischen dem Verzehr der verbotenen Frucht vom Baum der Erkenntnis und schmerzhaften Geburten ist in Anbetracht der eindeutigen Verknüpfung des großen menschlichen Gehirns mit den Anstrengungen, die eine Geburt mit sich bringt, definitiv verblüffend.

UM DURCH DEN BECKENKANAL ZU GELANGEN, vollführt ein Säugling bei der Geburt komplexe Drehungen, die für Primaten äußerst ungewöhnlich sind. Dieser verschlungene Weg ist nicht nur dem relativ großen Kopf und den breiten Schultern des Neugeborenen zuzuschreiben. Er beruht auch auf Veränderungen in der Form und Ausrichtung des menschlichen Beckens für den aufrechten Gang. Während der Evolution des Menschen führte das Zusammenspiel dieser zwei Faktoren zu einem wahren Hindernislauf, den ein menschliches Baby während der Geburt absolvieren muss.

Die Probleme, die ein relativ großer Kopf bei einem Neugeborenen verursacht, sind nicht nur auf den Menschen beschränkt. Wie der Anatom Adolph Schultz als Erster feststellte, kann die Kopfgröße des Neugeborenen auch bei einigen nicht-menschlichen Primaten zu Schwierigkeiten bei der Geburt führen. Die Körpergröße ist einmal mehr der Schlüsselfaktor, den man be-

rücksichtigen muss. Wie zu erwarten, nimmt bei verschiedenen Primatenarten die durchschnittliche Größe des Neugeborenen mit der durchschnittlichen Körpergröße der Mutter zu. Wie bei vielen anderen Merkmalen ist das Verhältnis zur Körpergröße nicht einfach proportional. Artenübergreifend nimmt die Größe des Neugeborenen im Verhältnis zur Körpergröße der Mutter langsamer zu. Oder anders gesagt, entspricht die Größe des Neugeborenen einem immer kleineren Anteil des Gesamtgewichts der Mutter. Verglichen mit der Körpergröße der Mutter haben kleine Affen relativ große Babys, mittelgroße Affen und Gibbons mittelgroße Babys und große Menschenaffen relativ kleine Babys. Beispielsweise haben Totenkopffaffen — kleinwüchsige Neuweltaffen mit großen Gehirnen — relativ große Neugeborene, die gerade so durch den Geburtskanal passen. Im Gegensatz zum Menschen ist das Becken der Affen aber nicht radikal für den aufrechten Gang umgeformt. Deshalb verläuft die Geburt trotz der Enge verhältnismäßig unkompliziert.

Beim Menschen erfolgt die Geburt eines Babys mit einem großen Kopf durch ein Becken, das für den aufrechten Gang neu eingerichtet wurde. Außerdem ist der Geburtskanal gewunden, weil der Eingang ins Becken der Mutter seitlich am größten ist, während der Ausgang von hinten nach vorne am größten ist. Infolgedessen muss der Neugeborene sich zweimal drehen, um sicher durch das Becken zu gelangen. In einer Veröffentlichung aus dem Jahr 1992 beschrieb die Anthropologin Karen Rosenberg die Sondermerkmale der menschlichen Geburt. Sie zeigte, dass der Kopf eines Menschenbabys beim Eintritt in den Beckenkanal bereits gedreht ist, damit die Längsachse seitlich ausgerichtet ist und nicht von hinten nach vorne, wie es für nicht-menschliche Primaten typisch ist. Während des Transports durch das Becken wird der Kopf des Babys anschließend noch weiter gedreht, damit er zur Ausrichtung der Längsachse des Beckenausgangs passt. Das Gesicht des Babys ist bei seinem Austritt gewöhnlich zum Rücken der Mutter gerichtet. Bei anderen Primaten ist das Gesicht des Neugeborenen beim Transport durch das Becken normalerweise nach vorne gerichtet, und der Kopf wird überhaupt nicht gedreht.

Der große Kopf des Neugeborenen ist nicht der einzige Grund, warum die Geburt beim Menschen problematisch ist. Auch die Schultern des Babys sind im Verhältnis zum Geburtskanal ziemlich breit, daher ist eine zusätzliche Justierung für den Transport nötig. Aus diesem Grund ist der Kopf zur

Seite gedreht, während die Schultern durch den Geburtskanal gelangen. Die Schultern sind zudem ziemlich zusammengepresst, da während der Geburt die zusätzliche Gefahr besteht, dass das Baby steckenbleibt. Dies kommt in maximal einem von hundert Fällen vor.

Möglicherweise ist es aber etwas übertrieben, den Vorgang der menschlichen Geburt als einzigartig zu bezeichnen. 2011 stellten der Primatologe Satoshi Hirata und seine Kollegen mittels Nahaufnahmen, die von einer in Gefangenschaft lebenden Schimpansenkolonie gemacht wurden, fest, dass bei allen drei beobachteten Geburten der Kopf des Neugeborenen nach hinten gerichtet war. Erst nach dem Austritt des Kopfes wurden der Kopf und der Körper des Neugeborenen nach vorne gedreht. Hirata und seine Mitautoren merkten an, dass der tatsächliche Geburtsvorgang bei nicht-menschlichen Primaten wenig studiert worden sei und eine solche Drehung innerhalb des Geburtskanals deshalb auch bei anderen Arten vorkommen könne. Allerdings wäre es sicher aufgefallen, wenn es bei den üblichen Laborprimaten wie Rhesusaffen, Totenkopffäffchen und Weißbüscheläffchen häufig vorkäme, dass der Kopf des Neugeborenen bei der Geburt nach hinten gedreht ist. Außerdem ist die Einzigartigkeit der menschlichen Geburt nicht nur auf die Drehung beschränkt, sondern hat auch mit der Kopfgröße und den Anpassungen für den aufrechten Gang zu tun. Aus diesen beiden Gründen ist eine zweifache Drehung schlicht obligatorisch.

Dank dieser Kombination von Sondermerkmalen ist die menschliche Geburt ein schwieriger und langwieriger Vorgang. Es überrascht somit kaum, wenn medizinische Fachkräfte davon sprechen, dass eine gebärende Frau »in den Wehen liegt«. In einer multikulturellen Studie der Gynäkologin Leah Albers aus dem Jahr 1999 wurde die Dauer des Geburtsvorgangs bei mehr als 2.500 normalen Entbindungen analysiert. In allen Fällen handelte es sich um Mütter, bei denen das Risiko eines medizinischen Eingriffs gering war und die ihr Kind mithilfe einer Hebamme in einem Krankenhaus zur Welt brachten. Erstgeburten dauerten im Durchschnitt fast neun Stunden, während Mütter, die schon ein oder mehrere Kinder hatten, sechs Stunden brauchten. In Extremfällen dauerte die Geburt sogar zwanzig Stunden.

Im Gegensatz dazu verläuft die Geburt bei nicht-menschlichen Primaten relativ schnell und unkompliziert. Die Anthropologin Wenda Trevathan gab in ihrem 1987 erschienenen Buch *Human Birth: An Evolutionary Perspective* einen guten Überblick über die Geburtsdauer bei Primaten. Sie stellte fest,

dass Geburten bei den großen Menschenaffen recht unkompliziert verlaufen, wie dies angesichts der im Verhältnis zur Breite des mütterlichen Beckens relativ kleinen Neugeborenen auch zu erwarten war. Bei Orang-Utans, Schimpansen und Gorillas dauert die Geburt im Allgemeinen nur ein paar Stunden. Die überraschenderweise nach hinten ausgerichteten Neugeborenen der Schimpansen, von denen Hirata und seine Kollegen berichteten, brauchten im Gegensatz zum Menschen nicht sehr lange, bis sie auf der Welt waren. Stattdessen sind sie vermutlich das Ergebnis des großen Spielraums, den der Geburtskanal bietet. Wie bei den großen Menschenaffen dauert die Geburt auch bei den Affen nur ein paar Stunden. Bei kleinen Müttern kann die Geburt aber durchaus kompliziert sein, weil der Geburtskanal für das Neugeborene verhältnismäßig eng ist. Von einigen kleinen Affen mit großen Gehirnen — besonders Totenkopffaffen — sind relativ schwierige Geburten bekannt, die allerdings meist auch nur ein paar Stunden dauern. Auf alle Fälle sind Menschen die einzigen Primaten, die mit einem so großen Körper solch langwierige und schwierige Geburten haben.

Wenda Trevathan und Karen Rosenberg hielten auch fest, dass aufgrund der komplizierten Geburt und der damit verbundenen Risiken eine bestimmte Form der Geburtshilfe beim Menschen fast unerlässlich ist. Die Geburt eines Babys, das nach hinten gerichtet ist und Gefahr läuft stecken-zubleiben, ist eine große Herausforderung. Neben allgemeiner Hilfe während der Geburt kann eine Hebamme auch bei eventuell auftauchenden Problemen eingreifen. Bei etwa einem Drittel menschlicher Geburten wickelt sich die Nabelschnur wegen der komplexen Drehungen um den Hals des Babys. In den meisten Fällen ist dies nicht lebensbedrohlich, aber gelegentlich schnürt die Nabelschnur den Hals des Babys ab. Wird nicht schnell eingegriffen, kann das Baby erdrosselt werden. Durch Aufmerksamkeit und rasches Eingreifen kann eine Hebamme verhindern, dass die Nabelschnur während der Geburt zu einer ernsthaften Bedrohung wird.

MIT DER ALLMÄHLICHEN VERGRÖßERUNG DES GEHIRNS während der Evolution des Menschen wurde auch der Geburtsvorgang immer komplizierter. Während der letzten vier Millionen Jahre verdreifachte sich die Größe des Gehirns ungefähr, das Gewicht stieg von einem knappen halben Kilogramm beim *Australopithecus* auf fast anderthalb Kilogramm beim

modernen Menschen an. Da die Schwangerschaft bei den heutigen großen Menschenaffen und Menschen mehr oder weniger gleich lange dauert, können wir davon ausgehen, dass ihr gemeinsamer Vorfahr ebenfalls eine verhältnismäßig lange Schwangerschaft hatte, die vermutlich etwa acht Monate dauerte. Im Verlauf der Zunahme der Gehirngröße in der Hominiden-Linie stieg sicher auch die Dauer der Schwangerschaft an, bis sie die heute normalen neun Monate erreichte.

Im Frühstadium der Entwicklung der Hominiden wurde der Geburtsvorgang wie bei den heutigen großen Menschenaffen wahrscheinlich kaum durch die Ausmaße des Beckenkanals eingeschränkt. Mit dem Wechsel zum aufrechten Gang während der Evolution des Menschen veränderte sich sowohl die Größe als auch die Form des Beckenkanals. Mit zunehmender Größe des Gehirns schränkte das Becken die Kopfgröße des Neugeborenen immer mehr ein. Irgendwann musste schließlich ein Teil des fötalen Gehirnwachstums auf die Zeit nach der Geburt verschoben werden. Nur so war es möglich, die wachsende Kluft zwischen der maximalen Gehirngröße des Neugeborenen, die die Ausmaße des Beckens zuließen, und der endgültigen Größe des Gehirns beim Erwachsenen zu schließen.

Der erste gut dokumentierte Hominide, der *Australopithecus*, lebte vor etwa zwei bis vier Millionen Jahren. Mit einem durchschnittlichen Gewicht von nicht einmal einem halben Kilogramm war sein ausgewachsenes Gehirn noch relativ klein. Bei den heutigen nicht-menschlichen Primaten ist das Gehirn bei der Geburt normalerweise etwa halb so groß wie bei einem erwachsenen Menschen, und wenn dieses Verhältnis auch für den *Australopithecus* galt, wog das Gehirn eines Neugeborenen etwa 250 Gramm. Es ist unwahrscheinlich, dass diese Größe ein größeres Problem darstellte. Verschiedene Untersuchungen lieferten jedoch Hinweise, dass der Geburtsvorgang beim *Australopithecus* schon durch das Becken eingeschränkt gewesen sein musste, da die Anpassungen für den aufrechten Gang bereits im Gange waren. Vor allem war das Becken im Gegensatz zum hohen und engen Becken der großen Menschenaffen relativ breit und tiefsitzend. Die Umgestaltung des Beckens beim *Australopithecus* veränderte die Form des knöchernen Geburtskanals, der sich seitlich erweiterte und von hinten nach vorne verengte. Möglicherweise hinderte diese Veränderung den Kopf des Neugeborenen daran, im Stile der nicht-menschlichen Primaten direkt durch den Geburtskanal zu passen. Stattdessen war vermutlich generell eine Drehung

des Kopfes des Neugeborenen notwendig, um die Längsachse wie bei der ersten Drehung bei der menschlichen Geburt auf die maximale Größe des Eingangs in den Beckenkanal anzupassen. Einige Autoren vermuteten sogar, dass die Geburt beim *Australopithecus* genauso kompliziert wie beim modernen Menschen verlief, allerdings ist dies eher unwahrscheinlich. Eine weitere Drehung des Kopfes des Neugeborenen während der Geburt war wohl nicht notwendig.

Leider gibt es keine Fossilien, die die Gehirn- und Körpergröße von neugeborenen *Australopithecus* dokumentieren. Stattdessen wurden aufgrund von Vergleichen mit lebenden Arten verschiedene Schätzungen vorgenommen. Zur groben Schätzung der Größe des Gehirns bei der Geburt könnte man beispielsweise ein Schaubild verwenden, bei der die Gehirngröße von neugeborenen Affen und Menschenaffen mit der Körpergröße der Mutter verglichen wird. Mit dem gleichen Ansatz könnte man auch die Körpergröße der Neugeborenen schätzen. Dabei entstehen aber unerwünschte Probleme. Wie erwähnt, sind menschliche Babys im Vergleich zu Affen und Menschenaffen deutlich größer und haben auch bedeutend größere Gehirne. Berechnungen anhand eines solchen Schaubilds würden dazu führen, dass das Gehirn und der Körper menschlicher Neugeborenen zu klein eingeschätzt würden. Dies würde keine Rolle spielen, wenn sich der *Australopithecus* nicht von den heutigen Affen und Menschenaffen unterscheiden würde. Hat beim *Australopithecus* aber bereits die Entwicklung des modernen menschlichen Zustands begonnen, schätzt man die Größe von Gehirn und Körper der Neugeborenen in ähnlicher Weise zu niedrig ein. Der springende Punkt bei den Berechnungen ist, ob der *Australopithecus* eher dem Affen oder dem Menschen ähnlich war, womit wir uns in einem Teufelskreis befinden.

In dem Bestreben, aus diesem Teufelskreis auszubrechen, machte der Anthropologe Jeremy DeSilva einen einfallsreichen Vorschlag. Obwohl Gehirn und Körper der Neugeborenen beim Menschen im Vergleich zu Affen und Menschenaffen größer sind, als man dies erwarten würde, ist das Verhältnis zwischen der Größe des Gehirns von Erwachsenen und Neugeborenen artenübergreifend einheitlicher. Dementsprechend können wir beim *Australopithecus* die Größe des Gehirns von Neugeborenen anhand der Größe bei Erwachsenen abschätzen, die durch Fossilien gut dokumentiert ist. Gemäß der Sacherschen Regel gibt es bei Neugeborenen eine einheitliche Beziehung zwischen Gehirngröße und Körpergröße, und deshalb kön-

nen wir anhand einer Schätzung der Gehirngröße von Neugeborenen auch eine Berechnung der Körpergröße durchführen. Ausgehend von diesem Ansatz kam DeSilva zu dem Schluss, dass der *Australopithecus* Babys mit größeren Gehirnen und größeren Körpern zur Welt brachte als ein heutiger Menschenaffe mit vergleichbarer Körpergröße. Dies wiederum deutet darauf hin, dass die Schwierigkeiten bei der Geburt möglicherweise wirklich bereits beim *Australopithecus* angingen.

Obwohl der Ansatz von DeSilva das Problem teilweise löst, entkommt er nicht vollständig dem Teufelskreis. Zwischen der Geburt und dem Erwachsenenalter wird die Größe des menschlichen Gehirns fast vervierfacht, während sie bei nicht-menschlichen Primaten lediglich verdoppelt wird. Wenn man ein Schaubild für Affen und Menschenaffen verwendet, um beim Menschen anhand der Größe des Gehirns von Erwachsenen die Größe bei Neugeborenen zu berechnen, liegt man daher zu hoch. Dennoch bleibt die Tatsache bestehen, dass ein ausgewachsener *Australopithecus* etwas kleiner als der Schimpanse war. Auch die Schätzungen des Gehirn- und Körpergewichts von Neugeborenen unterscheiden sich von denen des Schimpansen.

Zwar gibt es keine Fossilien von Neugeborenen, anhand derer man die Gehirngröße direkt erkennen kann, doch entdeckte man einigermaßen vollständige Schädel von zwei dreijährigen *Australopithecus afarensis* in Äthiopien und einem vierjährigen *Australopithecus africanus* in Südafrika. Die Gehirngrößen dieser drei noch nicht ausgewachsenen Australopithecinen entsprachen etwa denen gleichaltriger Schimpansen. Erwachsene Schimpansen haben aber mit einem Durchschnitt von 370 Gramm kleinere Gehirne als ein ausgewachsener *Australopithecus*, bei dem der Durchschnitt etwa 450 Gramm betrug. Dies bedeutet, dass das Gehirn bei dreijährigen und vierjährigen *Australopithecus* proportional noch nicht so weit entwickelt war wie bei gleichaltrigen Schimpansen. Somit gibt es einen indirekten Hinweis, dass das Gehirn beim *Australopithecus* nach der Geburt noch stärker wuchs als beim Schimpansen, womit wir ein erstes Anzeichen für die Anfänge der Einschränkung durch das Becken haben.

DIE ERSTEN FOSSILFUNDE FORTGESCHRITTENER HOMINIDEN der Gattung *Homo* sind etwa zwei Millionen Jahre alt. Bei den nächsten *Homo*-Arten nahm die Gehirngröße ständig zu, weshalb sicher auch der Ge-

burtsvorgang zu einer immer größeren Herausforderung wurde. Beim *Homo habilis* beispielsweise war das Gehirn mit 600 Gramm bereits um ein Drittel größer als die 450 Gramm des *Australopithecus*. Wenn der *Homo habilis* dem typischen Muster nicht-menschlicher Primaten entsprach, wog das Gehirn eines Neugeborenen etwa 300 Gramm. Dieses Gewicht liegt nur 15 Prozent unter den 350 Gramm beim modernen Menschen. Da der Körper des *Homo habilis*, wie der des *Australopithecus*, relativ klein war, stieß der größere Kopf des Neugeborenen wahrscheinlich auf mehr Probleme im Geburtskanal. Leider ist das Skelett des *Homo habilis* kaum durch Fossilien dokumentiert, und wir müssen auf weitere Entdeckungen warten, ehe wir das Ausmaß der Schwierigkeiten bei der Geburt einschätzen können.

Der *Homo erectus* lebte wie der *Homo habilis* vor etwa zwei Millionen Jahren, in puncto Körpergröße war er dem heutigen Menschen aber ähnlicher. Mit einem durchschnittlichen Gewicht des Gehirns von etwa 900 Gramm bei einem Erwachsenen hatte der *Homo erectus* auch ein deutlich größeres als der *Homo habilis*. Galt für den *Homo erectus* die allgemeine Regel für nicht-menschliche Primaten, wog das Gehirn eines Neugeborenen ungefähr 450 Gramm — also 100 Gramm mehr als die 350 Gramm bei einem heutigen neugeborenen Menschen. Da die Ausmaße des Beckens des *Homo erectus* denen des modernen Menschen recht nahe kamen, muss es bei dieser Homini-denart nach der Geburt zweifellos ebenfalls zu einer Fortführung des fötalen Gehirnwachstums gekommen sein. Wie beim modernen Menschen wurde die Entwicklung in der Gebärmutter höchstwahrscheinlich auch beim *Homo erectus* maximal ausgereizt. Aus diesem Grund brachte diese Art vermutlich auch Neugeborene mit einem Hirngewicht von etwa 350 Gramm auf die Welt. Bei einer vergleichbaren Schwangerschaftsdauer von neun Monaten war es somit notwendig, dass das Gehirn in den ersten drei bis vier Monate nach der Geburt nach dem fötalen Muster weiterwuchs. Daher können wir davon ausgehen, dass ein neugeborener *Homo erectus* zum Teil bereits den »sekundär nesthockenden« Zustand der heutigen Neugeborenen aufwies. Die erhöhte Hilflosigkeit der Babys während der ersten Monate nach der Geburt sorgte dafür, dass eine intensive elterliche Fürsorge erforderlich war. Zugleich eröffnete die Geburt von Babys mit einem noch recht unfertigen Gehirn sicherlich neue Möglichkeiten für ein flexibleres Verhalten und frühes soziales Lernen.

Wegen der spärlichen Informationen durch Fossilien sind unseren Deutungen enge Grenzen gesetzt. Bisher wurde nur ein einziges Fossil gefun-

den, das die Gehirngröße bei einem Kind in diesem Evolutionsstadium belegt: ein unvollständiger Kinderschädel eines *Homo erectus*, der 1936 an der 1,8 Millionen Jahre alten Fundstelle in Mojokerto auf der indonesischen Insel Java entdeckt wurde. Zu allem Übel wurde nur die Hirnschale gefunden, und ohne Gesicht und Zähne ist eine Schätzung des Alters, in dem dieses Kind starb, sehr schwierig. 2004 unterzogen die Anthropologin Hélène Coqueugniot und ihre Kollegen die Mojokerto-Hirnschale mittels Computertomographie einer eingehenden Untersuchung. Durch eine Kombination aus drei verschiedenen Methoden zur Bestimmung des Alters kamen sie zu dem Schluss, dass das Kind etwa ein Jahr alt war. Das Gewicht seines Gehirns wurde auf etwa 650 Gramm geschätzt und war damit etwa drei Viertel so schwer wie das durchschnittliche Gehirn eines erwachsenen *Homo erectus* etwas jüngeren Datums, der ebenfalls auf Java gefunden wurde. Coqueugniot und ihre Kollegen schlussfolgerten, dass das Wachstum des Gehirns beim Mojokerto-Kind bereits weit fortgeschritten war, und dass es sich noch kaum zum »sekundär nesthockenden« Zustand hin entwickelt hatte. Zwei Jahre später gelangte der Anthropologe Steven Leigh aber zu einem anderen Schluss. Er stellte fest, dass die Gehirngröße des Mojokerto-Kinds mit einem geschätzten Alter von einem Jahr in den unteren Bereich des modernen Menschen und nicht in den Bereich der Schimpansen fällt. Zudem war einer der drei Indikatoren, die Coqueugniot und Kollegen zur Altersbestimmung verwendeten, die Schließung der letzten Fontanelle in der Schädeldecke. Tatsächlich weist die Schließung dieser Fontanelle in einem Alter von etwa einem Jahr an sich darauf hin, dass das Gehirn des Mojokerto-Kinds bei der Geburt vermutlich relativ unfertig war. Unterm Strich bestätigen die wenigen und unsicheren Belege, die uns zur Verfügung stehen, dass der *Homo erectus* sich bereits dem modernen menschlichen Zustand annäherte.

DER NEANDERTALER UND DER MODERNE MENSCH stammen vom *Homo erectus* ab. Die Abstammungslinien, die zu diesen beiden weiterentwickelten Schwesterarten (*Homo neanderthalensis* und *Homo sapiens*) führten, trennten sich vor mindestens 500.000 Jahren, wahrscheinlich sogar noch früher. Nach der Abspaltung vom *Homo erectus* stieg die Gehirngröße sowohl beim Neandertaler als auch beim modernen Menschen von einem Kilogramm auf anderthalb Kilogramm, also um 50 Prozent an. Der Großteil die-

ser Zunahme um ein halbes Kilogramm entwickelte sich in den beiden Stammlinien unabhängig, zudem gibt es in der Form des Gehirns deutliche Unterschiede zwischen *Homo neanderthalensis* und *Homo sapiens*. Jede Fortsetzung des fötalen Musters des Hirnwachstums nach der Geburt, das über den *Homo erectus* hinausging, wurde bei den beiden Arten selbstverständlich unabhängig voneinander vollzogen. Die Notwendigkeit intensiverer elterlicher Fürsorge nahm dementsprechend beim Neandertaler und dem modernen Menschen parallel zu. Aus dem gleichen Grund muss auch der Spielraum für größere Flexibilität im Verhalten und frühes soziales Lernen bei kleinen Kindern bei beiden Stammlinien unabhängig voneinander zugenommen haben.

Weil eng verwandte Säugetierarten derselben Gattung immer ähnliche Tragzeiten haben, kann man davon ausgehen, dass die Schwangerschaft beim Neandertaler wie beim modernen Menschen neun Monate dauerte. Zudem ähnelte der knöcherne Beckenkanal des weiblichen Neandertalers nach heutigen Erkenntnissen demjenigen der heutigen Frau. Vor mehr als achtzig Jahren wurden in der Tabun-Höhle in Israel Beckenfragmente von einem erwachsenen weiblichen Neandertaler entdeckt. Die exakte Form des Beckens blieb aber ungewiss, bis die Computertechnologie so weit entwickelt war, dass man mit ihr virtuelle Rekonstruktionen durchführen konnte. Mittels solcher Methoden entdeckten die Anthropologen Timothy Weaver und Jean-Jacques Hublin, dass die Bereiche, in denen sich Beckeneingang und -ausgang befinden, beim Neandertaler und beim *Homo sapiens* recht ähnlich waren. Die Form des Geburtskanals allerdings ist deutlich anders. Im Vergleich zum Becken eines modernen Menschen sind der Eingang und besonders der Ausgang beim Tabun-Neandertaler breiter. Beim Verlassen des Geburtskanals war bei den Neandertalern eine zweite Drehung des Kopfes des Neugeborenen deshalb vermutlich unnötig, und das Baby konnte mit einem seitlich ausgerichteten Kopf den Mutterleib verlassen. Die erhebliche Veränderung, die zum modernen Geburtsmuster führte, bei dem der Kopf des Babys ein zweites Mal gedreht wird, damit dieser bei der Geburt nach hinten gerichtet ist, fand anscheinend statt, nachdem sich die Stammlinien der Neandertaler und der modernen Menschen getrennt hatten.

Die Fossilgeschichte der Neandertaler ist deutlich besser dokumentiert als die der älteren Hominiden, denn es gibt zwei einigermaßen vollständige Skelette von Neugeborenen. Das erste wurde in der Höhle von Le Moustier

in der Dordogne gefunden. 2010 untersuchten der Anthropologe Philipp Gunz und seine Kollegen dieses Neugeborene im Rahmen einer eingehenden Studie der Hirnentwicklung nach der Geburt. Ihre Analysen zeigten, dass Neandertaler und moderne Menschen im Hinblick auf den Entwicklungszustand bei der Geburt einander recht ähnlich sind, anschließend aber ganz verschiedene Richtungen einschlagen. Während das Gehirn der Neandertaler bei der Entwicklung eine längliche Form annimmt, wird das Gehirn des *Homo sapiens* eher kugelförmig. Der zweite neugeborene Neandertaler wurde 1999 in der russischen Mezmaiskaja-Höhle entdeckt. 2008 führten die Anthropologin Marcia Ponce de León und ihre Kollegen virtuelle Rekonstruktionen dieses Neugeborenen durch und kamen zu dem Schluss, dass das Gehirn bei der Geburt bei Neandertalern und modernen Menschen ähnlich groß ist. Tatsächlich wogen die Gehirne der beiden Neugeborenen aus Le Moustier und Mezmaiskaja mit rund 400 Gramm etwa gleich viel. Da dieses Gewicht über dem Durchschnitt des modernen Menschen liegt, sieht es so aus, als ob die weiblichen Neandertaler es bei der Geburt nicht unbedingt leichter hatten.

BEI DER GEBURT HABEN SÄMTLICHE PRIMATEN im Verhältnis zur Körpergröße aller übrigen Säugetiere überproportional große Gehirne. Bei Erwachsenen dagegen ist der Unterschied zwischen Primaten und anderen Säugetieren wegen der Entwicklung nach der Geburt viel weniger klar.

Oft wird sogar in akademischen Lehrbüchern behauptet, erwachsene Primaten hätten größere Gehirne als andere Säugetiere. Diese Behauptung ist irreführend. Was die absolute Gehirngröße betrifft, ist sie sogar falsch. Bei einem erwachsenen Elefanten ist das Gehirn viermal so groß wie beim Menschen, und mit über sieben Kilogramm hat der Pottwal das größte Gehirn, das überhaupt bei Säugetieren vorkommt. Zuverlässige Schlussfolgerungen sind nur möglich, wenn wir das Verhältnis zwischen Gehirn- und Körpergröße unter Säugetieren berücksichtigen. Eugène Dubois, der Entdecker des *Homo erectus*, zählte zu den ersten Wissenschaftlern, die gegen Ende des 19. Jahrhunderts diese Tatsache erkannten. Seither wurde das Verhältnis zwischen Gehirn- und Körpergröße vielfach diskutiert. Zwei Meilensteine auf diesem wichtigen Gebiet waren die Bücher *Evolution of the Brain and Intelligence* von Harry Jerison (1973) und *Evolving Brains* von John Allman (1999).

Eine rudimentäre Methode zum Vergleich der Gehirngrößen verschiedener Arten besteht darin, einfach das Größenverhältnis von Gehirn und Körper zu errechnen. Das Gewicht meines Gehirns beträgt zum Beispiel zwei Prozent meines Körpergewichts. Das schlichte Größenverhältnis ist aber aus einem elementaren Grund genauso irreführend wie die absolute Gehirngröße: Artenübergreifend nimmt die Gehirngröße bei zunehmender Körpergröße zwar zu, aber mit einer niedrigeren Rate. Bei einem Säugetier, das dreimal so groß wie ein anderes Säugetier ist, ist das Gehirn zum Beispiel nur doppelt so groß. Unter ansonsten gleichen Bedingungen verringert sich daher mit steigender Körpergröße immer mehr der prozentuale Anteil des Gehirns vom Körper. Bei kleinen Säugetieren macht das Gehirn generell einen größeren Teil des Körpers aus als bei großen Säugetieren. Unter den Primaten bietet der relativ primitive Mausmaki ein anschauliches Beispiel. Mit einem Körpergewicht von ungefähr 60 Gramm ist er einer der kleinsten lebenden Primaten. Bei einem erwachsenen Mausmaki wiegt das Gehirn jedoch drei Prozent des Körpergewichts und übertrifft damit meine zwei Prozent eindeutig. Sowohl die absolute Gehirngröße als auch das Verhältnis von Gehirn zur Körpergröße sind also irreführend. Für zuverlässige Vergleiche der Gehirngrößen von Säugetierarten müssen wir daher besondere Analysen durchführen, bei denen die Tatsache berücksichtigt wird, dass das Verhältnis zwischen Gehirn- und Körpergröße einer Verzögerungskurve entspricht. Nur derartige Analysen — die zunächst Dubois einführte und Jerison später in einem überzeugenden Gesamtkonzept unterbrachte — gestatten sinnvolle Deutungen der Gehirngröße bei Säugetieren.

Führen wir Analysen durch, bei denen die Körpergröße korrekt berücksichtigt wird, können wir die relativen Gehirngrößen der Arten miteinander vergleichen. Wenn wir so vorgehen, erhalten wir das beruhigende Ergebnis, dass wir Menschen unter den heutigen Säugetieren im Verhältnis zur Körpergröße das größte Gehirn haben. Aber wie sieht es mit der oft geäußerten Behauptung aus, dass Primaten größere Gehirne als andere Säugetiere haben? Diese Auffassung ist aus zwei Gründen irreführend. Obwohl erstens das Gehirn im Verhältnis zur Körpergröße bei den Primaten *durchschnittlich* in der Tat größer ist als bei anderen Säugetiergruppen, gibt es unter den Primatenarten erhebliche Schwankungen und viele Überschneidungen mit anderen Säugetieren. Tatsächlich gibt es einige Halbaffen, deren relative Gehirngrößen unter dem Gesamtdurchschnitt aller Säugetiere liegen. Zwei-

tens haben die Menschen zwar tatsächlich im Verhältnis zur Körpergröße die größten Gehirne unter den Säugetieren, doch sind die Gehirne der meisten Primaten relativ betrachtet bedeutend kleiner. Das Gehirn des Menschen ist im Verhältnis dreimal größer als das der großen Menschenaffen und zweimal größer als das der Kapuzineraffen, die uns in dieser Hinsicht am nächsten stehen. Die klaffende Lücke zwischen der relativen Gehirngröße des Menschen und den höchsten Werten nicht-menschlicher Primaten wird von den Delphinen und ihren Verwandten — die Mitglieder einer ganz anderen Säugetiergruppe sind — geschlossen. In puncto relativer Gehirngröße kommen einige Delphine dem Menschen auffallend, um nicht zu sagen unangenehm, nahe.

Kurz gesagt, ist es schlicht falsch den Eindruck zu vermitteln, sämtliche ausgewachsenen Primaten hätten größere Gehirne als alle übrigen Säugetiere. In keiner Hinsicht — weder absolut, proportional noch relativ zur Körpergröße — entspricht dies der Wahrheit. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, da Primaten bei der Geburt in der Tat relativ gesehen immer größere Gehirne als andere Säugetiere haben. Bei neugeborenen Primaten ist das Gehirn zwar zweimal so groß wie bei anderen neugeborenen Säugetieren derselben Körpergröße, doch ist der Unterschied im Erwachsenenalter viel geringer. Da das Gehirn nach der Geburt noch mehr wächst, können manche Säugetiere bis zum Erwachsenenalter einige Primaten ein- und sogar überholen. Beispielsweise überschneiden sich die relativen Gehirngrößen ausgewachsener Raubtiere vielfach mit Affen und Menschenaffen. Raubtiere bringen schwach entwickelte, nesthockende Neugeborene zur Welt, weshalb ein Großteil des Gehirnwachstums nach der Geburt stattfindet. Säugetiere sind nachweislich in der Lage, auf unterschiedliche Weise bis zum Erwachsenenalter große Gehirne zu entwickeln. Obwohl Primaten von ihrem Vorsprung bei der Geburt zweifellos profitieren, ist damit noch nicht alles entschieden.

BIS ZU DIESEM PUNKT HABEN WIR DIE Gehirngröße von Menschen und anderen Primaten ohne Berücksichtigung eventueller Geschlechtsunterschiede diskutiert. Alles bisher Gesagte gilt für beide Geschlechter gleichermaßen. Es gibt aber einige verblüffende Unterschiede zwischen Männern und Frauen, was die endgültige Größe des Gehirns betrifft. Zur Unter-

suchung der komplexen Fragen in diesem Zusammenhang ist eine entwicklungsorientierte Perspektive unentbehrlich.

Das erste auffällige Merkmal, das einige Kontroversen hervorrief, ist der ausgeprägte Unterschied der Gehirngröße zwischen erwachsenen Männern und Frauen. Im Durchschnitt ist das Gehirn einer erwachsenen Frau ungefähr zehn Prozent kleiner als das eines erwachsenen Mannes. Kurz nach Veröffentlichung der Evolutionstheorie von Darwin bzw. Wallace wurde dies erstmals klar festgestellt. Der französische Anatom Paul Broca, der heutzutage vor allem wegen seiner Entdeckung einer Sprachregion (Broca-Areal) im menschlichen Gehirn bekannt ist, leistete bei der Messung der Gehirngröße Pionierarbeit. Seine Grundtechnik bestand darin, den menschlichen Hirnschädel mit Schrot zu füllen, um sein Volumen zu messen. Der zehnpromtente Unterschied zwischen Männern und Frauen beim durchschnittlichen Volumen des Gehirnschädels, den er feststellte, löste eine Debatte aus, die bis heute andauert. Broca war fest überzeugt, dass das Gehirnvolumen ein aussagekräftiger Indikator für Intelligenz ist, und ein Hauptteil seiner Forschungen zielte in diese Richtung.

Die Ansicht, dass die Größe eines Gehirns, wie sie sich vom Volumen des Hirnschädels ableiten lässt, etwas Brauchbares über die Fähigkeiten seines Besitzers aussagt, ist naheliegend. Teilweise aus diesem Grund sorgten bedeutende Männer in der westlichen Gesellschaft vor einigen Jahrzehnten dafür, dass ihre Gehirne nach dem Tode entfernt und untersucht werden konnten. Man nahm einfach an, dass die außerordentlichen Fähigkeiten berühmter Männer ihren größeren Gehirnen zuzuschreiben wären, und dass die kleinere Durchschnittsgröße des Gehirns bei Frauen weniger Intelligenz bedeutete. 1882 veröffentlichte Paul Topinard — der wichtigste Schüler von Paul Broca — einen Artikel, in dem er folgende Erklärung für die Beobachtung lieferte, dass Frauen kleinere Gehirne haben: »Ein Mann, der im Kampf ums Überleben für zwei sorgen muss, trägt alle Verantwortung und Sorgen, die mit der Zukunft zu tun haben. Er steht durch die Umwelt und rivalisierende Kräfte unter ständigem Druck. Deshalb benötigt er ein größeres Gehirn als die Frau, die er schützen und ernähren soll. Sie widmet sich ihren Aufgaben im Haushalt, und ihre Rolle besteht darin, die Kinder groß zu ziehen, zu lieben und duldsam zu sein.« Einige Monate später veröffentlichte Topinard einen weiteren Artikel, in dem er die völlige gegenteilige Ansicht vertrat, dass das kleinere Gehirn der Frau ihrer kleineren Körpergröße zuzu-

schreiben sei. Er schrieb, »Ich glaube, mir ist es gelungen nachzuweisen, dass die Geschlechter, was die Entwicklung des Gehirns betrifft, ebenbürtig sind. Tatsächlich könnte man sogar behaupten, dass Frauen in puncto Evolution fortgeschrittener als Männer sind.« Leider konnte ich nicht herausfinden, was während jener paar Monate im Jahr 1888 geschah, das die Meinung von Topinard so dramatisch veränderte. Vielleicht hatte er mit dem Ergebnis geheiratet, dass ihm etwas Verstand eingepürgelt wurde.

Die oft geäußerte Schlussfolgerung, dass Frauen wegen ihrer kleineren Gehirnen weniger intelligent seien, ist Teil der grob vereinfachten Annahme, dass die Größe des menschlichen Gehirns mit dessen Fähigkeiten gleichgesetzt werden kann. Stephen Jay Gould entlarvte diese Vorstellung in seinem hervorragenden Buch *Der falsch vermessene Mensch* als falsch, aber ihr negativer Einfluss ist ungebrochen. Zunächst besteht bei Säugetieren generell ein Zusammenhang zwischen der Gehirngröße und der Körpergröße. Wie Gould richtig feststellte, hat die Tatsache, dass Frauen kleinere Gehirne haben, sicherlich etwas damit zu tun, dass sie kleiner als Männer sind. Paul Harvey wies aber darauf hin, dass Gould — zweifellos aus purer Begeisterung für die gute Sache — den Einfluss der Körpergröße im Grunde zweimal eliminierte. Die verschiedenen Körpergrößen erklären die unterschiedlichen Gehirngrößen von Männern und Frauen teilweise, aber nicht vollständig.

Unabhängig vom Geschlecht, also auch im Binnenvergleich von Männern, ist die Körpergröße ein bedeutender Faktor für die Größe des Gehirns. Immer wieder liest man, dass der französische Romancier Anatole France, der 1921 den Nobelpreis für Literatur erhielt, mit rund einem Kilogramm das kleinste Gehirn hatte, das bisher bekannt ist. Erst kürzlich kam zudem heraus, dass auch Albert Einstein ein sehr kleines Gehirn hatte, das nur knapp zehn Prozent größer war als das von Anatole France. Einstein hatte übrigens nicht um die Entfernung seines Gehirns nach dem Tod gebeten, vielmehr geschah dies auf Initiative eines befreundeten Pathologen, der sich während der Obduktion zu diesem Schritt entschloss. Wie Michael Paterniti in seinem unterhaltsamen Buch *Driving Mr. Albert: A Trip Across America with Einstein's Brain* erzählt, konnte er das Gehirn und die begleitenden Dokumente gerade noch retten. Unterm Strich ist der wesentliche Punkt aber, dass sowohl Anatole France als auch Albert Einstein sehr kleine Männer waren. Ihre besonders kleinen Gehirne hängen eindeutig damit zusammen und haben mit ihren intellektuellen Fähigkeiten rein gar nichts zu tun.

Bei der Gehirngröße des Menschen gibt es starke Schwankungen, und dies liegt zum Teil daran, dass die Körpergrößen so unterschiedlich sind. Das durchschnittliche Gewicht eines Gehirns beträgt beim heutigen Menschen zwar ungefähr anderthalb Kilogramm, doch der gesamte Schwankungsbereich liegt bei ganz normalen Menschen zwischen einem und zwei Kilogramm. Die größten normalen Gehirne sind also zweimal so groß wie die kleinsten. Auffallende Schwankungen gibt es auch beim Vergleich von Männern mit Frauen. Obwohl das männliche Gehirn im Vergleich zum weiblichen durchschnittlich zehn Prozent größer ist, sind die Überschneidungen groß. Außerdem ist die Schwankungsbreite bei Männern deutlich größer als bei Frauen.

Die Ansicht, dass Männer intelligenter als Frauen wären, hält sich angesichts der vielen gegenteiligen Belege erstaunlich hartnäckig. Als maßgeblich erwies sich die Veröffentlichung der beiden Bildungsexperten Larry Hedges und Amy Nowell, die 1995 eine Übersicht über zahlreiche Untersuchungen der Geschlechtsunterschiede und Schwankungen bei Intelligenztests lieferten. Sie zeigten, dass sich die Durchschnittswerte bei Intelligenztests zwischen Männern und Frauen kaum unterschieden, bei Männern aber größere Schwankungen auftraten. Die Autoren stellten allerdings fest, dass Männer und Frauen bei bestimmten Fähigkeiten etwas voneinander abweichen. Frauen neigen zu besseren Leistungen bei Tests, in denen es um sprachliche Qualitäten geht, während Männer bei Tests, die handwerkliche Fähigkeiten verlangen, etwas besser abschneiden. Der springende Punkt aber ist, dass sich trotz der zehnpromzentigen Differenz bei der Gehirngröße die Intelligenz von Männern und Frauen unterm Strich nicht unterscheidet.

An dieser Stelle ist erwähnenswert, dass der Erfinder des Intelligenzquotienten (IQ), der Franzose Alfred Binet, seinen Test ursprünglich entwickelte, um die Schüler zu ermitteln, die besondere Hilfe bei den Hausaufgaben brauchten. Sein hehres Ziel bestand darin, dass benachteiligte Kinder pädagogische Unterstützung erhalten sollten. Leider werden IQ-Tests heutzutage vor allem verwendet, um Benachteiligungen zu schaffen, und für viele hat der Intelligenzquotient an sich einen negativen Beigeschmack. Überdies ist völlig klar, dass die Ergebnisse von IQ-Tests durch den kulturellen Kontext beeinflusst werden und mit gezielten Maßnahmen verbessert werden können. Einen kulturfreien IQ-Test, der angeborene Fähigkeiten misst, gibt es gar nicht.

In der Praxis sind die Ergebnisse von IQ-Tests sogar manchmal einer befremdlichen, aber wenig bekannten Form der Manipulation unterworfen. Als ich in England aufwuchs, kam es beim Wechsel von der Grundschule in die weiterführende Schule auf die gefürchtete »Eleven Plus«-Prüfung an, die die Schüler und Schülerinnen im Alter von elf bis zwölf Jahren ablegen mussten. Dabei wurden IQ-Tests verwendet, um die mathematischen und sprachlichen Fähigkeiten zu beurteilen. Vom Ergebnis hing ab, ob man zwecks Vorbereitung auf die Universität das Gymnasium besuchen durfte oder auf die Realschule geschickt wurde. Ich erinnere mich noch gut, wieviel Kummer mir die bevorstehende »Eleven Plus«-Prüfung bereitete, und wie heftig ich mich freute, als ich bestanden hatte. Vor einigen Jahren fand ich dann heraus, wie die Ergebnisse systematisch frisiert wurden. Im Alter von elf bis zwölf Jahren schneiden Mädchen bei IQ-Tests grundsätzlich besser als Jungen ab, und damit etwa gleich viele Jungen und Mädchen auf dem Gymnasium landeten, wurden die Ergebnisse der Mädchen nach unten korrigiert. So viel zur Überlegenheit der männlichen Intelligenz!

Die Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Gehirnen haben viel mit der Entwicklung zu tun. Zwar stimmt es, dass die Gehirne von erwachsenen Männern ungefähr zehn Prozent größer als die von Frauen sind, doch gibt es bei der Geburt kaum Unterschiede. Tatsächlich braucht man eine große Stichprobe, um einen signifikanten Unterschied festzustellen. Das durchschnittliche Gewicht des Gehirns eines neugeborenen Jungen ist um etwas mehr als drei Prozent höher als bei einem neugeborenen Mädchen. Folglich muss das Gehirn eines Jungen nach der Geburt mehr wachsen, damit es zum zehnzehntenprozentigen Unterschied bei erwachsenen Männern und Frauen kommen kann. Lange nahm man an, dass die Teilung der Nervenzellen (Neuronen), die Grundbestandteile des Gehirns, etwa in der Mitte der Schwangerschaft aufhört. Dies würde bedeuten, dass das Gehirn eines neugeborenen Jungens nicht viel mehr Neuronen als das Gehirn eines neugeborenen Mädchens haben kann, es sei denn, die Dichte der Nervenzellen ist bei einem Jungen höher. Zwar weisen neuere Erkenntnisse darauf hin, dass die Teilung der Neuronen in der zweiten Hälfte der Schwangerschaft und sogar nach der Geburt weitergeht, doch ist das Ausmaß begrenzt und der Einfluss auf die Gesamtgröße des Gehirns unwesentlich. Warum aber ist das männliche Gehirn dann um zehn Prozent größer als das weibliche?

Vielleicht werden im männlichen Gehirn mehr Verbindungen zwischen den Neuronen und damit mehr Nervenfasern gebildet?

Einen sonderbaren Geschlechtsunterschied beim Gehirnwachstum nach der Geburt gibt es aber. Der Körper eines Mädchens wächst im Allgemeinen schneller als der eines Jungen, was dazu führt, dass elfjährige Mädchen etwas größer als gleichaltrige Jungen sind. Das Gehirn wächst aber vorwiegend zu Beginn des Lebens, und im Alter von sieben Jahren hat das Gehirn fast seine endgültige Größe erreicht. Folglich ist das Gehirn eines siebenjährigen Jungen um etwa zehn Prozent größer als das eines siebenjährigen Mädchens. Dies hat erhebliche Folgen für den Energieverbrauch. Gehirne sind Energiefresser, und das fast ausgewachsene Gehirn eines siebenjährigen Jungen braucht mehr Ressourcen als das eines siebenjährigen Mädchens. Das hat aber eine weitere interessante Konsequenz. Ein elfjähriger Junge hat ein fast ausgewachsenes Gehirn, das zehn Prozent größer ist als das eines Mädchens desselben Alters. Trotzdem schneiden Mädchen in diesem Alter besser bei IQ-Tests ab.

Ich möchte daher eine alternative, etwas ausgefallene Erklärung für die unterschiedliche Gehirngröße von Mädchen und Jungen vorschlagen. Gehirne bestehen nicht nur aus Neuronen und Nervenfasern. Sie erhalten auch Gliazellen, die bei der Verarbeitung der Nervensignale vermutlich keine direkte Rolle spielen. Stattdessen scheinen Gliazellen eine unterstützende Funktion zu haben, indem sie Nährstoffe und ein strukturelles Gerüst bereitstellen. Möglicherweise dienen sie auch als Verpackung, etwa wie Styroporkugeln. Männer benötigen größere Schädel, weil sie größere Kiefer, Zähne und Kaumuskel und generell einen größeren Körper haben. Vielleicht enthält das männliche Gehirn einfach nur mehr Gliazellen zur Verpackung und Unterstützung, aber nicht bedeutend mehr Neuronen und Verbindungen. Dies führt uns direkt zu der Annahme, dass die Neuronen- und Nervenfaserdichte im männlichen Gehirn geringer ist als im weiblichen. Bisher sind die Belege aber nicht eindeutig. Einige Autoren schrieben, dass zumindest einige Teile des männlichen Gehirns eine niedrigere Neuronendichte aufweisen würden, während andere einen solchen Unterschied bestritten. Das endgültige Ergebnis steht noch aus, aber unterm Strich kann ich keinen grundlegenden Unterschied zwischen männlichen und weiblichen Gehirnen erkennen, der zu einem erkennbaren Unterschied in den Fähigkeiten führen könnte.

Der auffälligste Geschlechtsunterschied im Hinblick auf das Gehirn ist sicherlich die einzigartige Rolle, die die Mutter bei dessen Entwicklung spielt. Während der Schwangerschaft und der anschließenden Stillzeit ist die mütterliche Versorgung für die Entwicklung des Gehirns ihres Kindes entscheidend. Unsere Gehirne bekommen wir von unseren Müttern. Und dieser mütterliche Anteil ist noch größer, als ich ursprünglich dachte. In einer faszinierenden Studie der Röntgenologin Angela Oatridge und ihren Kollegen wurde ein Magnetresonanztomograph verwendet, um die Gehirnmaße von neun schwangeren Frauen zu ermitteln. Sie entdeckten, dass das Gehirn während der Schwangerschaft im Durchschnitt etwa vier Prozent kleiner wird, und dass es nach der Geburt sechs Monate braucht, bis es die ursprüngliche Größe wiedererlangt. Anscheinend leistet jede Mutter weit mehr als nur ihre Pflicht, indem sie ihr eigenes Gehirn verkleinert, um ihren Fötus versorgen zu können.

KAPITEL 6

Babynahrung: Die Naturgeschichte des Stillens

Mitte der 1960er Jahre verbrachte ich zwei Jahre am Max-Planck-Institut für Verhaltensphysiologie in Seewiesen, wo ich, betreut von Konrad Lorenz, die Forschungen für meine Doktorarbeit durchführte. Mein Ziel war, bei einer von Irenäus Eibl-Eibesfeldt begründeten Zuchtkolonie von Spitzhörnchen (Tupajas) — den Eichhörnchen ähnlichen Bewohnern der Wälder Südostasiens — das Verhalten zu untersuchen, um etwas über ihren evolutionären Hintergrund herauszufinden. Damals galten Spitzhörnchen als die primitivsten lebenden Vertreter der Primaten. Demzufolge stellte ich die These auf, dass eine detaillierte Studie des Verhaltens dieser Säugetiere Hinweise auf die Anpassungen der gemeinsamen Vorfahren aller lebenden Primaten liefern würde. Völlig unerwartet, entdeckte ich bald Hinweise, dass mit der Vorstellung, Spitzhörnchen seien eng mit Primaten verwandt, etwas ganz und gar nicht stimmte — und meine Entdeckung hatte mit der Fortpflanzung zu tun. Die intensive mütterliche Versorgung gut entwickelter Jungtiere ist eine der auffälligsten Eigenschaften, die alle Primaten gemeinsam haben. Ich fand jedoch heraus, dass eine Spitzhörnchenmutter ein separates Nest baut, in dem sie einen Wurf schwach entwickelter Jungtiere auf die Welt bringt, die haarlos sind und geschlossene Augen und Ohren haben. Am meisten überraschte mich, dass die Mutter ihre Jungtiere alleine in deren Nest zurücklässt, während sie weiterhin in ihrem normalen Nest schläft und die Jungtiere nur einmal alle 48 Stunden kurz besucht, um sie zu säugen. Während des einmonatigen Aufenthalts der Jungtiere im Säuglingsnest ver-

bringt die Mutter insgesamt kaum mehr als eine Stunde mit ihnen. Das Verhalten der Mütter bei Spitzhörnchen ist das absolute Minimum an Fürsorge bei Säugetieren und steht in krassem Gegensatz zum sonstigen Verhalten aller Primaten. Diese verblüffende Entdeckung führte mich auf eine lebenslange Odyssee, auf der ich den tatsächlichen Ablauf der Evolution der Primaten herausfinden wollte.

Wie im vorherigen Kapitel dargelegt, besteht bei Säugetieren ein enger Zusammenhang zwischen mütterlichem Verhalten und Gehirngröße. Zudem besteht häufig ein Zusammenhang zwischen eifriger elterlicher Fürsorge und starken sozialen Bindungen. Bei allen Säugetieren investieren Mütter nicht nur während der Schwangerschaft viel in ihre Jungtiere, sondern auch während der Säugezeit. Unter natürlichen Bedingungen reagieren Mütter generell mit entsprechender Fürsorge auf die Geburt ihres Nachwuchses. Außer bei den jungen Spitzhörnchen ist eine intensive und umfangreiche elterliche Fürsorge für die Babys unentbehrlich.

EINEM JUNGEN PAAR, DAS MIT SEINEM ERSTEN BABY NACH HAUSE KOMMT, erscheint die künftige Elternschaft womöglich als große Herausforderung. Rat ist heutzutage vor allem im Internet reichlich vorhanden, doch reicht das Spektrum vom Vorschlag, dass ein Baby bis zu sieben Jahre lang gestillt werden solle, bis zu der Versicherung, Flaschennahrung sei nicht nur gleich gut, sondern obendrein bequemer.

Da das mütterliche Verhalten in sämtlichen modernen Gesellschaften stark von kulturellen Einflüssen geprägt ist, kann man gar nicht so leicht bestimmen, was bei unserer Spezies »natürlich« ist. In der Vergangenheit kümmerten sich selbsternannte Experten darum, Regeln aufzustellen und Ratschläge zu erteilen, mit denen sie weitgehend keine Rücksicht auf die Biologie nahmen. Bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts gaben Ärzte und Handbücher nur selten Zeitpläne für das Stillen vor. Danach änderte sich alles sehr schnell, als die industrielle Revolution an Fahrt gewann und es normal wurde, dass Mütter berufstätig sind. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts etablierten sich in der industrialisierten Welt feste Zeitpläne für das Stillen. Der neue Ansatz, der mit einer kürzeren empfohlenen Stillzeit von einem statt zwei Jahren einherging, wurde vor allem durch die Kinderärzte Luther Emmett Holt aus New York und Thomas Rotch aus Boston unterstützt. Parall-

elentwicklungen gab es in Deutschland, England und Frankreich. Holts Bestseller *The Care and Feeding of Children: A Catechism for the Use of Mothers and Children's Nurses* wurde 1894 veröffentlicht. Insgesamt 75 Auflagen wurden von ihm gedruckt, und bis etwa 1940 galt dieses Buch als Standardwerk für die Säuglingsbetreuung.

Die Holtsche Regel, laut der ein Baby fast während des gesamten ersten Lebensjahrs in dreistündigen Intervallen gefüttert werden sollte, basierte auf einer Untersuchung der Mägen verstorbener Säuglinge im Jahr 1890. Um das Volumen der Mägen zu messen, klemmte Holt sie an beiden Enden fest und füllte sie mit Wasser. Den Ernährungsplan ermittelte er dann, indem er die Milchzufuhr eines ganzen Tages auf die durchschnittliche Magengröße verteilte. In einem faszinierenden Artikel aus dem Jahr 1987 warf der amerikanische Kinderarzt Marshall Klaus einen kritischen Blick auf die starren Ernährungspläne und verspottete die Holtsche Regel als »Tank-Theorie«.

Zum Glück hat die Natur uns einige Indizien hinterlassen, mit denen wir die Biologie des Stillens von Modeerscheinungen und Halbwissen durch Hörensagen trennen können. Ein guter Beginn ist, das mütterliche Verhalten bei unseren zoologischen Verwandten, den anderen Primaten, zu untersuchen. Genau wie das Bild einer Mutter mit ihrem Baby eine der beliebtesten Darstellungen in der Kunst ist — von altägyptischen Bildnissen der Isis beim Stillen des neugeborenen Königs Horus bis zu Gemälden der Madonna mit Kind von Leonardo da Vinci, Albrecht Dürer und anderen Meistern — gibt es auch viele schöne Bilder von jungen Menschenaffen, Affen und Lemuren, die an der Brust ihrer Mutter hängen. Für das Säugen an sich können wir den Bogen sogar noch weiter spannen, da alle Säugetiere dieses Verhalten aufweisen.

WIR SIND SÄUGETIERE. Und das ist nicht bloß eine nüchterne Aussage über die biologische Klassifikation. Die Botschaft ist viel tiefgreifender: Wir besitzen sämtliche biologische Hauptmerkmale, die Säugetiere von anderen Tieren deutlich unterscheiden. Das Haarkleid und das Säugen sind offenkundig. Weniger offenkundig aber ist die Tatsache, dass zwischen beiden Merkmalen ein Zusammenhang besteht. Betrachten wir zuerst das Haarkleid.

Normalerweise haben Säugetiere Haare, allerdings ging das Haarkleid bei einigen als sekundäre Entwicklung zurück oder sogar ganz verloren.

Wasserlebende Säugetiere wie Delphine und Seekühe sind meist mehr oder weniger nackt. Zu den Ausnahmen gehört auch der Mensch, wie schon der Titel des berühmten Bestsellers *Der nackte Affe* von Desmond Morris verrät.

Seltene Fossilien mit einem Abdruck der Körpermitzung liefern direkte Hinweise auf Haare bei frühen Säugetieren. Wir wissen mit Sicherheit, dass Säugetiere bis vor mindestens 170 Millionen Jahren behaart waren. Und indirekte Belege deuten darauf hin, dass die Entwicklung der Haare bereits früher, nämlich vor mehr als 200 Millionen Jahren, stattfand. Schon vor den ersten Säugetieren hatten säugetierähnliche Reptilien, die sich weiterentwickelt hatten, kleine Vertiefungen auf der Schnauze, in denen spezielle Tasthaare wuchsen.

Da lebende Säugetiere in der Regel Haare haben, ist es nur verständlich, warum bei früheren Klassifizierungen für die gesamte Gruppe der Name *Pilosa* (vom lateinischen *pilus* für »Haar«) verwendet wurde. Das andere auffällige Merkmal der Säugetiere, das Säugen, ist aber noch grundlegender. Da es keinerlei Ausnahmen gibt, ist es universell. Alle weiblichen Säugetiere erzeugen Milch, um ihre Jungtiere säugend zu ernähren.

Das Haarkleid und das Säugen sind grundlegender und älter als die Lebendgeburt. Unter den heutigen Säugetieren legen einige seltsame Bewohner des australischen Raums — Kloakentiere wie Schnabeltiere und Ameisenigel — immer noch Eier, aber sie besitzen Haare und säugen ihre Jungtiere. Weil alle heutigen Säugetiere ihre Jungtiere säugen, ist es sehr wahrscheinlich, dass dies auch für ihre gemeinsamen Vorfahren galt. Die Lebendgeburt wurde erst später, nach der Abspaltung dieser eierlegenden Säugetiere, entwickelt. Der Ursprung der Lebendgeburt liegt mehr als 125 Millionen Jahre zurück und datiert irgendwo zwischen der Herkunft aller Säugetiere und dem gemeinsamen Vorfahren der Beuteltiere und der Plazentatiere.

Aber das Haarkleid und das Säugen hängen durch mehr als nur einen uralten Ursprung zusammen. Mit der Entwicklung des Haarkleids ging auch die Entstehung verschiedener Hautdrüsen einher. Biologen unterscheiden dabei zwischen drei Grundtypen: schweißbildende exokrine Drüsen, duft-erzeugende apokrine Drüsen und ölproduzierende Talgdrüsen. Die Talgdrüsen waren wahrscheinlich der Ausgangspunkt für die Entstehung der milcherzeugenden Drüsen bei den Vorfahren der Säugetiere. Damit ihre öli-

gen Sekrete das Fell in einem guten Zustand halten können, haben sie eine direkte Verbindung zu den Haarfollikeln. Auch die milcherzeugenden Drüsen waren ursprünglich mit Haarfollikeln verbunden, was einen Hinweis auf ihre Herkunft liefert.

Bei den Vorfahren der Säugetiere wurden Hautdrüsen, die feuchte Sekrete erzeugten, allmählich in Milchdrüsen umgewandelt. In ihnen wird Milch mit einer Mischung aus Nährstoffen und Antibiotika produziert. Vielfach wird davon ausgegangen, dass die Milch lediglich eine Nahrungsquelle für das Baby ist. Und diese Ansicht kann zu dem Irrglauben führen, dass künstliche Milch nur die geeigneten Nährstoffe enthalten muss. In Wirklichkeit jedoch verschaffen die Antibiotika in der Muttermilch dem Baby ersten Schutz gegen Krankheitserreger.

MAN KÖNNTE DURCHAUS AUF DIE IDEE KOMMEN, dass bei biologischen Klassifikationen heute ausnahmslos der offizielle Oberbegriff *Mammalia* (vom lateinischen Wort *mamma* für »Zitze«) verwendet wird, weil das Säugen das grundlegendste Merkmal ist. Aber hat sich der Begriff *Mammalia* gegenüber *Pilosa* tatsächlich deshalb durchgesetzt, weil die Biologen zu dem Schluss kamen, das Säugen sei wichtiger als das Haarkleid? Die ersten modernen Klassifikationen stammen von Carl von Linné, der als Oberbegriff *Mammalia* statt *Pilosa* verwendete. Und wie die Wissenschaftshistorikerin Londa Schiebinger herausfand, setzte sich Linné aktiv dafür ein, schwedische Frauen zum Stillen ihrer Babys zu ermuntern, und verfasste zu diesem Thema sogar eine Broschüre. Wie sich also zeigt, war Linnés Motivation, das Säugen über das Haarkleid zu stellen, eher politisch als biologisch.

Man kann vernünftigerweise davon ausgehen, dass die gemeinsamen Vorfahren aller Säugetiere ihre Jungtiere säugten. Leider können wir diese Vermutung aber nicht mittels Fossilbelegen wie im Falle des Haarkleids stützen. Auch bei einem komplexen Verhalten wie dem Säugen ist die getrennte Entstehung in mehreren Stammlinien durchaus denkbar. Da ähnliche Anforderungen häufig zu ähnlichen Anpassungen führen, kommt die unabhängige Entwicklung von Adaptionen — evolutionäre Konvergenz — recht häufig vor. Als beispielsweise die Vorfahren der Wältiere zu einem Leben im Wasser zurückkehrten, entwickelten sie einen fischähnlichen, stromlinienförmigen Körper. In ähnlicher Weise hat auch das Säugen mög-

licherweise nicht nur einen Ursprung. Aber wie können wir der Entstehung dieses Phänomens auf die Spur kommen? Dies ist ein Prachtbeispiel, wie genetische Hinweise — mit starker Unterstützung durch die vollständige Genomsequenzierung verschiedener Säugetiere — in den letzten Jahren zur Aufklärung beitragen.

Ein auffälliges universelles Merkmal der Milch aller Säugetiere ist, dass sie spezielle Proteine enthält. Diese sogenannten Kaseine kommen ausschließlich bei Säugetieren vor, und die dafür verantwortlichen Gene sind nur in Milchdrüsen aktiv. Erst kürzlich sequenzierten Forscher die kompletten Genome von einem Kloakentier (Schnabeltier), einem Beuteltier (Beutelratte) und fünf Plazentatieren (Kuh, Hund, Maus, Ratte, Mensch). Ein Stammbaum, der auf DNA-Sequenzen der Kasein-Gene basierte, zeigte eindeutig, dass die Kaseine ihren Ursprung ausschließlich beim gemeinsamen Vorfahren der Kloakentiere, Beuteltiere und Plazentatiere haben. Dieser Befund bestätigt durchschlagend die Deutung, dass das Säugen nur einen einzigen Ausgangspunkt bei einem sehr frühen Säugetier hat.

Milchzucker liefert weitere Hinweise, wie das Säugen bei den frühesten Säugetieren entstand. Vergleiche zeigen, dass es bereits beim gemeinsamen Vorfahren aller Säugetiere vor mehr als 200 Millionen Jahren verschiedene Arten von Milchzucker gab. Zu diesem Zeitpunkt unterschieden sich die Zuckersorten offensichtlich noch stark, da in der Milch von Kloakentieren, Beuteltieren und Plazentatieren inzwischen verschiedene Typen dominant geworden sind. Bei allen Plazentatieren, einschließlich des Menschen, enthält die Milch aber vor allem Laktose, und dies bedeutet, dass die Laktose schon beim gemeinsamen Vorfahren der Plazentatiere dominant war.

Laktose setzt sich aus zwei einfachen Zuckerarten, Glucose und Galactose, zusammen. Kombinierte Zucker können aber nicht die Darmwand passieren und müssen daher verdaut werden, um in den Blutkreislauf zu gelangen. Laut wissenschaftlicher Norm endet der Name jedes natürlichen Enzyms mit dem Suffix »-ase«. Dementsprechend wird das Enzym, das Laktose in Glucose und Galactose spaltet, Laktase genannt. Bei den Jungen aller Plazentatiere wird Laktase von Geburt an ausschließlich von einem Gen gesteuert in den Zellen auf der Innenseite der Darmwand produziert. Bald nach der Entwöhnung geht die Fähigkeit, Laktose zu verdauen, normalerweise verloren. Beim Menschen zum Beispiel wird ab einem Alter von etwa fünf Jahren keine Laktase mehr produziert.

Sobald keine Laktase mehr produziert wird, kann im Darm keine Laktose mehr verdaut werden, die deshalb vollständig in den Dickdarm gelangt. Im Dickdarm lebende Bakterien entwickeln schnell die Fähigkeit, verfügbare Laktose zu verdauen. Bei der anschließenden Gärung werden große Mengen eines Gasgemischs erzeugt, das Wasserstoff, Methan und Kohlendioxid enthält. Dieser Umstand erklärt, warum viele Erwachsene, die Milchprodukte verzehren, unter Verdauungsproblemen leiden. Laut dem ironischen Kommentar eines *Wikipedia*-Autors haben diese Probleme »sozial unverträgliche Folgen«.

Weil Säugetiere nach der Entwöhnung normalerweise keine Milch mehr trinken, erstaunt es kaum, dass viele Erwachsene laktoseintolerant sind. Da in bestimmten Gesellschaften der Konsum von Milchprodukten normal geworden ist, fand eine sekundäre Anpassung statt, die Erwachsenen die Verdauung von Laktose ermöglicht. Als Folge gibt es zwischen menschlichen Populationen erhebliche Unterschiede. Während in Asien Laktoseintoleranz bei Erwachsenen vorherrschend ist, ist sie in Europa besonders selten. Der Kontrollmechanismus des Laktase-Gens wurde dahingehend modifiziert, dass er nach der Entwöhnung weiter aktiv ist. Diese Veränderung fand mit verschiedenen genetischen Modifikationen in Zentraleuropa und in Nordafrika unabhängig voneinander statt. Eine Kombination aus archäologischen und genetischen Belegen deutet darauf hin, dass die Laktoseverträglichkeit von Erwachsenen ihren Ursprung vor etwa 7.500 Jahren in mitteleuropäischen Viehzüchtern Gemeinschaften hatte. In Afrika ist es komplizierter: Bisher wurden vier verschiedene genetische Veränderungen entdeckt, die eine Laktasepersistenz ermöglichen, und es gibt vermutlich noch mehr. Die meisten Veränderungen haben vor Tausenden von Jahren in Afrika ihren Ursprung, die typisch europäische Modifikation findet man dort auch.

WIE GRUNDLEGENDE DIE BEDEUTUNG des Säugens für alle Säugetiere ist, zeigt sich daran, dass das Milchdrüsen system während der Entwicklung bemerkenswert früh entsteht. Beim menschlichen Embryo wird das Grundgerüst des Körpers im Allgemeinen während der ersten zwei Monate der Schwangerschaft allmählich gebildet. Zu Beginn des anschließenden Fötalstadiums sind die Hauptorgane des Körpers dann erkennbar. Im Gegensatz dazu beginnt die Entwicklung der Milchdrüsen schon in der Mitte des

Embryonalstadiums, kurz nach Bildung der Extremitätenknospen und lange bevor die Hauptorgane des Körpers sichtbar sind.

Bei allen Säugetieren werden zwei parallele Milchleisten entwickelt — verdickte Erhebungen auf der Haut der Unterseite des Embryos, die auf der linken und rechten Körperseite von der Achsel bis zur Leistengegend reichen. Bei einem menschlichen Embryo werden die Milchleisten in der fünften Woche nach der Befruchtung gebildet. Die Zitzen tauchen, gewöhnlich in übereinstimmenden Paaren, erst später als Auswüchse der Milchleisten auf, die anschließend verschwinden. Im menschlichen Fötus werden zunächst entlang jeder Milchleiste mehrere Zitzen gebildet. Die meisten verschwinden noch vor der Geburt, und normalerweise bleibt nur eine auf jeder Seite übrig. Nach der Geburt haben Frauen — wie alle Affen und Menschenaffen — normalerweise lediglich noch zwei Brustwarzen.

Aufgrund von Fehlentwicklungen haben Frauen manchmal zusätzliche Brustwarzen, die allerdings meist nicht mit den Milchdrüsen verbunden sind. Manchmal sind zwei, drei oder sogar noch mehr Paare von Brustwarzen mit oder ohne Schwellungen vorhanden. 1886 hielt der Gynäkologe Franz Neugebauer den seltenen Fall einer Frau mit fünf Paaren von Brustwarzen fest. Neben den gewöhnlichen Brustwarzen hatte sie vier zusätzliche Paare: Eines in den Achseln, zwei oberhalb der Brüste und ein weiteres Paar darunter. Während Neugebauers Untersuchung stillte die Frau ihr Kind. Außer aus den Brüsten floss auch etwas Milch aus den Warzen in den Achseln, und eine kleine Menge konnte auch aus den anderen Warzen gepresst werden.

Vor fünf Jahrhunderten erweckten zusätzliche Brustwarzen kein wissenschaftliches Interesse, aber angeblich ließ Heinrich der Achte die arme Anne Boleyn als Hexe hinrichten, weil sie eine dritte Brustwarze und womöglich sogar eine zusätzliche Brust hatte. Zusätzliche Brustwarzen sah man damals als Teufelswerk an, und diese Anomalie diente zweifellos als willkommene Ergänzung zu den erfundenen Anschuldigungen des Ehebruchs und sogar Inzests, mit denen Anne Boleyn konfrontiert wurde.

Unter den Säugetierarten variiert die normale Anzahl der Zitzenpaare bei erwachsenen Weibchen zwischen eins und zehn, innerhalb einer Spezies ist sie aber meist identisch. In der Regel entspricht die Anzahl der Zitzenpaare der durchschnittlichen Anzahl der Neugeborenen. Bei Arten wie Pferden, Elefanten und Menschen, die normalerweise Einzelgeburten haben, ist ein Zitzenpaar die Norm. Arten wie Hunde und Ratten, die größere Würfe von

Jungtieren gebären, haben im Allgemeinen mehrere Zitzenpaare. Es ist keineswegs klar, warum in der Regel für jedes Jungtier zwei Zitzen vorhanden sind. Auf jeden Fall entspricht die Anzahl der Zitzenpaare auch bei den meisten nicht-menschlichen Primaten der Anzahl der Neugeborenen. Menschenaffen und Affen haben nur ein Zitzenpaar und bringen in den meisten Fällen ein Junges zur Welt. Dagegen haben bestimmte Halbaffen zwei oder drei Zitzenpaare und werfen gewöhnlich zwei, drei oder vier Jungtiere. Die 60 Gramm schweren Mausmakis, die ich für meine Forschung züchtete, hatten beispielsweise drei Zitzenpaare und brachten pro Wurf gewöhnlich zwei oder drei winzige Jungtiere zur Welt. Aus dem einen Paar Brustwarzen einer Frau können wir schließen, dass Menschen für Einzelgeburten angepasst sind. Andererseits deutet die größere Anzahl von Brustwarzen während der Frühentwicklung des Menschen darauf hin, dass unsere weit entfernten Vorfahren unter den Säugetieren auf Mehrlingsgeburten ausgerichtet waren.

IN SEINEM BUCH *DIE ABSTAMMUNG DER ARTEN* machte Charles Darwin eine scharfsinnige Notiz zum Thema Brustwarzen: Männer haben genauso wie ausgewachsene Männchen vieler anderer Säugetierarten ebenfalls welche. Und auch Männer können genau wie Frauen zusätzliche Brustwarzen haben. Überdies bemerkte Darwin »... die Milchdrüsen und Zitzen, wie sie bei männlichen Säugetieren vorkommen, kann man kaum als rudimentär bezeichnen; sie sind lediglich nicht voll entwickelt und funktional inaktiv.«

Es gibt aber unter den Säugetieren interessante Ausnahmen. Männliche Beuteltiere, Mäuse, Ratten und Pferde haben beispielsweise keine Zitzen, während auf die meisten anderen Säugetiere, darunter Meerschweinchen, Raubtiere, Fledermäuse und Primaten, das Gegenteil zutrifft. Bereits bei der Geburt haben Menschenbabys beider Geschlechter Brustwarzen, obwohl sie erst viel später und nur bei Frauen eine funktionale Bedeutung haben. Sowohl neugeborene Mädchen als auch Jungen haben unter beiden Brustwarzen eine kleine Schwellung und können »Hexenmilch« produzieren. Dies ist nur eine kurzzeitige Nachwirkung der von der Plazenta erzeugten Hormone, aber sie zeigt, dass auch aus männlichen Brustwarzen Milch fließen kann.

Für alle Säugetiere gilt, dass Milchleisten sowohl bei männlichen als auch weiblichen Embryos entwickelt werden. Warum passiert das bei beiden Ge-

schlechtern, und warum bleiben die Zitzen bei den meisten männlichen Säugetieren bis zum Erwachsenenalter erhalten? Tatsächlich fragen sich einige Biologen, warum Männer Frauen beim Säugen nicht unterstützen. Auf den ersten Blick sieht es schließlich so aus, als wäre ein säugender Mann eine willkommene Hilfe, um die Überlebenschancen von Säuglingen zu verbessern.

Da die gesamte Schwangerschaft am Weibchen hängenbleibt, ist es vielleicht nur logisch, dass die Männchen den Weibchen auch das Säugen komplett überlassen. Andere Formen väterlicher Betreuung wie das Herumtragen der Jungtiere sind aber entstanden. Warum säugen Männchen dann nicht? Evolutionsbiologen kamen zu dem Schluss, dass Männchen bei der Aufzucht der Jungtiere den Weibchen vermutlich nur dann helfen, wenn die Vaterschaft gesichert ist. Genetisch gesehen, erfährt jedes Männchen, dass die Aufzucht der Jungtiere von anderen Männchen unterstützt, einen evolutionären Nachteil im Vergleich zu einem Männchen, das gar keine Hilfe bietet. Womöglich haben die weiblichen Säugetiere die alleinige Verantwortung für das Säugen deshalb aufgebürdet bekommen, weil sie gelegentlich daran dachten, untreu zu sein.

Die frühe Entwicklung der Milchleisten bei den Embryos beider Geschlechter wirft die interessante Möglichkeit auf, dass vor langer Zeit während der Evolution der Säugetiere sowohl die Männchen als auch die Weibchen säugten, die Männchen dieses Verhalten aber später ablegten. In *Die Abstammung des Menschen* stellte Darwin tatsächlich fest, dass bis zu einem gewissen Stadium der Evolution der Säugetiere »beide Geschlechter Milch produzierten und damit ihre Jungtiere ernährten; und im Falle der Beuteltiere, dass beide Geschlechter ihre Jungtiere in Beuteln herumtrugen.« Er konnte aber nicht überzeugend erklären, warum Männchen zu Beginn der Säugetierevolution Jungtiere gesäugt und anschließend damit aufgehört haben sollten. Er vermutete lediglich, dass die Hilfe der Männchen mit kleiner werdenden Würfen überflüssig wurde. Es fehlt uns auch eine Erklärung für die Tatsache, dass männliche Beuteltiere, Mäuse, Ratten und Pferde keine Zitzen haben. Aktuell müssen wir akzeptieren, dass wir keine gute Erklärung für die Existenz männlicher Brustwarzen haben. Dennoch haben die vielen Männer, die beim Joggen Probleme mit ihren Brustwarzen haben, berechtigten Anspruch auf eine Antwort.

Lange ging man davon aus, dass männliche Säugetiere unter natürlichen Bedingungen nie Milch produzieren. Dann jedoch stellten der Biologe

Charles Francis, der Fledermausexperte Thomas Kunz und zwei Kollegen fest, dass männliche Dayak-Flughunde Milch produzieren. Während einer Feldstudie in Malaysia gelang es der Forschungsgruppe, aus den Zitzen von allen dreizehn mit Japannetzen gefangenen ausgewachsenen Männchen Milch zu pressen. Zudem bestätigte die mikroskopische Untersuchung einiger männlicher Exemplare, dass das Milchdrüsengewebe aktiv Milch produziert. Später wurde bekannt, dass auch das Männchen einer weiteren Spezies, der Bismarck-Maskenflughund Papua Neuguineas, Milch produziert. Bei beiden Flughundarten erzeugen Männchen jedoch nur winzige Milchmengen im Vergleich zu den Weibchen. Überdies sind bei Dayak-Flughunden die Zitzen der Männchen kleiner und weniger hart als die der Weibchen. Das deutet darauf hin, dass sie, wenn überhaupt, nur wenig dem Säugen dienen. Auf jeden Fall säugen männliche Säugetiere eigentlich nie. Diese Aufgabe fällt im Allgemeinen den Weibchen zu.

OHNE DÜSENARTIGE BRUSTWARZEN IST KEIN RICHTIGES SÄUGEN MÖGLICH. Die halbkugelförmigen, durch Fettablagerungen gepolsterten Brüste des Menschen sind eine Sonderausstattung. Man spricht aber davon, dem Kind die Brust und nicht die Brustwarze zu geben. Die permanente Schwellung der Brust, auf der sich die Brustwarze befindet, ist jedoch weder für die Erzeugung der Milch noch für das Säugen an sich erforderlich. Warum aber haben Frauen dann geschwollene Brüste?

Entgegen der Erwartung wird die Milch weder ausschließlich noch hauptsächlich von den Fettablagerungen in den Brüsten der Mutter erzeugt. Tatsächlich sind die Brustwarzen bei den meisten Säugetieren selbst während des Säugens äußerlich kaum geschwollen. Bei manchen kommt es beim Säugen des ersten Jungtiers zu einer Schwellung, die anschließend abklingt. Bei weiblichen Elefanten zum Beispiel sind die Brüste während des Säugens auffallend geschwollen, bilden sich nach der Entwöhnung aber gewöhnlich zurück. Bei verschiedenen Primaten — darunter unseren nächsten Verwandten den großen Menschenaffen — bleibt der Brustbereich bis zur ersten Geburt ebenfalls flach. Zu einer sichtbaren Schwellung kommt es nur während des Säugens, die allerdings nach der Entwöhnung manchmal weiterbesteht. Nachdem sie mehrere Jungtiere aufgezogen haben, bleiben die Schwellungen im Brustbereich bei älteren weiblichen Schimpansen und Gorillas häufig erhalten.

Inspiziert von Desmond Morris behaupteten populärwissenschaftliche Autoren oft, dass Menschen unter den Säugetieren in zweierlei Hinsicht einzigartig seien: Erstens sei die permanente Entwicklung der weiblichen Brüste eine der Veränderungen, die zur Pubertät führen, und sie beginne lange bevor das erste Baby gesäugt wird. Zweitens habe kein anderes Säugetierweibchen im Vergleich zum restlichen Körper solche großen Schwellungen. Derartige Behauptungen hinsichtlich der »Einzigartigkeit« des Menschen bedürfen aber immer einer sorgfältigen Überprüfung. Bei vielen Säugetieren, einschließlich der Ratte, beginnt lange vor der Pubertät die Entwicklung der Milchdrüsen, die sich dann rasch vollzieht. Zudem sind die Euter der Wiederkäuer deutlich angeschwollen. Die Domestizierung hat selbstverständlich besonders bei Milchkühen stark zur Vergrößerung beigetragen, aber auch bei wild lebenden Wiederkäuern sind die Euter merklich geschwollen.

Da die permanente Schwellung der menschlichen Brüste im Bereich der Pubertät weder für die Milcherzeugung noch für das Säugen notwendig ist, muss sie eine andere Funktion haben. Obwohl uns die geschwollenen Brüste einer Frau selbstverständlich erscheinen, bleibt das Rätsel bestehen, warum sie gerade so aussehen. Unbestreitbar jedoch ist, dass sie fremde Blicke anziehen. In einer Studie des Anthropologen Barnaby Dixson und seiner Kollegen aus dem Jahr 2010 wurde ein Blickverfolgungsgerät verwendet, um herauszufinden, wohin der Blick eines Mannes zuerst fällt, wenn er ein Bild eines weiblichen Körpers anschaut. Nach nicht einmal 0,2 Sekunden schaute fast die Hälfte der getesteten Männer zuerst auf die Brüste, wohingegen nur ein Drittel die Taille und ein Siebtel den Schambereich oder die Oberschenkel zuerst betrachtete. Lediglich einer von sechzehn Männern schaute sich das Gesicht der Frau an. Nicht vergessen darf man an dieser Stelle, dass nur interkulturelle Studien die Reaktionen aufdecken können, die ungeachtet sozialer Normen einheitlich bestehen. Die Reaktionen von Männern, die in Gesellschaften leben, in denen Frauen seit jeher ihre Brüste entblößen, dürften ganz anders ausfallen.

Trotz intensiver Suche nach einer Erklärung besteht das Rätsel der geschwollenen menschlichen Brüste weiterhin. 1987 veröffentlichte der Wildbiologe Tim Caro einen Artikel mit dem listigen Titel »Human Breasts, Unsupported Hypotheses Reviewed«, in dem er nicht weniger als sieben verschiedene Erklärungsmöglichkeiten für die Entstehung der permanent ge-

geschwollenen Brüste der Frau einer erneuten Prüfung unterzog. Ein Vorschlag, den bereits Darwin vorbrachte, lautet, dass die Brüste als Auslöser des männlichen Sexualtriebs entwickelt worden seien. In vielen, wenn nicht allen menschlichen Gesellschaften hängen die Brüste ausdrücklich mit dem Sexualverhalten zusammen, und sexuelle Attraktivität würde immerhin erklären, warum menschliche Brüste schon während der Pubertät anschwellen, und nicht erst zum Säugen des ersten Babys.

Mehrere andere interessante Möglichkeiten wurden genannt, um die permanente Vergrößerung der weiblichen Brüste zu erklären. Beispielsweise wurde die Vermutung geäußert, kontinuierlich geschwollene Brüste würden der Frau ermöglichen, vor Männern ihren Fortpflanzungszustand und dadurch auch den Vater zu verschleiern. Ein Gegenvorschlag lautet, dass herabhängende Brüste einem Kind ermöglichen, daran zu saugen, während die nackte Mutter es auf ihrer Hüfte trägt. Das erklärt aber nicht, warum die geschwollenen Brüste bereits während der Pubertät und nicht erst kurz vor der ersten Geburt entwickelt werden. Ein weiterer Vorschlag lautete, dass die Brustgröße die potentielle Fruchtbarkeit oder das Säugevolumen anzeigen könnte. Wie aber bereits erwähnt, gibt es keinen spezifischen Zusammenhang zwischen der Milchproduktion und den Fettablagerungen in den Brüsten. Dennoch könnte die Brustgröße ein Indikator für die Gesamtmenge gespeicherten Fetts sein und damit vielleicht auf die Widerstandsfähigkeit einer Frau bei Nahrungsmittelknappheit hinweisen. Das Problem bei dieser Erklärung ist, dass in den weiblichen Brüsten durchschnittlich lediglich vier Prozent des gesamten Körperfetts abgelagert ist.

Ein Hauptnachteil aller Erklärungen für die geschwollenen Brüste des Menschen ist, dass keine richtig getestet wurde. Die wenigen gesicherten Kenntnisse, die wir haben, deuten nicht darauf hin, dass es einen klaren Zusammenhang zwischen Brustgröße und Fortpflanzung gibt. Interessanterweise zeigten medizinische Untersuchungen, dass die Milchmenge, die kurz nach der Geburt produziert wird, nicht einfach mit der absoluten Brustgröße, sondern mit der *Zunahme* der Größe während der letzten sechs Schwangerschaftsmonate zusammenhängt. Offenbar ist für die Milchproduktion also entscheidend, wie sehr die Brüste vergrößert werden können, und nicht, wie groß sie zu Beginn waren.

Unabhängig davon, was die korrekte Erklärung für die permanent geschwollenen Brüste ist, sind mittlerweile viele Frauen in der westlichen Ge-

sellschaft — ermuntert von plastischen Chirurgen — der Meinung, dass ihre künstliche Vergrößerung die sexuelle Attraktivität steigert. Dank der Wunder der modernen Medizin kann sich jede Frau einer chirurgischen Operation unterziehen, um sich diesen Wunsch zu erfüllen.

Ein weiteres ungewöhnliches und vielleicht sogar einzigartiges Merkmal der weiblichen Brust ist der auffallend pigmentierte Hautbereich (*Areola mammae*), der die Brustwarze umschließt. Die Areola ist am stärksten vom Säugen betroffen. Die Spitze der Brustwarze selbst ist von einer kreisförmigen Anordnung von 15 bis 20 Öffnungen umgeben, die während des Säugens Milch abgeben. Die Areola hat auch mehrere kleine Öffnungen, die bisweilen als kleine Höcker über die Oberfläche hinausragen. Dies sind die Ausgänge der Montgomery-Drüsen, spezielle Talgdrüsen, die den Bereich um die Brustwarze gleitfähig machen und damit Schutz bieten und das Säugen erleichtern. Im Rahmen der normalen Hautpigmentierung variiert die Farbe der Areola von hellrosa bis dunkelbraun. Farbliche Veränderungen im Verlauf der Zeit haben mit hormonellen Schwankungen während des Menstrualzyklus, der Schwangerschaft und des gesamten Lebens zu tun. Alles deutet darauf hin, dass die Hauptfunktion der Brustwarzen mit dem Säugen zu tun hat, daher sollten wir unsere Aufmerksamkeit vorwiegend auf diesen Bereich konzentrieren.

VON DER GEBURT BIS ZUR ENTWÖHNUNG säugt jede Säugetiermutter ihr Jungtier während einer bestimmten Zeitspanne, die Laktationsperiode genannt wird. In sämtlichen modernen menschlichen Gesellschaften haben kulturelle Faktoren die Mutterschaft stark beeinflusst. Aus diesem Grund kann man keineswegs einfach sagen, was für unsere Spezies »natürlich« ist. Auf der Suche nach Indizien ist es einmal mehr hilfreich, andere Primaten — und auch andere Säugetiere — zu untersuchen, um allgemeine Prinzipien zu erkennen. Bei vielen Arten ist die Dauer der Säugezeit bemerkenswert konstant. Bei anderen, besonders bei großen Säugetieren mit Einzelgeburten, ist sie dagegen ziemlich variabel. In der Regel säugt eine Hausmutter ihre Jungtiere 22 Tage, eine Rattenmutter 31 Tage und eine Spitzhörnchenmutter 35 Tage. Bei diesen Säugetierarten ist der Schwankungsbereich der Laktationsperioden sehr begrenzt.

Mäuse, Ratten, Spitzhörnchen und andere ähnliche Säugetiere haben ein primitives Fortpflanzungsmuster mit kurzen Tragzeiten und nesthocken-

den Jungtieren. Nach der Geburt wird das Säugen nach einem bestimmten Zeitraum schlagartig eingestellt, und es findet ein plötzlicher Wechsel zu fester Nahrung statt. Dagegen bringen Primaten nach längeren Tragzeiten nestflüchtende Jungtiere zur Welt. In vielen Fällen sind die Laktationsperioden innerhalb einer Art variabel und gehen mit einem allmählichen Wechsel zu fester Nahrung einher. Unter Primaten variiert die Dauer der Säugezeit je nach Spezies und Körpergröße, zwischen den ziemlich konstanten 45 Tagen bei einem 60 Gramm wiegenden Mausmaki und dem stark variablen Zeitraum von durchschnittlich fünf Jahren bei einem 40 Kilogramm schweren Orang-Utan. Die maximale Dauer von mehr als sieben Jahren, die vom Orang-Utan bekannt ist, dürfte wohl die längste unter den Säugetieren sein.

Wie viele andere Merkmale hat auch die Dauer der Säugezeit einer Spezies mit ihrer Körpergröße zu tun: je größer das Säugetier, desto länger die Laktationsperiode. Aber selbst im Vergleich zu anderen Säugetieren derselben Körpergröße säugen Primaten ihre Jungtiere generell recht lang. Auch unter den Primaten gibt es Verschiebungen — bei identischer Größe säugen Affen und Menschenaffen immer länger als Halbaffen. Angesichts dieser großen Schwankungsbreite ist es schwierig, ein durchschnittliches Entwöhnungsalter zu bestimmen, für das wir Menschen biologisch angepasst sind. Die sozialen Normen, denen die Entwöhnungspraktiken unterliegen, sind innerhalb der menschlichen Gesellschaften sehr verschieden und ändern sich mit der Zeit. Das Spektrum der Praktiken reicht von der vollständigen Ernährung des Kindes durch eine Amme oder mit der Flasche bis zum Stillen durch die Mutter während eines Zeitraums von sechs oder sogar mehr Jahren. Das durchschnittliche Kindesalter, bei dem die Laktaseproduktion aufhört — etwa fünf Jahre — gibt uns einen Hinweis auf das natürliche Entwöhnungsalter des Menschen. Leider ist der Zeitpunkt aber zu variabel, um mehr als eine Andeutung zu liefern.

Die Anthropologin Katherine Dettwyler, die ihre Karriere mit einer preisgekrönten Feldstudie über die Mutterschaft im westafrikanischen Mali begann und später eine prominente Fürsprecherin des Stillens wurde, interessierte sich besonders für die Dauer der Stillzeit. Sie versuchte aus verschiedenen Blickwinkeln das natürliche Entwöhnungsalter des Menschen zu schätzen. Ein Ansatz ist, nach Hinweisen bei modernen Gesellschaften zu suchen, die noch als Jäger und Sammler leben. Solche Gesellschaften weisen ein durchschnittliches Entwöhnungsalter auf, das am ehesten den

Bedingungen unterworfen ist, die während mindestens 99 Prozent der menschlichen Evolution existierten. Da Jäger-und-Sammler-Gesellschaften keine Säugetiere als alternative Milchquelle domestiziert haben, beeinflussen deutlich weniger kulturelle Praktiken das Entwöhnungsalter. Wir dürfen aber nicht vergessen, dass frühe Nahrungsergänzung sich in allen heutigen menschlichen Gesellschaften auf die Dauer des Stillens auswirken kann.

Wie sich zeigte, beträgt die Stilldauer bei Jägern und Sammlern ungefähr drei Jahre. Die Anthropologen Melvin Konner und Carol Worthman hielten fest, dass bei den !Kung in Botswana und Namibia, die Jäger und Sammler sind, die Kinder im Alter von durchschnittlich dreieinhalb Jahren entwöhnt werden. Die bahnbrechende Studie von Konner und Worthman, die zwei Jahre dauerte, wurde zu einem Musterbeispiel für Felduntersuchungen in der Humanbiologie. Der Amerikaner Daniel Sellen ist ein weiterer Anthropologe, der seine Karriere der Erkundung des evolutionären Hintergrunds der menschlichen Mutterschaft widmete. Seine Forschungen ergaben, dass die lange Säugezeit der !Kung für nicht-industrialisierte Gesellschaften normal ist. In einem 2001 veröffentlichten Überblick von mehr als hundert nicht-industrialisierten Gesellschaften zeigte Sellen, dass ein Kind im Alter von durchschnittlich 29 Monaten entwöhnt wurde, wobei die Streuung zwischen einem und fünfzehn Jahren lag.

Ein zweiter Ansatz, den Dettwyler und andere verfolgten, um einen biologischen Hinweis auf das menschliche Entwöhnungsalter zu erhalten, war die Überprüfung des Verhältnisses zwischen Säugezeit und Körpergewicht, das bei Affen und Menschen ziemlich einheitlich ist. Der zu erwartende Durchschnittswert kann auf dieser Basis berechnet werden. Das auf diese Weise geschätzte Entwöhnungsalter betrug ebenfalls etwa drei Jahre. Übrigens setzte Dettwyler ihre Kenntnisse in die Praxis um und stillte ihre Tochter Miranda, bis sie vier Jahre alt war.

Die geschätzte Dauer der natürlichen menschlichen Stillzeit von etwa drei Jahren mag wahrscheinlich überraschend hoch erscheinen, doch ist sie im Vergleich zu unseren verwandten Primaten sogar niedrig. Sie liegt unter den Durchschnittswerten, die für wild lebende große Menschenaffen gelten: viereinhalb Jahre für Schimpansen, dreieinhalb Jahre für Gorillas und fünf Jahre für Orang-Utans. Dabei wiegen ausgewachsene weibliche Schimpansen mit etwa 40 Kilogramm deutlich weniger als eine Durchschnittsfrau. Dementsprechend hätte man erwarten können, dass die Entwöhnung bei

Schimpanzen früher und nicht später als beim Menschen stattfinden sollte. Tatsächlich haben Menschenaffen in Relation zur Körpergröße etwas längere Säugezeiten als Affen. Wegen dieses Unterschieds ist das für den Menschen geschätzte natürliche Entwöhnungsalter von etwa drei Jahren, das auf einer kombinierten Untersuchung von Affen und Menschenaffen basiert, wohl zu niedrig.

Andererseits kann es auch sein, dass es zu einer Sonderanpassung kam, nachdem sich die Stammlinien unserer frühen Vorfahren und der Schimpansen getrennt hatten. Zum Beispiel könnte die Anpassung für hochenergetische Nahrung während der Evolution des Menschen eine nährstoffreiche Zusatznahrung unserer Babys ermöglicht haben. Einige Experten sind der Meinung, dass eine solche Entwicklung eine frühere Entwöhnung gestattete. Dennoch weist die Abwägung der Erkenntnisse aus Vergleichen mit anderen Primaten als auch mit modernen Jägern und Sammlern darauf hin, dass das natürliche Entwöhnungsalter unserer Spezies mindestens drei Jahre betragen dürfte. Als wir Menschen uns während der Evolution von den großen Menschenaffen trennten, blieb wahrscheinlich die späte Entwöhnung als grundlegendes Muster erhalten, das bei modernen Jägern und Sammlern, die naturnah leben, noch deutlich sichtbar ist.

Ein natürliches Entwöhnungsalter von mindestens drei Jahren mag für Frauen, die daran gewöhnt sind, ihre Babys maximal drei bis sechs Monate lang zu stillen, ein wenig schockierend klingen. Der Schock wird vermutlich aber etwas gemildert, wenn man weiß, dass die drei Jahre nicht für ausschließliches Stillen, sondern für den gesamten Zeitraum, in dem gestillt wird, gelten. Interkulturelle Vergleiche, die von Daniel Sellen und anderen durchgeführt wurden, weisen darauf hin, dass der Zeitraum, in dem nur gestillt wird, im Allgemeinen zwischen sechs Monaten und einem Jahr dauert. Während der restlichen Zeit bis zur Entwöhnung erhält das Baby nicht nur Muttermilch, sondern auch zusätzliche Nahrung. 2005 empfahl der für das Stillen zuständige Bereich der *American Academy of Pediatrics*, ein Baby die ersten sechs Monate möglichst nur zu stillen und nach einem Jahr zu entwöhnen. Sowohl die Weltgesundheitsorganisation als auch UNICEF plädieren ebenfalls dafür, sechs Monate lang nur zu stillen, empfehlen heutzutage aber die Entwöhnung erst nach zwei Jahren. Wir bewegen uns also allmählich zu einem zeitlichen Ablauf zurück, den biologische und anthropologische Vergleiche nahelegen.

ZUSÄTZLICHE HINWEISE AUF DIE BIOLOGISCHEN WURZELN der menschlichen Mutterschaft, einschließlich des Kontakts zwischen Mutter und Säugling, bekommen wir von einer etwas unerwarteten Quelle, nämlich der Zusammensetzung der Milch. Nachdem sie früher umfunktionierte Hautdrüsen waren, erzeugen die Milchdrüsen der heutigen Säugetiere eine hochspezialisierte Milch. Bei jeder Spezies ist die Milch auf die spezifischen Bedürfnisse der wachsenden Jungtiere angepasst. Gleichzeitig spiegelt die Zusammensetzung das Säugeverhalten der Mutter wider. Tatsächlich kommt es zwischen Geburt und Entwöhnung zu fein abgestimmten Veränderungen, indem die tägliche Produktion zuerst zunimmt und dann allmählich bis zum Nullpunkt bei der Entwöhnung absinkt. Beim Menschen braucht es etwa fünf Tage, bis die Milchproduktion richtig angelaufen ist. Anschließend steigt der Ertrag von etwa einem halben Liter pro Tag auf einen Liter oder sogar noch mehr beim Höhepunkt der Laktation. Die Zusammensetzung der Milch verändert sich mit der Zeit zu einem gewissen Grad. Von solchen Feinjustierungen abgesehen, ist die Milchzusammensetzung innerhalb einer Spezies aber relativ konstant.

Milch ist ein kompliziertes Gemisch aus vielen Bestandteilen, und sie dient auch als wichtige Wasserquelle für den Säugling. Bestimmte Bestandteile sind besonders angepasst, während andere weniger wichtig oder sogar nebensächlich sind. Vom Standpunkt der Ernährung aus betrachtet, hat Milch drei Hauptbestandteile: Fette, Zucker und Proteine. Grob gesagt, sind Proteine wie Kasein die Hauptbestandteile für das Wachstum, Zucker wie Laktose eine kurzfristige Energiequelle und Fette für die langfristige Energiespeicherung zuständig. Fette tragen auch zum Wachstum bei, besonders der Zellmembrane.

Vergleiche der Fette, Zucker und Proteine in der Milch verschiedener Säugetiere lassen mehrere wichtige Prinzipien erkennen. Zunächst erzeugen Arten, die schwach entwickelte, nesthockende Jungtiere gebären, eine verhältnismäßig proteinreiche Milch, damit ihre Jungtiere schnell wachsen können. Dieses Muster kommt normalerweise bei Raubtieren, Insektenfressern, Kaninchen, Nagetieren und Spitzhörnchen vor. Dagegen ist der Proteingehalt der Milch bei Arten mit gut entwickelten, nestflüchtenden Jungtieren niedrig. Dies ist der Fall bei Elefanten, Huftieren und Primaten, und vor allem dem Menschen. Der durchschnittliche Proteingehalt der Milch bei Primaten beträgt weniger als zweieinhalb Prozent, und dies hängt damit zu-

sammen, dass Primatenjungtiere sogar im Vergleich mit anderen nestflüchtenden Säugetieren besonders langsam wachsen. Mit knapp einem Prozent hat die menschliche Muttermilch die niedrigste Proteinkonzentration, die bei Primaten überhaupt vorkommt.

Überraschenderweise ist es der Fettgehalt, der uns am meisten über das typische Säugemuster einer Spezies mitteilt. Während eines zwölfjährigen Projekts, in dem sie die Milchzusammensetzung als Basis für die Handaufzucht von Säugetierbabys in Zoos analysierte, entdeckte die Biologin Devorah Ben Shaul einen entscheidenden Unterschied bei Säugetieren. Ihre ursprüngliche Erwartung war, dass die Zusammensetzung der Milch die evolutionären Beziehungen der Arten widerspiegeln sollte. Schließlich gelangte sie aber zur Erkenntnis, dass das Säugeverhalten und die ökologischen Bedingungen die Haupteinflüsse sind. Ben Shaul erkannte einen grundlegenden Unterschied zwischen Arten, die nach einem festen Zeitplan säugen und bei denen die Mutter die Abstände bestimmt, und Arten, die nach Bedarf säugen und bei denen das Jungtier die Abstände bestimmt. Die allgemeine Regel ist, dass Säugetierarten, bei denen Mutter und Jungtier über einen längeren Zeitraum getrennt sind, meist einem festen Zeitplan folgen, während Arten, die mehr oder weniger kontinuierlich beisammen sind, bedarfsorientiert vorgehen.

DAS SÄUGEVERHALTEN IST BEI DEN verschiedenen Säugetierarten sehr unterschiedlich. Im Gegensatz zu den Primaten haben die Mütter bestimmter Säugetiergruppen zwischen Geburt und Entwöhnung erstaunlich wenig Kontakt zu ihren Jungtieren. Einen Extremfall für Säugen nach festem Zeitplan, bei dem alleine die Mutter den Ablauf kontrolliert, stellen die Spitzhörnchen dar. Sie säugen ihre Jungtiere nur einmal alle zwei Tage mit einer Milch, deren Konsistenz mit Schlagsahne vergleichbar ist. Die einzigen anderen nesthockenden Säugetiere, die den Spitzhörnchen in dieser Beziehung einigermaßen nahe kommen, sind die Wildkaninchen. Ein weibliches Kaninchen lässt seine Jungtiere in einer abgetrennten Kammer innerhalb des Gemeinschaftsbaus allein und säugt sie nur einmal pro Tag. Während sich Spitzhörnchen und Kaninchen gemeinsam am unteren Ende des Spektrums befinden, was die Intensität des Kontakts zwischen Mutter und Jungen betrifft, stellt die intensive elterliche Fürsorge der Primaten das obere Ende dar.

Das Säugen nach Bedarf, das die Primaten kennzeichnet, unterscheidet sich stark vom extrem starren Zeitplan der Spitzhörnchen und Kaninchen. Bei Primaten entscheidet das Jungtier, wann es gesäugt werden will. Da das Baby in den meisten Fällen direkt auf dem Fell der Mutter getragen wird, kann es sich einfach zu einer Zitze hin bewegen, wenn es trinken will. Das bedarfsorientierte Säugen ist sicherlich seit ihrem gemeinsamen Vorfahren vor etwa 80 Millionen Jahren ein Hauptmerkmal der Primaten.

Unter diesem Aspekt sind die strengen Anweisungen, die früher für das Stillen erteilt wurden, — vor allem in den Handbüchern zur Kinderpflege, die in den Vereinigten Staaten und Europa zwischen 1850 und 1940 in Mode waren — einfach haarsträubend. Jede Berücksichtigung der natürlichen biologischen Muster, mit denen das Wohlergehen von Mutter und Kind gefördert werden konnte, wurde durch unangebrachte starre Zeitpläne zunichte gemacht.

Ben Shauls Befunde der Beziehung zwischen der Art des mütterlichen Verhaltens und der Zusammensetzung der Milch sind grundlegend. Säugen nach festem Zeitplan ist typisch für nesthockende Säugetiere mit schwach entwickelten Jungtieren wie den Spitzhörnchen. Nesthockende Jungtiere werden häufig länger alleine gelassen, und eine fettreiche Milch dient als langfristige Energiequelle, um die Körperwärme zu erhalten. Zudem sind nesthockende Jungtiere nicht sehr aktiv. Da sie kaum schnelle Energiezufuhr brauchen, ist der Zuckergehalt der Milch gewöhnlich niedrig. Im Gegensatz dazu überwiegt das bedarfsorientierte Säugen bei nestflüchtenden Säugetieren, die meist keine Nester bauen. Gut entwickelte, nestflüchtende Jungtiere sind häufig sehr mobil, damit sie der Mutter ab der Geburt folgen können. Elefanten, Delphine und die meisten Huftiere wie Kühe und Pferde sind dafür herausragende Beispiele. Da ihre Jungtiere eine schnelle Energiezufuhr brauchen, ist die Milch meist zuckerreich, aber fettarm.

Primaten sind im Vergleich zu anderen »nestflüchtenden« Säugetieren eine Besonderheit, weil ihre Jungtiere sich erst lange nach der Geburt frei bewegen können. Durch das Herumtragen des Jungtiers und in manchen Fällen durch ein gemeinsames Nest wird enger Körperkontakt hergestellt, der den zusätzlichen Vorteil birgt, dass der Körper der Mutter das Jungtier wärmt. Dadurch braucht das Jungtier kaum Energie, um die eigene Körpertemperatur zu regulieren. Als Folge ist der Fettgehalt der Milch von Primaten allgemein sehr niedrig, er beträgt im Durchschnitt weniger als vier Pro-

zent. Kurze Säugeintervalle sind typisch für nestflüchtende Säugetiere, die bedarfsorientiert säugen, und häufiges Säugen ist zweifelsohne ein auffälliges Merkmal der Primaten. Dementsprechend ist die Konzentration der Milch bei nestflüchtenden Säugetieren allgemein niedrig. Weil die Jungtiere gewöhnlich bereits ab der Geburt aktiv sind, ist der Zuckergehalt der Milch aber meist höher als bei nesthockenden Säugetieren. Passend zu diesem allgemeinen Muster, enthält die Milch bei Primaten relativ wenig Protein und Fett, während der Zuckergehalt mit einem Durchschnitt von etwa sieben Prozent ziemlich hoch ist.

Die Zusammensetzung menschlicher Muttermilch ähnelt der anderer Primaten sehr. Dies ist ein eindeutiger Beweis, dass wir biologisch für dasselbe grundlegende Muster, das aus engem Kontakt zwischen Mutter und Kind und bedarfsorientiertem Säugen besteht, angepasst sind. Dennoch weisen unsere Säuglinge beim Stillen mindestens ein Sondermerkmal auf: Der Rhythmus aus heftigen Saugbewegungen und Pausen, den der Psychologe Kenneth Kaye in einer Veröffentlichung über das Saugverhalten von Kleinkindern beschrieb. Nach der Geburt haben Kinder einen Saugrhythmus, der für unsere Spezies kennzeichnend ist. Nach etwa zwanzig Saugbewegungen folgt eine längere Pause, bei dem das Kind immer noch an der Brustwarze hängt. Dieses Saugverhalten kommt anscheinend nur beim Menschen vor. Wie Kaye festhielt, verstärkt es die Kommunikation zwischen der Mutter und dem Kind auf ihrer Brust. Dieses Verhalten lässt darauf schließen, dass das grundlegende Merkmal der Primaten, der enge Kontakt zwischen Mutter und Kind, beim Menschen keineswegs reduziert, sondern verstärkt wurde.

BISHER GING ES VOR ALLEM UM DEN NÄHRSTOFFGEHALT DER MILCH, aber ihre Funktion beschränkt sich nicht nur auf die Ernährung des Babys. Sie hat zusätzliche Vorteile. Eine Säugetiermutter versorgt ihr Jungtier zum Beispiel mit diversen Antibiotika. Dadurch verleiht sie ihrem Baby einen vorübergehenden, passiven Schutz gegen Krankheitserreger, während dessen eigene Abwehrkräfte erst noch entwickelt werden. Es ist sogar denkbar, dass der Schutz gegen Infektionen eine der ersten Funktionen des Säugens war. Der Kinderarzt Armond Goldman stellte fest, dass bei Säugetieren die öligen Sekrete der Talgdrüsen (die wahrscheinlichen Vorläufer der Milchdrüsen) Immunfaktoren enthalten, die jenen in der Milch ähnlich sind. Der

Ernährungswissenschaftler Bo Lönnerdal untersuchte mehrere wichtige Merkmale der menschlichen Muttermilch und zeigte, dass die aktiven Bestandteile meist Proteine sind. Sie enthält aber auch verschiedene Immundefaktoren, darunter Antikörper und Immunzellen.

Zudem gibt es nützliche Bakterien, die sich im Verdauungstrakt niederlassen. Bei der Geburt ist das Verdauungssystem eines Babys steril, daher muss es die notwendigen Bakterien erst noch aufnehmen. Die natürliche Quelle dafür ist die stillende Mutter. Die harmlosen Bakterien, die sich im Verdauungstrakt befinden, sind bei Stillkindern und Flaschenkindern meist unterschiedlich, allerdings kann dieses Problem behoben werden, indem man der gekauften Milch entsprechende Ergänzungsmittel zufügt.

Der Kinderarzt Jack Newman — Gründer der einflussreichen Stillklinik am *Hospital for Sick Children* in Toronto — veröffentlichte 1995 einen Übersichtsartikel, in dem er die Schutzfaktoren gegen Krankheitserreger in der menschlichen Milch zusammenfasste. Er notierte unter anderem, dass in mehreren Ländern die Mütter ihre Milch direkt zur Behandlung von Augeninfektionen bei Säuglingen verwenden. Tatsächlich erreicht die Immunreaktion eines Kinds erst im Alter von etwa fünf Jahren das komplette Ausmaß. Deshalb ist der Schutz, den die Muttermilch liefert, dringend notwendig. Ärzte wissen seit langem, dass Stillkinder weniger Infektionen bekommen. Sie leiden seltener als Flaschenkinder unter Gehirnentzündungen bzw. Infektionen des Darms, der Ohren, des Atmungssystems und der Harnwege. Dieser Unterschied bleibt auch bei Säuglingen bestehen, die sterilisierte Flaschenmilch erhalten.

Alle menschlichen Babys bekommen sogar schon vor der Geburt einen gewissen Schutz. Während der Schwangerschaft werden durch die Plazenta Antikörper zum Fötus geleitet, und diese zirkulieren auch nach der Geburt noch wochen- oder sogar monatelang im Blut des Säuglings. Nach der Geburt erhalten Stillkinder einen zusätzlichen Schutz durch Antikörper, andere Proteine und Immunzellen, die in der Muttermilch enthalten sind. Einige Proteine heften sich an Krankheitserreger im Darmlumen und verhindern dadurch, dass sie durch die Darmwand gelangen. Andere reduzieren die Zufuhr bestimmter Mineralien und Vitamine, die von schädlichen Bakterien zum Überleben im Darm benötigt werden. Ein spezielles Bindungsprotein reduziert beispielsweise die Verfügbarkeit von Vitamin B₁₂,

während Lactoferrin Eisen abkapselt. Dagegen fördert der Bifidusfaktor aktiv das Wachstum nützlicher Bakterien im Darm des Säuglings.

Neben grundlegenden Antikörpern enthält menschliche Muttermilch zahlreiche Immunzellen, von denen einige Krankheitserreger direkt angreifen. Der häufigste Antikörpertyp in der Milch ist der sekretorische IgA-Antikörper, der einen speziellen Bestandteil hat, der ihn gegen die Verdauung im Darm des Säuglings schützt. Für den Kampf gegen schädliche Mikroben haben Flaschenkinder praktisch keine Mittel, bis sie selbst IgA-Antikörper bilden, was gewöhnlich erst einige Wochen oder sogar Monate nach der Geburt einsetzt. Hier Newmans Schlussworte: »Die Muttermilch ist eine wahrhaft faszinierende Flüssigkeit, die den Säugling mit weit mehr als nur Nahrung versorgt. Sie schützt Babys gegen Infektionen, bis sie sich selber schützen können.«

Etwa zum Zeitpunkt der Geburt erzeugt die Mutter Kolostrum, eine spezielle gelbliche und fettarme Vormilch. Die Produktion einer solchen Vormilch ist ein weit verbreitetes, wahrscheinlich universelles Merkmal der Säugetiere. Seine wesentliche und lebenswichtige Funktion besteht darin, gleich nach der Geburt die Immunität der Mutter an den Säugling weiterzugeben. Im Kolostrum sind Immunzellen und das antivirale Interferon enthalten, außerdem befinden sich darin Wachstumsfaktoren, die die Darmentwicklung des Säuglings fördern. Für neugeborene Jungtiere, einschließlich menschlicher Babys, ist es daher besonders wichtig, etwas von der Muttermilch zu erhalten, die als erste produziert wurde. Das Kolostrum der Kuh wird übrigens als Nahrungsergänzung verwendet, um die Genesung von Sportlern nach einer Verletzung zu beschleunigen und (leider auch) um deren Leistungen zu verbessern. In der westlichen Welt erkannte man die Bedeutung des Kolostrums für die Gesundheit der Säuglinge bis gegen Ende des 17. Jahrhunderts jedoch gar nicht. Vielmehr hielt man es weithin für schädlich. Diese seltsame Ansicht, die zumindest bis zu den Thesen des griechischen Arztes Soranus von Ephesus im 2. Jahrhundert zurückreicht, war in vorindustriellen Gesellschaften weit verbreitet und hielt sich das gesamte Mittelalter über. Hier sehen wir ein hervorstechendes Beispiel, wie kulturelle Normen manchmal direkt mit der biologischen Wirklichkeit kollidieren.

VOR ETWA 25 JAHREN HIELT ICH AN DER UNIVERSITÄT VON CAMBRIDGE einen Vortrag über die Evolution des Gehirns bei den Primaten und lernte auf die harte Tour, dass man bei den möglichen negativen Auswirkungen der Flaschennahrung nicht übertreiben sollte. Ich argumentierte, dass die einzigartigen Bedürfnisse für das Gehirnwachstum nach der Geburt vermutlich eine besondere Anpassung der menschlichen Muttermilch erforderten. Dieser durchaus angemessenen Schlussfolgerung ließ ich vorschnell eine spontane Bemerkung folgen, dass Flaschennahrung mit künstlicher Milch Mängel bei der Gehirnentwicklung verursache. Nach meinem Vortrag stand der Gastgeber Nicholas Davies — ein begabter und angesehener Biologe — auf, um die Diskussion zu eröffnen. Sofort nahm er mir den Wind aus den Segeln, indem er seinen Dank mit den Worten eröffnete: »In meiner Eigenschaft als Flaschenkind ...«.

Ich möchte deshalb an dieser Stelle betonen, dass menschliche Babys selbstverständlich gut gedeihen können, wenn sie eine Milch bekommen, die sich in vielerlei Hinsicht von der natürlichen Muttermilch unterscheidet. Die Nachteile der Flaschennahrung sind zwar statistisch nachweisbar, aber nicht überwältigend. Wichtig ist zudem, den Zeitfaktor zu berücksichtigen, der bei Vergleichen zwischen Stillkindern und Flaschenkindern unvermeidlich eine Rolle spielt. Viele Berichte betreffen Auswirkungen von Ersatzmilch, die vor Jahrzehnten verwendet wurde. In der Zwischenzeit wurde die Flaschennahrung durch stufenweise Veränderungen aber zweifellos verbessert.

Die Verabreichung von Flaschennahrung begann mit der Milch von domestizierten Säugetieren und hat dementsprechend eine relativ kurze Geschichte hinter sich. Die Domestizierung von Säugetieren, die an verschiedenen Orten auf der Welt unabhängig entwickelt wurde, reicht nicht mehr als rund 10.000 Jahre zurück. Nach den ersten Schritten bei der Domestizierung von Huftieren brauchte es wahrscheinlich nicht lange, bis man damit begann, Tiermilch zur Ernährung von menschlichen Säuglingen zu verwenden. In der Tat zählen fast 4.000 Jahre alte Tongefäße, die zur Ernährung von Kindern verwendet wurden, zu den ältesten Behältern, die man bislang entdeckt hat.

Die Anthropologin Tosha Dupras untersuchte die Kinderernährungs- und Entwöhnungspraktiken, die vor 2.000 Jahren in der ägyptischen Dakhleh-Oase angewendet wurden. Da Dokumente und andere direkte Belege der Römerzeit in Ägypten eine Seltenheit sind, analysierten Dupras und

ihre Kollegen stabile Isotope in Skeletten. Stickstoff- und Kohlenstoffisotope weisen während des Stillens und bei der Entwöhnung unterschiedliche Muster auf. Die Untersuchung ergab, dass die ägyptischen Mütter an diesem Ort ihren Säuglingen ab einem Alter von etwa sechs Monaten Zusatznahrung verabreichten und die Entwöhnung spätestens im Alter von drei Jahren abschlossen. Eine Untersuchung der Isotopen von tierischen und pflanzlichen Resten aus einem nahe gelegenen uralten Dorf lieferte wertvolle zusätzliche Informationen. Ab einem Alter von etwa sechs Monaten erhielten Kinder Milch von Ziegen oder Kühen.

Dokumente aus der Pharaonenzeit (2.686 bis 332 Jahre vor Christus) lieferten weitere Hinweise aus der Antike, die zeigten, dass Kinder bis zum Alter von drei Jahren gestillt wurden. Während dieser Phase wurde zudem manchmal Milch von domestizierten Säugetieren als zusätzliche Nahrung für ältere Säuglinge verwendet.

Noch frühere Belege liefern Untersuchungen der Stickstoffisotope in Skeletten von Säuglingen zweier Fundstellen in Anatolien, die etwa 10.000 Jahre alt sind. Die Archäologin Jessica Pearson verwendet Isotopenanalysen, um nach Hinweisen auf die Nahrungsquellen früherer Populationen und die Beziehung zwischen Ernährung und Gesundheit zu suchen. Sie studiert auch Skelette aus archäologischen Fundstellen, um Belege für frühere Tätigkeiten zu finden. Ihre Forschungsgruppe berichtete, dass in den untersuchten Populationen ein bis zwei Jahre nur gestillt wurde und die Entwöhnung zwei bis drei Jahre nach der Geburt stattfand. Beide Bevölkerungsgruppen in Anatolien befanden sich an der Schwelle vom Jagen und Sammeln zum Ackerbau. Sie hielten Nutzpflanzen und lebten mit einigen noch nicht domestizierten Tieren zusammen.

In den heutigen Gesellschaften dagegen ist die Flaschennahrung so weit verbreitet, dass die biologischen Ursprünge des menschlichen Stillens in Vergessenheit geraten sind. Für viele Frauen, besonders wenn sie arbeitstätig sind, ist es nicht nur bequemer, ihr Kind mit Ersatzmilch aus der Flasche zu ernähren, sondern häufig die einzige Möglichkeit. Dabei handelt es sich aber um relativ neue Entwicklungen in einem langen Prozess vom Stillen zur Flaschennahrung. Die Flaschennahrung kam sicherlich bald nach den ersten Domestizierungen auf, und verschiedene Säugetiere dienten als Milchquelle.

Womöglich entstand die Flaschennahrung, wie der Einsatz von Ammen, als lebensrettende Maßnahme für Säuglinge ohne Mutter.

Das Stillen hat viele Vorteile, aber es klappt nicht immer wie gewünscht. Zudem gibt es gravierende Fälle, in denen es ausgeschlossen ist zu stillen. Die Immunschwächekrankheit Aids (HIV) kann zum Beispiel durch Muttermilch übertragen werden, was Flaschennahrung notwendig machen kann. Heutzutage gibt es viele Ursachen, derentwegen ein Baby mit der Flasche ernährt werden muss. Anstatt uns darüber den Kopf zu zerbrechen, sollten wir lieber mithilfe der Evolutionsbiologie den Bedürfnissen solcher Kinder nach Nahrung und Antibiotika nachkommen und dafür sorgen, dass jede Ersatzmilch so »natürlich« wie möglich ist.

EINE WICHTIGE FRAGE BEI DER Ernährung eines Babys mit der Flasche ist, ob die Ersatzmilch die notwendigen Bestandteile enthält. Als Ausgangspunkt bietet sich eine Untersuchung der Zusammensetzung menschlicher Muttermilch an. Aber Milch enthält eine Vielzahl von Substanzen — beispielsweise mehr als 200 verschiedene Arten von Fettsäure — und womöglich sind nur wenige davon spezifisch auf die Bedürfnisse des Babys angepasst. Ohnehin ist es praktisch unmöglich, eine exakte chemische Nachbildung menschlicher Muttermilch herzustellen. Glücklicherweise gibt es aber eine einfachere Vorgehensweise, indem wir unser Wissen über das Säugeverhalten der Primaten und anderer Säugetiere anwenden. Breit angelegte Vergleiche können uns helfen, die Bestandteile zu ermitteln, die für die Entwicklung des Säuglings besonders wichtig sind. Dabei müssen wir auch außerordentliche Merkmale des menschlichen Babys berücksichtigen, die besondere Milchbestandteile erforderlich machen könnten. Ein prominentes Beispiel in diesem Zusammenhang ist unser auffallend großes Gehirn bei der Geburt und das extrem schnelle Gehirnwachstum während des ersten Lebensjahrs. Da sonst kein Säugetier dieses Merkmal aufweist, sind die Bestandteile der Milch, die in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung des Hirns stehen, vermutlich besonders wichtig.

Erstaunlicherweise spielten biologische Vergleiche in der Geschichte der Flaschennahrung kaum eine Rolle. Künstliche Milch wurde vorwiegend entwickelt, indem man herumprobierte. Am Anfang wurden Kinder mit der Milch einfach zu haltender Säugetiere ernährt. Anschließend wurde die

fremde Milch allmählich auf verschiedene Art und Weise verändert, um konkrete Probleme zu lösen. Die Milch für unsere Babys stammt traditionell hauptsächlich von Paarhufern — vor allem von Kühen, aber auch Büffeln, Ziegen, Schafen, Kamelen und Lamas. Zufällig bringen diese domestizierten Säugetiere wie die Primaten gut entwickelte nestflüchtende Jungtiere zur Welt, daher ähnelt sich die Zusammensetzung der Milch einigermaßen. Diese ungefähre Übereinstimmung hat mehr mit Glück als mit Verstand zu tun, weil größere Säugetiere mit nestflüchtenden Jungtieren eher domestiziert werden können. Kleine Säugetiere mit nesthockenden Jungtieren — wie Katzen, Hunde und Ratten — sind dagegen eher Schoßtiere bzw. Schädlinge als Lasttiere oder Nahrungsquellen.

Wie bereits erläutert, sind die Primaten innerhalb der »nestflüchtenden« Säugetiere etwas Besonderes. Die Milch der Primaten ist zum Beispiel noch weniger konzentriert als diejenige der Huftiere. Recht schnell stellte man fest, dass man die Milch eines domestizierten Wiederkäuers verdünnen musste, damit sie für ein menschliches Babys nicht zu reichhaltig war. Etwa bis zum Ende des ersten Lebensjahrs eines menschlichen Babys ist rohe Kuhmilch bzw. die Milch eines anderen Wiederkäuers für den Verzehr ungeeignet, da es zu einer Darmblutung kommen kann. Mit der Zeit erkannte man zudem, dass man der verdünnten Kuhmilch Zucker beimischen muss, damit sie eher der menschlichen Muttermilch entspricht. Interessanterweise ist Stutenmilch, was die Zusammensetzung betrifft, der menschlichen Milch ähnlicher als die Milch jedes Paarhufers, wie etwa einer Kuh. Eine Stute regelmäßig zu melken, ist jedoch eine weit größere Herausforderung, als Milch von Kühen, Ziegen oder Schafen zu gewinnen — die Zitzen einer Stute befinden sich direkt zwischen ihren muskulösen Hinterbeinen.

Im Laufe der Jahre wurde von den Herstellern in den Industrieländern wiederholt an der Zusammensetzung der Flaschenmilch herumexperimentiert. Unterm Strich aber ist es heutzutage so, dass unzählige Menschen ihre Babys weiterhin mit einer gepanschten Form von Kuhmilch ernähren. Der letzte gemeinsame Vorfahr der Huftiere und Menschen lebte vor etwa 100 Millionen Jahren. Angesichts dieser gewaltigen evolutionären Kluft ist es umso erstaunlicher, wie gut unsere Babys mit dieser Ersatznahrung klar kommen. In der Tat könnte man auf den ersten Blick meinen, künstliche Milchsorten wären ebenso gut wie menschliche Muttermilch. Die Flexibilität des Verdauungssystems eines menschlichen Babys ist erstaunlich. Es kann

die notwendigen Nährstoffe aus einer Ersatzmilch extrahieren, deren Zusammensetzung eine Mischung aus angemessener Ernährung und gesundem Profitdenken ist.

Wie die Biologin Caroline Pond 1998 in ihrem faszinierenden Buch *The Fats of Life* bemerkte, könnte einer der Gründe für diese Flexibilität sein, dass Milchfette von Säugetieren vorwiegend als Brennstoff und nicht für das Wachstum verwendet werden. Möglicherweise ist die konkrete Zusammensetzung verschiedener Fette in der Milch für den Säugling eher unwichtig. Aber wie weit geht diese Anpassungsfähigkeit menschlicher Babys? Wir müssen herausfinden, ob Flaschenkinder wirklich genauso gut wie Stillkinder gedeihen.

Offenkundig ist der Unterschied zwischen Flaschen- und Brustnahrung nicht lebensbedrohlich. Bestehende Gesundheitsrisiken hätten sicherlich schon lange unsere Aufmerksamkeit erregt und zu entsprechenden Gegenmaßnahmen geführt. Im Durchschnitt gedeihen Flaschenkinder offensichtlich so gut, dass ihre Gesundheit nicht ernsthaft beeinträchtigt wird. Das Ausbleiben von Sammelklagen in den Vereinigten Staaten spricht für sich. Andererseits kann es durchaus sein, dass die breite natürliche Schwankung innerhalb der Entwicklung von Kindern die feinen Unterschiede verschleiert. Nur eine sorgfältige Überprüfung mit exakten statistischen Tests kann die geringfügigen Mängel enthüllen, die mit der Flaschennahrung zusammenhängen.

Als möglicher Nachteil wurde genannt, dass Flaschenkinder Schwierigkeiten bei der Regulierung der aufgenommenen Menge haben könnten. Das könne zu Überernährung und damit zu einem erhöhten Risiko der Fettleibigkeit führen. Wir werden später zu diesem Thema zurückkehren. Flaschennahrung kann zusätzliche Probleme verursachen, wenn verschmutztes Wasser verwendet wird, zu stark verdünnt wird oder die Entwöhnungspraktiken ungeeignet sind. Man könnte meinen, das Problem kontaminierter Flaschennahrung wäre auf Drittweltländer beschränkt. Erst kürzlich stellte man aber fest, dass viele Babyflaschen in Industrieländern den potenziellen Schadstoff Bisphenol A (BPA) enthalten. Diese heimtückische Chemikalie erwähnte ich bereits in Kapitel 1 im Zusammenhang mit dem Rückgang der Spermienmenge. Da BPA auch die Entwicklung des Gehirns und der Schilddrüse beeinträchtigen kann, können sogar die Flaschen, die für die Ernährung mit Ersatzmilch verwendet werden, gefährlich sein. Kontamina-

tionen könnten zumindest teilweise die Ergebnisse epidemiologischer Studien erklären, laut denen Erwachsene, die als Kinder Flaschennahrung bekamen, häufiger Zucker, Krebs und Herzkreislauferkrankungen bekommen.

AUF DER SUCHE NACH DEN ENTSCHIEDENDEN BESTANDTEILEN DER MILCH richteten Forscher ihre Aufmerksamkeit auf eine besondere Kategorie komplexer, aber lebenswichtiger Fette: langkettige mehrfach ungesättigte Fettsäuren (LMUFs). Einfach gesagt, können ungesättigte Fettsäuren im Gegensatz zu gesättigten Fettsäuren zusätzliche chemische Bindungen eingehen. Dieser strukturelle Unterschied hat eine praktische Bedeutung: Mehrfach ungesättigte Fettsäuren haben einen niedrigeren Schmelzpunkt und bleiben bei Körpertemperatur flüssig. Die Tatsache, dass LMUFs wichtige strukturelle Bestandteile der Zellmembrane sind, hängt wahrscheinlich damit zusammen.

LMUFs sind sehr stark in Nervenzellen vertreten, und ihre ausreichende Zufuhr ist für die optimale Entwicklung und Funktionstüchtigkeit des Nervensystems erforderlich. Ernährungswissenschaftler wie Susan Carlson, Michael Crawford und Stephen Cunnane hoben die Bedeutung dieser Fettsäuren für die normale Hirnentwicklung während der Schwangerschaft und des Stillens ausdrücklich hervor. Zwei wichtige Beispiele sind die Arachidonsäure (AA) und die Docosahexaensäure (DHA). AA und DHA sind die Hauptkomponenten von Nahrungsergänzungsmitteln, die omega-6- beziehungsweise omega-3-Fettsäuren enthalten. Beide Fettsäuren sind wichtige Bestandteile der Nervenzellen, DHA ist zudem für die lichtempfindlichen Zellen in der Netzhaut des Auges von entscheidender Bedeutung.

Unklar ist, ob ein heranwachsendes Baby alle benötigten LMUFs selbst bilden kann, oder ob sie von der Mutter bereitgestellt werden müssen. Angesichts der einzigartigen Bedürfnisse, die bei der Entwicklung des menschlichen Gehirns nach der Geburt entstehen, zählen diese Fettsäuren wahrscheinlich zu den entscheidenden Bestandteilen menschlicher Muttermilch. Auf jeden Fall sind sie sowohl in menschlicher Milch als auch in der Milch von Primaten generell sehr gut vertreten. Vielleicht werden die besonderen Bedürfnisse, die das Wachstum des menschlichen Gehirns mit sich bringt, einfach dadurch erfüllt, dass genügend Milch geliefert wird, um die Versorgung mit LMUFs zu sichern. Kuhmilch enthält aber lediglich Spuren davon.

Wahrscheinlich ist auch, dass die LMUFs, die während der Fötalentwicklung gespeichert werden, zum menschlichen Gehirnwachstum nach der Geburt beitragen. Wie im vorherigen Kapitel erwähnt, vermuteten Stephen Cunnane und Michael Crawford einen Zusammenhang mit der außergewöhnlichen Rundlichkeit neugeborener Babys: Vielleicht liefert das gespeicherte Fett LMUFs, mit denen die Hirnentwicklung unterstützt wird. Es ist auch möglich, dass eine frühe Versorgung mit zusätzlicher Nahrung, die diese Fettsäuren in reichen Mengen enthält, ihre Verfügbarkeit für die Hirnentwicklung bei menschlichen Babys steigert.

Weil Kuhmilch lediglich Spuren von LMUFs enthält, besteht die Möglichkeit, dass Flaschennahrung zur mangelhaften Entwicklung des Nervensystems führt. Es ist allgemein bekannt, dass das Blut von Stillkindern mehr LMUFs enthält als das von Flaschenkindern. Indizien deuten darauf hin, dass die Entwicklung des Nervensystems von Flaschenkindern beeinträchtigt wird. Bei Babys, die nach einer normal langen Schwangerschaft auf die Welt kamen, sind die Ergebnisse gemischt. Aber bei Babys, die nach außergewöhnlich kurzen Schwangerschaften geboren wurden, gibt es eindeutige Beweise, dass der Mangel an LMUFs in Ersatzmilch der Entwicklung abträglich ist. Obwohl das endgültige Urteil, was den generellen Bedarf dieser Fettsäuren betrifft, bei Flaschennahrung noch aussteht, ist ziemlich klar, dass die Milch für Frühchen ausreichende Mengen dieser wichtigen Fettsäuren enthalten sollte.

Fett reichert der Fötus nur in den letzten drei Monaten der Schwangerschaft an. Babys, die lange vor dem Fälligkeitstermin auf die Welt kommen, sind nicht so rundlich wie sonst und ihre Fettreserven sind ungewöhnlich gering. Deshalb ist ihr Bedarf, durch Milch mit LMUFs versorgt zu werden, erheblich größer. Aufgrund zunehmender Hinweise, dass LMUFs in der Milch für die normale Entwicklung des Nervensystems wichtig sind, wurde künstliche Milch zuletzt in verschiedenen Ländern immer mehr mit den langkettigen Fettsäuren AA und DHA ergänzt. In 2002 genehmigte die *Food and Drug Administration* der Vereinigten Staaten nach langem Zögern, dass Ersatzmilch mit AA und DHA ergänzt werden darf. Aber ausgerechnet künstliche Milch, die auf diese Weise ergänzt wurde, wurde für zu früh geborene Babys nicht freigegeben, obwohl gerade solche Säuglinge den größten Bedarf an einer Ergänzung mit LMUFs haben. Ein grundlegendes Problem bei der Beurteilung dieser Frage war schon immer, dass alle Hinweise auf die

entscheidende Bedeutung von AA und DHA in menschlicher Milch generell indirekter Natur sind. Solche Indizienbeweise sind aber heiße Luft. Bei diesem Thema brauchen wir eindeutig gezielte medizinische Untersuchungen.

SEIT DEN 1970er JAHREN ENTDECKEN FORSCHER immer wieder Mängel bei der Entwicklung von Flaschenkindern. In einer bahnbrechenden Studie des Mediziners Bryan Rodgers und seiner Kollegen wurden alle Kinder des Geburtsjahrgangs 1946 untersucht, die von der *National Survey of Health and Development* in Großbritannien erfasst worden waren. Bei 2.000 Kindern wurden zuerst im Alter von acht Jahren und dann mit fünfzehn Jahren Leistungstests durchgeführt. Nachdem die Forscher Unterschiede des familiären Hintergrunds berücksichtigt hatten, stellten sie fest, dass die Bewertungen von Kindern, die ausschließlich Flaschennahrung erhielten, schlechter waren als die von Kindern, die ausschließlich gestillt wurden. Obwohl der Unterschied lediglich einige Punkte betrug, war er statistisch signifikant.

Mehrere nachfolgende Studien erbrachten ähnliche Ergebnisse. Sie bestätigten, dass Flaschenkinder im Durchschnitt bei Intelligenztests schlechter abschneiden und mit höherer Wahrscheinlichkeit unter Lernschwäche leiden. Zwar waren die Auswirkungen relativ klein, doch wurden wiederholt statistisch signifikante Unterschiede festgestellt.

Bei allen derartigen Erhebungen sind Störfaktoren ein Problem, wie ich sie mit dem Beispiel der Störche und Babys in Kapitel 2 veranschaulichte. Schauen wir uns dazu ein ähnliches Beispiel zum Thema Stillen an. Wir wissen, dass die geistige Entwicklung durch ökonomische Gegebenheiten beeinflusst wird. Im Durchschnitt schneiden Babys von Frauen mit höherem Einkommen bei Intelligenztests besser ab als Kinder von Frauen mit niedrigerem Einkommen. Es gibt aber auch Belege, dass wohlhabende Frauen häufiger stillen. Aus diesem Grund könnte man darauf schließen, dass es eine Verbindung zwischen Stillen und den Ergebnissen von Intelligenztests gibt, obwohl gar kein Kausalzusammenhang besteht. Bei statistischen Analysen müssen solche potentiellen Störfaktoren unbedingt berücksichtigt werden.

Die Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen geistiger Entwicklung und Stillen mehrten sich irgendwann so sehr, dass nur noch wenig Raum

für Zweifel blieb. Bis 1999 waren genügend Untersuchungen durchgeführt worden, um dem klinischen Ernährungsforscher James Anderson und seinen Kollegen eine ausgeklügelte kombinierte Analyse von 20 vorherigen Untersuchungen zu ermöglichen. Die Forscher berücksichtigten mit besonderer Vorsicht potentielle Störfaktoren wie den sozioökonomischen Status und das Bildungsniveau der Mutter, um absolut sicherzugehen, dass sie sich tatsächlich auf die Auswirkungen des Stillens selbst konzentrierten. Sie entdeckten dabei einen signifikanten Vorteil des Stillens. Bei Tests im Alter zwischen sechs Monaten und zwei Jahren zeigten Stillkinder generell bessere geistige Fähigkeiten als Flaschenkinder. Die Unterschiede bei Frühgeburten waren dabei noch größer als bei Babys mit normalem Geburtsgewicht. Die Vorteile, sein Kind zu stillen, sind für die geistige Entwicklung von Frühchen also besonders ausgeprägt.

Eine weitere bedeutende Erkenntnis der Anderson-Studie war, dass die geistige Entwicklung mit zunehmender Dauer des Stillens besser wird. Muttermilch ist für die geistige Entwicklung eines Babys offensichtlich besser als Flaschenmilch, und der Nutzen steigt vermutlich sogar, wenn man drei Jahre stillt. Bei vergleichenden Untersuchungen wurden »Stillkinder« jedoch oft lediglich einige Monate oder sogar nur Wochen gestillt. Was wir wirklich benötigen, sind Vergleiche zwischen ausschließlich mit der Flasche ernährten Babys und Säuglingen, die während des »natürlichen« Zeitraums von etwa drei Jahren gestillt wurden. Die Entwicklungsbiologen Walter Rogan und Beth Gladen machten in einem 1993 veröffentlichten Artikel über das Stillen und die kognitive Entwicklung einen wertvollen Schritt in diese Richtung. In einer prospektiven Studie testeten sie ungefähr 200 Kinder im Alter zwischen sechs Monaten und fünf Jahren. Sie fanden heraus, dass das Abschneiden bei Stillkindern signifikant besser als bei Flaschenkindern war, obwohl der Unterschied auch in diesem Fall nur einige Punkte betrug. Noch interessanter war ihr Befund, dass das durchschnittliche Abschneiden mit der Dauer des Stillens, die zwischen einigen Wochen und einem Jahr oder mehr lag, kontinuierlich anstieg.

Fast alle Belege, dass Stillen für die geistige Entwicklung eines Babys von Vorteil ist, beruhen auf Indizien. Das ist praktisch unvermeidlich, weil ethische Aspekte Experimente meist ausschließen. Eine wichtige experimentelle Untersuchung lieferte aber einen überzeugenden Beleg, dass die Anreicherung von Flaschennahrung mit den mehrfach ungesättigten Fettsäuren

DHA und AA die geistige Entwicklung verbessert. 2000 wertete eine von der Biologin Eileen Birch geleitete Forschungsgruppe aus, wie sich die viermonatige Anreicherung einer kommerziellen Ersatzmilch mit DHA und AA auswirkte. Bei dieser experimentellen Methode wurden viele Störfaktoren beseitigt, die den Vergleich zwischen Still- und Flaschenkindern erschweren. Im Alter von vier, zwölf und achtzehn Monaten wurden Kinder mittels standardisierter Entwicklungstests beurteilt. Bei Kindern im Alter von 18 Monaten führte die Ergänzung der Flaschennahrung mit DHA und AA zu einer durchschnittlichen Verbesserung um sieben Punkte auf einer standardisierten Skala für geistige Entwicklung. Dagegen kam es zu keinen signifikanten Auswirkungen auf die Muskelaktivität oder das allgemeine Verhalten. Diese Untersuchung untermauert auf überzeugende Weise einen Kausalzusammenhang zwischen DHA und AA in der Milch und der Entwicklung des Gehirns. Die Vermutungen, die auf Erhebungen basierten, wurden damit klar bestätigt.

Obwohl verschiedene Studien zeigten, dass Stillkinder bei Intelligenztests besser als Flaschenkinder abschneiden, wurde selten die Frage gestellt, ob dieser Vorteil bis zum Erwachsenenalter weiterbesteht. 2002 konnten aber der Epidemiologe Erik Mortensen und seine Kollegen mit ihrer Veröffentlichung der Ergebnisse einer langfristigen Untersuchung, in deren Rahmen bei mehr als dreitausend Personen das Verhältnis zwischen Stillen und Intelligenzquotient getestet wurde, diese Lücke schließen. Bei dieser Untersuchung wurde der Zeitraum, in dem gestillt wurde, anhand von Informationen, die Mütter am Ende des ersten Lebensjahrs von ihren Babys lieferten, in fünf Kategorien unterteilt: weniger als ein Monat, zwei bis drei Monate, vier bis sechs Monate, sieben bis neun Monate und mehr als neun Monate. Nachdem die erfassten Babys das Erwachsenenalter erreicht hatten, wurden Intelligenztests durchgeführt. Mortensen und seine Kollegen berücksichtigten nicht weniger als dreizehn potentielle Störfaktoren: den sozialen Status und Bildungsstand der Eltern, den Familienstand, die Körpergröße, das Gewicht und die Gewichtszunahme der Mutter während der Schwangerschaft, den Zigarettenkonsum während der letzten drei Monate der Schwangerschaft, die Anzahl der Schwangerschaften, die geschätzte Aufenthaltsdauer in der Gebärmutter, die Körpergröße und das Gewicht bei der Geburt und Indikatoren für Komplikationen während der Schwangerschaft und bei der Geburt. Auch unter Berücksichtigung all dieser Faktoren konnte bei den Er-

wachsenen ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Länge des Zeitraums, in dem sie gestillt wurden, und besseren Ergebnissen bei verschiedenen Intelligenztests festgestellt werden.

STILLKINDER UND FLASCHENKINDER UNTERSCHIEDEN SICH auch in anderen wichtigen Punkten. Unter anderem hielt Bo Lönnerdal fest, dass Stillkinder immer weniger als gleichaltrige Flaschenkinder wiegen. Häufig stellen Mütter fest, dass Flaschenkinder nach einer gewissen Zeit ein wenig dicklich werden. Ein Grund dafür ist die tendenzielle Überfütterung mit der Flasche, die vor allem auftritt, wenn das Loch im Schnuller zu groß ist und die Milch mehr fließt als tröpfelt. Der Eindruck, den übergewichtige Babys hinterlassen, erhärtet den Verdacht, dass Flaschennahrung möglicherweise das Risiko erhöht, im späteren Leben fettleibig zu werden.

Wissenschaftler führten Untersuchungen durch, um diese Möglichkeit zu sondieren, aber die Befunde waren zunächst widersprüchlich. Schließlich konnten aber auch in diesem Fall scheinbar konfligierende Ergebnisse aus verschiedenen Studien durch eine kombinierte Analyse zufriedenstellend ausgewertet werden. 2005 veröffentlichten der Geburtshelfer Thomas Harder und seine Kollegen die Ergebnisse einer Gesamtprüfung von siebzehn Studien, die strengen Bedingungen unterlagen. Sie entdeckten deutliche Hinweise darauf, dass die Gefahr des Übergewichts generell sinkt, je länger ein Kind gestillt wird. Im Durchschnitt ging die Wahrscheinlichkeit, dass jemand übergewichtig war, pro Monat, in dem gestillt wurde, um vier Prozent zurück.

Stillen birgt noch weitere Vorteile für Neugeborene. Ein genereller Effekt ist das Wohlbehagen, das vermittelt wird. Der Kinderarzt Larry Gray und seine Kollegen wiesen nach, dass Babys nicht so stark auf Schmerz reagieren, wenn sie von ihren Müttern gehalten und gestillt werden. Ein gängiges Verfahren in Krankenhäusern ist, mit einer Lanzette Blut von der Ferse der Babys abzunehmen. In einer randomisierten Studie wurden 15 neugeborene Babys während der Blutentnahme von ihren Müttern gehalten und gestillt, während 15 andere Babys im Einklang mit der üblichen Praxis der Krankenhäuser in ihren Körbchen lagen. Die Babys, die während der Blutentnahme gestillt wurden, weinten weniger, zogen weniger Grimassen und hatten einen niedrigeren Puls. Stillen vermindert offensichtlich die Schmerzreaktion von Babys.

Dramatischer sind die Hinweise, laut denen der Krippentod häufiger bei Flaschenkindern als bei Stillkindern eintritt. Erstmals 1969 offiziell als plötzlicher Kindstod anerkannt, ist der unerwartete, symptomfreie Tod eines Babys für Eltern ein schlimmes Erlebnis. In früheren Zeiten, als Mütter häufiger mit ihren Babys die Nacht verbrachten, wurde der Krippentod in der Regel damit erklärt, dass die Mutter sich auf den Säugling gelegt und ihn erstickt hätte. Auch heute werden bei einem Krippentod starke Schuldgefühle entwickelt, obwohl die Eltern meist gar nicht für ihn verantwortlich sind. Heute wissen wir, dass der plötzliche Kindstod rein medizinische Gründe hat, obwohl die exakte Ursache weiterhin unklar ist. Nachgewiesen ist auf jeden Fall, dass durch Stillen das Risiko reduziert wird, abzuwarten bleibt aber, ob der Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung der Milch und der Hirnentwicklung eine Rolle spielt. Andere Faktoren, die mit Flaschennahrung zusammenhängen, beispielsweise der Unterschied zwischen raschem Trinken aus einer Flasche und der langsameren Milchaufnahme durch die Brust, könnten ebenfalls eine Rolle spielen.

Die Umweltgesundheitsforscher Aimin Chen und Walter Rogan untersuchten in den Vereinigten Staaten, inwieweit Stillen und die Gefahr des Krippentods miteinander zu tun haben. Sie analysierten Daten der *National Maternal and Infant Health Survey* von 1988 und verglichen mehr als 1.000 scheinbar gesunde Babys, die nach der Geburt innerhalb von einem bis zwölf Monaten starben, mit fast 8.000 Kindern, die das erste Lebensjahr überlebten. Insgesamt war die Sterbequote während des ersten Lebensjahrs bei Babys, die irgendwann gestillt wurden, um 20 Prozent niedriger. Zudem ging die Quote immer mehr zurück, je länger gestillt wurde. Die Gefahr von Infektionskrankheiten war bei Stillkindern etwa 25 Prozent geringer, während der plötzliche Kindstod nur um etwa 16 Prozent seltener eintrat und damit an der Grenze der statistischen Signifikanz lag. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass man in den Vereinigten Staaten jährlich mehr als siebenhundert Todesfälle während der ersten zwölf Lebensmonate vermeiden kann, wenn man sich mit Nachdruck für das Stillen einsetzt.

Der Zusammenhang zwischen Flaschennahrung und der Gefahr des plötzlichen Kindstods wurde auch von der Gerichtsmedizinerin Mechtild Vennemann und ihren Kollegen untersucht. In ihrer Arbeit, die sich auf eine deutschen Studie zum plötzlichen Kindstod stützte, verglichen sie mehr als 300 Babys, die den plötzlichen Kindstod erlitten, mit 1.000 gleichaltrigen

Kindern, die überlebten. Sie fanden heraus, dass die Gefahr des Krippentods für die gesamte Kindheit halbiert wurde, wenn ein Baby während des ersten Monats ausschließlich gestillt wurde. Die Forschungsgruppe schloss ihren Bericht mit dem Rat ab, Kampagnen zu starten, um die Gefahr des plötzlichen Kindstods zu senken und darin eine Stillzeit von mindestens sechs Monaten zu empfehlen.

Verschiedene Arten haben verschiedene Proteine, und die Unterschiede sind bei entfernter Verwandtschaft größer. Fremde Proteine stimulieren die Abwehrmechanismen des Körpers. Daher besteht die Möglichkeit, dass allergische Reaktionen auf die Proteine in einer Ersatzmilch, die von einer entfernt verwandten Spezies wie der Kuh stammt, beim Krippentod eine Rolle spielen. Es gibt jedenfalls Hinweise, dass Flaschennahrung bei anfälligen Kindern allergische Reaktionen auslösen kann. Der Gesundheitswissenschaftler Michael Burr und seine Kollegen untersuchten bei fast fünfhundert Kindern, die eine familiäre Vorgeschichte mit allergischen Beschwerden hatten, Keuchhusten und Allergien. Kinder, die irgendwann gestillt wurden, hatten in knapp mehr als der Hälfte der Fälle Keuchhusten, während bei den Flaschenkindern 75 Prozent betroffen waren. Dieser Unterschied galt auch, nachdem mehrere potenzielle Störfaktoren berücksichtigt worden waren. Burr und seine Kollegen kamen zu dem Schluss, dass Stillen gegen Infektionen der Atemwege langfristigen Schutz bietet — ein weiteres Beispiel für die Vorteile des Stillens.

DAS STILLEN EINES BABYS hat auch Vorteile für das Wohlbefinden der Mutter. Da die Frequenz der Gebärmutterkontraktionen zunimmt, wenn direkt nach der Geburt gestillt wird, kann der Blutverlust verringert werden. Im Wissen, dass Frauen während des Stillens Nachwehen haben, untersuchten die Gynäkologin Selina Chua und ihre Kollegen, wie sich das Stillen und die Stimulation der Brustwarzen auf die Aktivität der Gebärmutter nach der Geburt auswirken. Ihre Ergebnisse zeigten, dass die Frequenz der Gebärmutterkontraktionen durch Stillen fast verdoppelt wurde. Wurden nur die Brustwarzen stimuliert, kam es auch zu mehr Kontraktionen, aber nicht im selben Ausmaß. Da zu hoher Blutverlust nach der Geburt eine Hauptursache für Müttersterblichkeit in Entwicklungsländern ist, hat dieser Befund eine wichtige praktische Bedeutung. Ganz allgemein führt Stillen zu einer

schnelleren Erholung der Gebärmutter nach der Geburt und es hilft der Mutter, ihre alte körperliche Verfassung wiederzuerlangen.

Für die Gesundheit der Mutter eröffnen sich sogar noch größere Vorteile. Anscheinend hat Stillen eine Schutzwirkung, indem die Häufigkeit von Krebserkrankungen der Brust und der Eierstöcke verringert wird. Daten, die aus der Haltung von Säugetieren in Zoos gewonnen wurden, ergaben, dass Weibchen, die ihre Jungtiere nie gesäugt hatten, häufiger an Milchdrüsenkrebs erkrankten. Parallel dazu enthüllten Studien aus den 1920er Jahren, dass menschliche Brüste, die nie ein Baby gestillt hatten, häufiger von Krebs befallen wurden. In ihrem umfassenden Buch *Ever Since Adam and Eve* hielten die Fortpflanzungsbiologen Malcolm Potts und Roger Short fest, dass Brustkrebs beim Menschen in Industrieländern etwa 120mal öfter als in Gesellschaften von Jägern und Sammlern vorkommt. In den Vereinigten Staaten bekommt jede elfte Frau Brustkrebs, und jede sechzehnte Frau stirbt daran. Statistische Belege weisen auch darauf hin, dass das Brustkrebsrisiko abnimmt, je mehr Kinder gestillt werden. Dies wurde durch eine umfangreiche globale Untersuchung der *Collaborative Group on Hormonal Factors in Breast Cancer* bestätigt, die 2002 veröffentlicht wurde. Die Untersuchung umfasste Informationen aus 47 epidemiologischen Studien in 30 Ländern zu insgesamt 50.000 an Brustkrebs erkrankten Frauen und doppelt so vielen, die nicht unter dieser Krankheit litten.

Bei solchen Untersuchungen gibt es aber einen Störfaktor. Bekannt ist, dass bereits die Schwangerschaft an sich einen gewissen Schutz gegen Brustkrebs mit sich bringt. Die Erhebung der *Collaborative Group* bestätigte dies: Frauen mit Brustkrebs hatten im Durchschnitt fünfzehn Prozent weniger Kinder zur Welt gebracht. Die Erhebung zeigte auch, dass unter den Frauen, die Kinder zur Welt gebracht hatten und an Brustkrebs erkrankten, nur etwas mehr als 70 Prozent jemals gestillt hatten. Dagegen hatten fast 80 Prozent der Frauen ohne Krebs irgendwann gestillt, wenn auch nur für ein paar Monate. Ein weiterer Unterschied zeigte sich auch darin, wie lange eine Frau in ihrem Leben gestillt hatte. Im Durchschnitt hatten Frauen, die von Brustkrebs befallen wurden, insgesamt nur zehn Monate gestillt, während der Wert bei Frauen ohne Krebs etwa 15,5 Monate betrug.

Der wichtigste Befund war, dass das relative Brustkrebsrisiko mit jeder Geburt um sieben Prozent und mit jedem Jahr, in dem gestillt wurde, um mehr als vier Prozent zurückging. Die *Collaborative Group* kombinierte alle

Befunde, um die kumulierte Wahrscheinlichkeit, bis zum Alter von siebzig Jahren Brustkrebs zu bekommen, in Industrieländern zu schätzen. Würden alle Frauen gleich viele Kinder zur Welt bringen und in ihrem Leben genauso lange stillen wie bis vor kurzem Frauen in Ländern der Dritten Welt, gäbe es nur halb so viele Todesfälle wegen Brustkrebs — statt in einem von 16 Fällen nur noch in einem von 37. Stillen macht allein fast zwei Drittel dieses Rückgangs aus.

Beginnend mit Untersuchungen, die in den 1970er Jahren durchgeführt wurden, konnte Stillen auch mit einem geringeren Eierstockkrebsrisiko in Verbindung gebracht werden. In einer internationalen Studie, die 1993 veröffentlicht wurde, wurden fast vierhundert Fälle von Eierstockkrebs mit über 2.500 sorgfältig abgestimmten Gegenbeispielen verglichen. Bei Frauen, die mindestens zwei Monate lang gestillt hatten, war die Gefahr einer Erkrankung an Eierstockkrebs um etwa ein Viertel reduziert.

IN DIESEM KAPITEL ZEIGTE ICH AUF, dass unsere Babys auf einen engen Kontakt mit der Mutter und bedarfsorientiertes Stillen ausgerichtet sind. Wichtig ist aber auch, dass das Säugen nur ein Teil der mütterlichen Fürsorge ist, wie wir im nächsten Kapitel sehen werden. Schon der enge körperliche Kontakt zwischen Mutter und Baby ist ein wesentlicher Teil mütterlicher Fürsorge. Unter anderem muss eine Mutter in der Nähe ihres Babys bleiben, um es je nach Bedarf stillen zu können. Wie eng der Kontakt zwischen Mutter und Kind ist, hängt auch davon ab, wie das Baby herumgetragen wird. Vom Stillen abgesehen, muss die Mutter ihr Kind auch noch auf andere Weise pflegen, und dies bedeutet, dass wir die mütterliche Fürsorge breiter erforschen müssen.

KAPITEL 7

Babypflege: Ein umfassenderes Bild

Mutter zu sein beschränkt sich beim Menschen nicht darauf, Babys mit Milch zu versorgen. Zur Babypflege gehört viel mehr, darunter auch der enge und innige Kontakt mit dem Säugling sowie eine umfassende Sorge um sein Wohlbefinden. Das grundlegende Muster des bedarfsorientierten Säugens bei den Primaten ist nur möglich, wenn die Mutter ständig anwesend ist, und viele Aspekte des mütterlichen Verhaltens leiten sich aus dieser einfachen Bedingung ab.

Wir müssen auch bedenken, dass die natürliche Umgebung — genau wie bei anderen Lebewesen — sehr wichtig ist. Wie alle anderen Lebewesen entstanden die Menschen unter natürlichen Bedingungen, die wir ebenfalls berücksichtigen müssen, wenn wir uns voll und ganz verstehen wollen. Wir müssen die natürlichen Lebensräume berücksichtigen, in denen sich unsere Vorfahren im Verlauf ihrer Entwicklung aufhielten. Sesshafte Gesellschaften sind beim Menschen eine sehr junge Entwicklung, die nur etwa 10.000 Jahre zurückreicht. Davor lebten unsere Vorfahren als Jäger und Sammler und waren viel stärker von ihrer natürlichen Umgebung abhängig. Seit sich die Stammlinien des Menschen und der Schimpansen vor etwa acht Millionen Jahren trennten, war Jagen und Sammeln in 99 Prozent der Zeit unser vorherrschender Lebensstil.

* * *

BEI DEN MEISTEN NICHT-MENSCHLICHEN PRIMATEN trägt die Mutter ihr Baby mit sich herum, und dieses klammert sich an ihrem Fell fest. Dies ist ein Hauptmerkmal des mütterlichen Verhaltens bei Primaten. Das Baby kann sich am Fell der Mutter festklammern, weil es sowohl mit den Füßen als auch mit den Händen sicher greifen kann. An den Füßen werden der große Zeh und die anderen Zehen in einer zangenartigen Aktion zusammengedrückt — wie beim Griff, den wir verwenden, um einen Gegenstand mit unserem Daumen und den anderen Fingern festzuhalten. Da die menschliche Anatomie während der Hominidenevolution für den aufrechten Gang angepasst wurde, büßten unsere Füße allmählich die Fähigkeit zu greifen ein, was bei keinem anderen Primaten geschah. Im Gegenzug wurde durch eine seltsame Umkehrung die Greiffähigkeit unserer Hände verstärkt. Während bei uns ein zangenartiger Griff mit dem Daumen und den anderen Fingern möglich ist, ist bei den anderen Primaten der Griff mit dem Fuß am besten ausgeprägt. Beim nächsten Zoobesuch sollten Sie sich einen jungen Affen oder Menschenaffen ansehen, wie er sich auf dem Fell seiner Mutter mit den Füßen festhält.

In der Regel werden Jungtiere nur von der Mutter getragen. Bei bestimmten Primatenarten, beispielsweise verschiedenen Neuweltaffen, helfen der Vater und gelegentlich andere Gruppenmitglieder beim Tragen der Jungtiere mit. Marmosetten und Tamarine, die etwa gleich groß wie Eichhörnchen sind, bringen in der Regel Zwillinge zur Welt. Durch ausgeklügelte Experimente zeigten die Verhaltensforscher Carsten Schradin und Gustl Anzenberger bei brasilianischen Weißbüschelaffen, dass die Energiekosten der Mutter signifikant reduziert werden, wenn der Vater und andere Gruppenmitglieder die Zwillinge tragen. Die Tiere wurden getestet, wie weit sie ohne, mit einem oder mit zwei Jungen auf dem Rücken springen konnten. Die Kosten wurden anschließend dadurch ermittelt, wie sehr das Gewicht der Jungen die Sprungleistungen verminderte. Bei den meisten Affen und Menschenaffen trägt aber die Mutter ihr einzelnes Jungtier fast ununterbrochen von dessen Geburt bis zu dem Zeitpunkt, an dem es unabhängig wird. Selbst danach kehrt das Jungtier hin und wieder zur Mutter zurück, um sich auf ihrem Fell festzuklammern und dabei zu säugen oder Schutz zu suchen.

Bei allen nicht-menschlichen Primaten bleibt das Baby in der Nähe der Mutter, während diese schläft, und klammert sich entweder an ihrem Fell fest oder kuschelt sich in einem Nest an ihren Körper. Das permanente He-

rumtragen eines Babys nach der Geburt garantiert einen längeren intensiven Kontakt zwischen Mutter und Kind, der gleichzeitig besondere Lernmöglichkeiten bietet. Da die Mütter aller Affen- und Menschenaffenarten praktisch rund um die Uhr in direktem Kontakt mit ihren Babys stehen, war dies zweifelsohne auch bei ihren gemeinsamen Vorfahren der Fall. Da die Jungtiere bereits lange vor der Evolution des Menschen herumgetragen wurden, verhielten sich unsere frühen Vorfahren vermutlich ähnlich.

Alle Eltern wissen, dass das Herumtragen eines Babys anstrengend ist und mit zunehmendem Alter immer beschwerlicher wird. Die Energiekosten für das Herumtragen des Babys stehen nach dem Energieaufwand der Mutter für die Milchversorgung an zweiter Stelle. Bei unseren Vorfahren, den Jägern und Sammlern, die weite Strecken zurücklegen mussten, machte die körperliche Belastung durch das Tragen der Kinder sicherlich bei jeder Mutter einen signifikanten Teil des Energiehaushalts aus. Es ist aber keinesfalls leicht, diesen Aufwand genau zu schätzen. Ausgehend von einer einfachen Tatsache gibt es aber zum Glück einen indirekten Weg, um diese Aufgabe zu lösen: Solange ein Baby ausschließlich gestillt wird, stammt sämtliche Energie direkt von der Mutter. Eine effiziente Nutzung der Ressourcen setzt daher voraus, dass eine Mutter ihr Baby immer trägt, wenn der zusätzliche Energieverbrauch dafür niedriger ist, als wenn sich das Baby selbständig bewegen würde. Würde das Baby weniger Energie verbrauchen, um eine bestimmte Strecke zurückzulegen, wäre das Herumtragen der Mutter Verschwendung.

Dieser Gedanke war der entscheidende Punkt einer scharfsinnigen Untersuchung von Savannenpavianen, die von den Feldbiologinnen Jeanne Altmann und Amy Samuels im kenianischen Amboseli durchgeführt wurde. Die beiden Forscherinnen hielten sorgfältig fest, wie Pavianmütter ihre Jungtiere herumtrugen. Wie erwartet, wurden die kleinen Babys bei Wanderungen oder auf der Futtersuche ständig von ihren Müttern getragen. Während der ersten beiden Lebensmonate trugen die Mütter ihre Babys jeden Tag acht Stunden herum und legten dabei etwa zehn Kilometer zurück. Anschließend nahm diese Zeitspanne immer mehr ab und pendelte sich schließlich bei Null ein, als die Jungtiere das Alter von acht Monaten erreicht hatten. Da schnelles Fortbewegen während der ersten Lebensmonate besonders hohe Energiekosten bei den Babys verursachen würde, ist es sinnvoller, wenn die Pavianmutter ihr Jungtier trägt.

In einer theoretischen Untersuchung wählte die Anthropologin Patricia Kramer einen ähnlichen Ansatz, indem sie den menschlichen Energieverbrauch von Müttern und Kindern beim Gehen ermittelte. Erstaunlicherweise ist der menschliche Energieverbrauch beim langsamen Gang besonders effizient. Bei niedrigen Geschwindigkeiten verbrauchen wir Menschen weniger Energie als andere Säugetiere vergleichbarer Körpergröße. Bei höheren Geschwindigkeiten steigt der Verbrauch aber stark an, und deshalb sind andere Säugetiere bei schnellen Bewegungen effizienter als Menschen. Der Energievorteil des menschlichen Gangs ist auf langsame Bewegungen beschränkt, und genau das ist meist der Fall, wenn eine Mutter ihr Baby herumträgt. Wie die Paviane setzen menschliche Mütter die Energie effizienter ein als kleine Kinder, wenn sie unterwegs sind. Die Höhe der zusätzlichen Energiekosten, die durch das Herumtragen einer Last verursacht werden, hängt aber davon ab, wo sie am Mutterleib getragen wird. Der Verbrauch ist am kleinsten, wenn die Last in der Nähe des Körperschwerpunkts getragen wird. (Es kann zwar angenehm sein, aber das Huckepackverfahren ist biologisch gesehen keine optimale Lösung.) Einige Belege deuten darauf hin, dass der Energieverbrauch, der für das Tragen aufgewendet wird, durch zunehmende Gewöhnung verringert werden kann.

Wie bei den Pavianen steigt auch beim Menschen mit zunehmender Geschwindigkeit der Unterschied zwischen dem Energieverbrauch von Mutter und Kind. Aus diesem Grund sollten Mütter ihre Babys möglichst immer dann tragen, wenn es zu schnelleren Fortbewegungen kommt. Interessanterweise deuteten Kramers Berechnungen darauf hin, dass eine Mutter ihr Kind dazu bringen sollte, ab einem Alter von etwa drei Jahren überwiegend selbständig zu gehen. Dagegen würde es bei einem gewöhnlichen Schrittempo von Erwachsenen keinen Vorteil für den Energiehaushalt einer Mutter bieten, wenn ihr Kind vor seinem zweiten Geburtstag unabhängig gehen würde. Hier stellt der Mutter-Kind-Konflikt ein potentiell Problem dar. Vom Standpunkt des Energieverbrauchs ist es für das Kind immer am besten getragen zu werden. Selbst wenn sich das Kind frei bewegt, kann seine optimale Geschwindigkeit vom günstigsten Tempo der Mutter abweichen. Deshalb müssen Mutter und Kind eine Kompromisslösung finden. Kramer schloss mit der Bemerkung, dass ihre Befunde eine wesentliche Bedeutung für den optimalen Zeitraum zwischen zwei Geburten haben könnten und empfahl auf Basis ihrer Forschungsergebnisse einen Abstand von vier Jahren.

Im Verlauf der Evolution wurden menschliche Mütter mit einem weiteren Problem konfrontiert: Für das Kind wurde das Festhalten am Mutterleib immer schwieriger. Das wollene Haarkleid, das ursprünglich so gut zu greifen war, ging immer mehr zurück. Eine Analyse von Genen, die in Zusammenhang mit dem Wachstum der Haare stehen, brachte einen Hinweis darauf, dass wir unsere Körperbehaarung vermutlich vor etwa zwei Millionen Jahren verloren. Wegen der kombinierten Auswirkungen des evolutionären Verlustes der Körperhaare und der Greiffähigkeit der Füße gingen dem menschlichen Baby letztlich sowohl die Fähigkeit, sich am Körper der Mutter festzuklammern, als auch die dafür erforderliche Körperbehaarung verloren.

Eine Alternativlösung, bei der das Baby herumgetragen werden konnte und die Mutter gleichzeitig die Hände für die Nahrungssuche und andere Aktivitäten frei hatte, war deshalb vonnöten. Die ersten Tragetücher wurden vermutlich aus natürlichen Materialien wie Lianen oder Tierhäuten gefertigt. Bisweilen wurde sogar vermutet, dass die Entstehung des Tragetuchs zur Erfindung der Bekleidung führte. Das Ursprungsdatum der Bekleidung wurde neulich auf fast 200.000 v. Chr. geschätzt. Genetische Belege zeigen, dass Filzläuse, für deren Evolution — im Gegensatz zu Kopfläusen — Kleider nötig waren, sich etwa zu diesem Zeitpunkt zu einer unabhängigen Stammlinie entwickelten. Unabhängig davon haben menschliche Populationen, die auch heute noch wenige oder keine Kleider tragen, immer eine Vorrichtung, um ihr Baby zu tragen. Die uralte Praxis des Herumtragens von Babys ist sicher ein Teil unseres evolutionären Erbes. Das typische Verhalten der Primaten, durch engen Körperkontakt eine intensive Beziehung zwischen Mutter und Kind herzustellen, blieb ebenfalls bestehen. Wie wir aber sehen werden, führte das ständige Herumtragen der Babys in einem anderen Bereich bald zu einer neuen Herausforderung — mit den Exkrementen des Babys fertig zu werden.

MIT RAFFINIERTER (WENN AUCH UNAPPETITLICHER) EFFIZIENZ schlucken die meisten Säugetiermütter die Exkremente — Harn und Kot — ihrer Babys herunter. Glücklicherweise können menschliche Mütter mit diesem Problem auf andere Weise fertig werden. Jäger und Sammler hatten es am einfachsten, da sie die Babyexkremente einfach unterwegs hinter sich lassen konnten. Nachdem sich die Menschen aber in festen Siedlungen nie-

dergelassen hatten, kam das nicht mehr in Frage. Die Notwendigkeit einer neuen Methode der Abfallbeseitigung führte schließlich zur Erfindung der Windel. Während der gesamten jüngeren Menschheitsgeschichte wurden Windeln verwendet. In mehreren altägyptischen medizinischen Texten werden Kinderwindeln und sogar Ratschläge für die Behandlung von Windelausschlag erwähnt. Mit der zunehmenden Verbreitung von Windeln wurden Eltern schließlich auch mit dem lästigen Problem konfrontiert, ihren Kindern beizubringen, wie man aufs Klo geht.

Säugetiermütter, die wenig entwickelte nesthockende Jungtiere zur Welt bringen, verhindern die Verschmutzung ihres Nestes, indem sie deren Exkreme schlucken. Bei Mäusen und Ratten beispielsweise putzt die Mutter häufig ihre Jungtiere, indem sie sie am ganzen Körper ableckt, und schluckt dabei Harn und Kot. Offenbar führt das Lecken der Mutter sogar dazu, dass Jungtiere ihre Exkreme ausstoßen. Tatsächlich ist es bei bestimmten nesthockenden Säugetieren — wie einigen Raubtieren — so, dass die Jungen sich nur dann entleeren, wenn sie geleckt werden. Diese Erkenntnis ist für eine erfolgreiche Handaufzucht unentbehrlich. Bei ihr muss man das Lecken der Mutter durch eine Bauchmassage des Jungtiers mit einem feuchten Tuch simulieren. Unterbleibt dies, kann es zu einer lebensbedrohlichen Speicherung von Harn und Kot kommen. Auf den ersten Blick ist schwierig zu verstehen, warum Raubtierbabys ihre Exkreme nicht einfach ausstoßen. Möglicherweise stehen Raubtiere unter besonderem Druck, die Verschmutzung ihres Nestes zu vermeiden, weshalb unter natürlichen Bedingungen die Mutter dafür sorgt, dass die Jungtiere nur in ihrer Anwesenheit Harn und Kot ausstoßen.

Obwohl sie gut entwickelte, »nestflüchtende« Jungtiere haben, ist das Verhalten der nicht-menschlichen Primaten im Hinblick auf ihre Exkreme vergleichbar. Bei den wenigen nestlebenden Arten schluckt die Mutter ebenfalls die Exkreme ihrer Jungtiere, um das Nest sauber zu halten. Dies gilt beispielsweise für die nestlebenden Mausmakis. Im Verlauf meiner Untersuchungen zog ich mehrere Mausmakibabys, die alle halb so groß wie mein kleiner Finger waren, mit der Hand auf, und verwendete dabei ein warmes, nasses Tuch, um wie beschrieben den Ausstoß der Exkreme herbeizurufen.

Bei den Primatenarten, die ihre Jungtiere ununterbrochen herumtragen, vermeidet die Mutter auf ähnliche Weise die Verschmutzung ihres Fells. Zu-

mindest in der ersten Zeit nach der Geburt schluckt sie Harn und Kot hinunter. Auch unsere nächsten biologischen Verwandten, die großen Menschenaffen, verhalten sich so. Diese weit verbreitete Vorgehensweise muss also an irgendeinem Punkt der menschlichen Evolution verloren gegangen sein. Selbstverständlich finden wir schon die Vorstellung ekelhaft, die Exkremente unserer Babys zu schlucken, aber es ist unklar, wann und wie wir diese uralte Verhaltensweise der Säugetiere aufgegeben haben.

Weil bei anderen Primaten die Mutter die Exkremente ihrer Jungtiere zu sich nimmt, taucht gar nicht das heikle Problem auf, ihnen die selbständige Erledigung der Toilette beizubringen. Heranwachsende Jungtiere lernen allmählich, ihren Harn und ihren Kot in Abwesenheit der Mutter auszustoßen. Wie Erwachsene entledigen sie sich einfach ihrer Exkremente, wo immer sie sich gerade befinden. Bei Beobachtungen von Brüllaffen im Regenwald der Insel Barro Colorado in Panama erlebte ich diese unproblematische Abfallbeseitigung aus erster Hand. Während ich unter einem Baum saß und mir Notizen machte, ließ die Brüllaffengruppe oben in der Baumkrone alles fallen. Harn und Kot prasselten durch die Blätter herunter. Ich lernte rasch, dass im komplexen Gefüge eines tropischen Regenwalds wenige Ressourcen ungenutzt bleiben. Innerhalb weniger Minuten kamen schwirrend Mistkäfer angefliegen, um sich über die reiche Ernte herzumachen, und rollten den Brüllaffenkot in kleinen Kugeln weg. Ein Stunde später war von der Exkrementendusche nichts mehr zu sehen.

IRGENDWANN WÄHREND DER MENSCHLICHEN EVOLUTION wurden wir pingelig und gaben den unbekümmerten Umgang der Primaten mit Exkrementen auf. Schließlich führte diese Abkehr als Nebenprodukt fester Siedlungen dazu, dass Kinder beigebracht bekamen, aufs Töpfchen zu gehen. Das Ergebnis ist, dass in vielen Industrieländern die Mütter bei ihren Babys und Kleinkindern auf Windeln angewiesen sind. Die Meinungen gehen aber weit auseinander, wann der richtige Zeitpunkt ist, seinem Kind die Benutzung der Toilette beizubringen. In der Praxis führte dies zu einer Schwankung zwischen exakten Zeitplänen und extremer Toleranz.

Zehn Auflagen der von der US-Regierung herausgegebenen Broschüre *Infant Care* geben einen schnellen historischen Überblick, wie sich die Ansichten änderten, was die Erziehung in diesem Punkt betrifft. Dieser größte

Verkaufsschlager der Regierung aller Zeiten wurde erstmals 1914 vom *Children's Bureau* veröffentlicht, und in der Folge wurden mehr als 50 Millionen Exemplare verkauft. Die Auflage aus dem Jahr 1935 empfahl, früh zu beginnen: »Man darf mit der Erziehung des Darms ruhig schon am Ende des ersten Monats anfangen. Vor dem dritten Monat sollte man aber auf jeden Fall beginnen, und die Erziehung bis zum achten Monat abschließen.« Als Unterstützung riet man den Müttern, ihrem Baby täglich zu exakten Zeiten ein Seifenzöpfchen in den Hintern zu stecken. Ein Bild mit einer Uhr neben Mutter und Kind betonte die absurde Notwendigkeit, die Zeiten streng einzuhalten, wobei eine Abweichung von mehr als fünf Minuten nicht erlaubt war. Luther Emmett Holt — der Vorkämpfer für die Einhaltung strenger Ernährungszeitpläne für Babys — stellte übrigens auch fest, dass die Erziehung für das richtige Aufs-Töpfchen-Gehen zwei Monate nach der Geburt beginnen sollte. In seinem 1894 veröffentlichten Buch *The Care and Feeding of Children* regte auch er Seifenzöpfchen als Hilfsmittel an.

Mit der Zeit wurde jedoch allgemein akzeptiert, dass eine stark reglementierte, erzwungene oder sogar mit Strafen durchgesetzte Erziehung schwerwiegende emotionale Auswirkungen haben kann. Die Psychiaterin Mabel Huschka äußerte beispielsweise 1942 die Vermutung, dass zwischen Kindheitsneurosen und erzwungener Darmerziehung ein Zusammenhang bestehe. Sie kritisierte ausdrücklich die Ratschläge, die in der Ausgabe von *Infant Care* aus dem Jahr 1935 erteilt wurden. Freudianer stellten fest, dass eine solch frühe, stark reglementierte Erziehung zu emotionalen Problemen und Neurosen im späteren Leben führte. Letztlich sorgten Experten wie die bekannten Kinderärzte Benjamin Spock und T. Berry Brazelton dafür, dass das Pendel in die völlig entgegengesetzte Richtung ausschlug. Sie begründeten den Gedanken eines kindesorientierten Ansatzes bei der Erziehung zum Thema Toilette. Als Folge hat sich in den Vereinigten Staaten heutzutage die Philosophie durchgesetzt, dass man Kinder entscheiden lassen sollte, wann sie bereit sind, aufs Klo zu gehen.

Die Website der *American Academy of Family Physicians* empfiehlt aktuell, dass ein Kind zur Benutzung des Töpfchens bereit ist, wenn es signalisieren kann, dass seine Windel verschmutzt ist, oder sogar sagen kann, dass es aufs Töpfchen muss. Laut dieser Einschätzung ist ein Kind gewöhnlich im Alter von achtzehn bis vierundzwanzig Monaten soweit, aber manchmal müssen die Windeln noch bis zum dritten Lebensjahr gewechselt werden. In den

1950er Jahren waren in den Vereinigten Staaten 97 Prozent aller Kinder im Alter von drei Jahren dazu erzogen worden, aufs Töpfchen zu gehen. Heutzutage gilt dies nur noch für die Hälfte aller Kinder in diesem Alter. Zum Teil sind für diesen Wandel Einwegwindeln verantwortlich, die es überall zu kaufen gibt und weniger Arbeit machen. Dies hat aber auch große Nachteile für die Umwelt — in den Vereinigten Staaten machen Millionen verbrauchter Windeln ein Zehntel des Hausmülls aus.

Heute glauben die meisten amerikanischen und europäischen Kinderärzte, dass eine wirksame Kontrolle der Schließmuskeln der Harnblase und des Darms vor dem Ende des dritten Lebensjahrs glatt unmöglich ist. Kulturübergreifende Vergleiche zeigen aber, dass die Vorstellungen, wann ein Kind bereit ist, zur Selbständigkeit erzogen zu werden, soziale Normen und keine Entwicklungszwänge widerspiegeln. In einer selten zitierten Veröffentlichung aus dem Jahr 1977 über die Bantu sprechenden Digo in Kenia zeigten die Anthropologen Marten und Rachel deVries, dass diese bereits während der ersten Wochen damit begannen, ihre Babys zum kontrollierten Stuhlgang und Wasserlassen zu erziehen. Eine sensible Erziehung ohne Zwang und Strafen sorgte bei ihnen dafür, dass die Kinder im Alter von fünf bis sechs Monaten in der Lage sind, Darm und Harnblase rund um die Uhr unter Kontrolle zu haben.

Bei den Digo begann eine Mutter, indem sie sich auf den Boden setzte und ihre Beine nach vorne ausstreckte. Das Baby setzte sich so zwischen ihre Beine, dass sein Gesicht nach vorne gerichtet war und von ihrem Körper gestützt wurde. Dann gab die Mutter einen speziellen »*schuuss*«-Laut von sich, den das Baby schließlich mit dem Harnlassen zu verbinden lernte. Erfolg wurde mit Stillen oder Schmusen belohnt. Einen ähnlichen Ansatz wählte die Mutter, um den Stuhlgang auszulösen, dabei wurde das Baby aber anders gehalten. Dieses Beispiel der Digo zeigt, dass es mit einem liebevollen Vorgehen durchaus möglich ist, sein Baby schon früh zum selbständigen Stuhlgang und Wasserlassen zu erziehen.

Die Erziehung der kenianischen Digo ist keineswegs ein Einzelfall. Jüngste Berichte aus China zeigen, dass dortige Mütter ebenfalls früh mit der Erziehung ihrer Babys anfangen und den gesamten Vorgang während des ersten Lebensjahrs abschließen. Wie bei den Digo gibt die Mutter ein hörbares Signal von sich, während sie das Baby über eine Latrine oder freies Gelände hält. In ihrem Buch *Infant Potty Training*, das erstmals 2000 veröf-

fentlicht wurde und bereits in der dritten Auflage vorliegt, führt die holländische Autorin Laurie Boucke diese Beispiele aus Kenia und China sowie andere Fälle auf. Boucke und Kathleen Chin sind Mitverfasserinnen eines frei zugänglichen Artikels im Internet mit dem Titel *Potty Training*, laut dem jedes Baby zwischen der Geburt und einem Alter von etwa sechs Monaten lernfähig genug ist, um eine entsprechende Erziehung anzunehmen. Nutzen die Eltern diese Phase aus, ist die Erziehung in der Regel erfolgreich. Wie Chin und Boucke bemerkten: »Die westliche Welt wurde indoktriniert, jede Form früher Toilettenerziehung abzulehnen ... aber Millionen glückliche Kinder in China können nicht irren!«

EIN KLEINES MENSCHENBABY kann sich am Körper der Mutter nicht festklammern, außerdem ist das Herunterschlucken der Exkreme nicht mehr im mütterlichen Wohlfühlpaket enthalten. Aber das tief verwurzelte Erbe der Primaten besteht weiterhin, und die Babys werden herumgetragen. Der enge körperliche Kontakt zwischen Mutter und Kind ist zudem für die gesunde Entwicklung von entscheidender Bedeutung. Er gewährleistet nicht nur Wärme und Sicherheit, sondern ist auch für die Bindung zwischen Mutter und Kind ungemein wichtig. Moderne Entbindungsstationen tragen dem stillschweigend Rechnung. Nach der Geburt wird das neugeborene Baby so schnell wie möglich der Mutter übergeben, damit sie es lieblosen kann, anstatt es wie früher zu isolieren.

Menschliche Babys sind wie die Jungtiere anderer Primatenarten auf diesen intensiven körperlichen Kontakt vorprogrammiert. Blicke der Kontakt aus, wäre das ein großer Schock für das Gesamtsystem. Würde man ein Baby einen Großteil des Tages und die ganze Nacht über in seiner Krippe lassen — und das noch in einem anderen Zimmer — wäre das eine radikale Abweichung von einem grundlegenden Muster der Primaten, das eine 80 Millionen alte Geschichte hinter sich hat.

ABER WAS GESCHIEHT, WENN ETWAS SCHIEFLÄUFT? Wenn eine Säugetiermutter nicht richtig säugt, geraten das Überleben der Jungtiere und damit der Fortpflanzungserfolg in Gefahr. Man könnte meinen, dass die natürliche Selektion jede Anpassung begünstigen sollte, die eine erfolgrei-

che Aufzucht des Nachwuchses fördert. Nur logisch erscheint auch, dass jede Mutter, nachdem sie in ihre Schwangerschaft viel investiert hat, ihren Nachwuchs nach der Geburt hegen und pflegen wird. Ganz so einfach ist die Sache aber nicht. Unter gewissen Bedingungen kommt es vor, dass Säugtiermütter den Verlust begrenzen. In einigen Extremfällen fressen Mütter ihre Jungtiere gleich nach der Geburt auf. Dieses Verhalten kommt verhältnismäßig häufig bei Säugetieren wie Nagetieren und Spitzhörnchen vor, die nesthockende Jungtiere gebären, die bei der Geburt klein und schwach entwickelt sind. Kleine Kinder sind oft entsetzt und traumatisiert, wenn ein knuddeliger Hamster einen Wurf Jungtiere auf die Welt bringt und sie prompt frisst. Das ist aber die natürliche Reaktion der Mutter auf ungünstige Bedingungen.

Während des Säugens ist die tägliche Investition mütterlicher Ressourcen noch höher als während der Schwangerschaft. Deshalb ist es gut möglich, dass es sich um eine Energiesparmaßnahme handelt, wenn Jungtiere unter ungünstigen Bedingungen nicht großgezogen werden. Womöglich ist es vorteilhafter, einen Wurf aufzugeben und die Ressourcen für spätere Jungtiere zu sparen, die unter günstigeren Bedingungen geboren werden. Aus dieser Perspektive kann das Verschlingen der Jungtiere als eine schaurige Form der Wiederverwertung betrachtet werden. Dieses Verhalten ist extrem selten oder kommt gar nicht bei Säugetieren vor — einschließlich der Primaten — die gut entwickelte »nestflüchtende« Jungtiere gebären. Es kommt vor, dass Mütter ihre nestflüchtenden Babys verlassen oder sogar töten, aber sie verschlingen sie fast nie. Vielleicht ist die mütterliche Investition bei nestflüchtenden Säugetieren während einer langen Schwangerschaft einfach zu groß, als dass das Verschlingen der Jungtiere als Energiesparmaßnahme in Frage käme. Wenn das zutrifft, würde man erwarten, dass die Mütter nestflüchtender Jungtiere zu Anpassungen fähig sein sollten, die deren Überleben auch unter ungünstigen Bedingungen ermöglichen. Das ist in der Tat der Fall.

Unter ungünstigen Bedingungen kann es beim Säugen große Probleme geben. Viele Studien zeigten, dass Stress, der durch negative Faktoren in der Umgebung ausgelöst wird, die Fähigkeit zu säugen stark beeinträchtigt. Dafür liefern Spitzhörnchen ein anschauliches Beispiel. Sie sind in freier Wildbahn monogam und gedeihen in Gefangenschaft nur, wenn sie in Paaren gehalten werden. Werden zwei oder mehr gleichgeschlechtliche ausgewach-

sene Tiere im selben Käfig gehalten, entstehen durch sozialen Stress Probleme. Der Verhaltensforscher Dietrich von Holst untersuchte genau diese Begebenheit. Zufälligerweise sind Spitzhörnchen für diese Art der Forschung besonders geeignet: Nehmen die Stresshormone im Blut zu, zeigt sich dies durch ein verstärktes Aufstellen der Schwanzhaare. Mit entsprechenden Beobachtungen kann man auf diese Art indirekt einschätzen, wie sehr ein Spitzhörnchen unter Stress steht. Mit dieser störungsfreien Methode konnte von Holst nachweisen, dass das Säugen die erste Komponente der weiblichen Fortpflanzungsbiologie ist, die bei Spitzhörnchen durch Stress gestört wird. Mit zunehmender Stressbelastung kommt es dann zum Aufessen der Jungtiere, gescheiterten Trächtigkeiten und schließlich einem vollständigen Funktionsverlust der Eierstöcke.

Wie ich während meiner Forschung an einer Zuchtkolonie von Spitzhörnchen am University College London zufällig entdeckte, kann bei diesen Säugetieren gelegentlicher Stress auch das Säugen beeinträchtigen, ohne es völlig zu unterdrücken. Spitzhörnchenbabys sind ideal geeignet, um die Milchaufnahme zu untersuchen, weil die Mutter sie nur einmal alle zwei Tage zum Säugen besucht. Ich fing deshalb an, die Milchmengen zu messen, die von den Spitzhörnchenbabys geschluckt wurden, indem ich sie vor und nach jedem Besuch der Mutter wog. Alles verlief plangemäß, bis ich bei der Kontrolle eines Wurfes etwas Merkwürdiges feststellte. Der regelmäßige 48-stündige Säugezyklus wurde zweimal mit einem Abstand von einer Woche unterbrochen. In diesen Fällen besuchte die Mutter das Nest zwar häufiger als gewöhnlich, aber da die Babys unterm Strich in 48 Stunden weniger Milch zu sich nahmen, hatten sie am Ende deutliches Untergewicht.

Besorgt fragte ich den Betreuer der Tierhaltung, ob er etwas Außergewöhnliches bemerkt hätte. Seine Hauptaufgabe war die Aufzucht von Mäusen und Ratten, daher wollte ich wissen, ob es bei den anderen Tieren auch merkwürdige Vorkommnisse gegeben hatte. Seine Augen leuchteten auf, als er mir die Sachlage schilderte. Schon in der Vergangenheit hatte er bemerkt, dass Tests des Feueralarms — weißes Rauschen, das eine ganze Minute lang von einer großen Glocke erzeugt wurde — die Mäuse und Ratten durcheinander brachte. Aus diesem Grund hatte er eine Vereinbarung mit dem Sicherheitsbeauftragten getroffen, dass er vor jedem geplanten Test informiert werden sollte, um rechtzeitig die Metallabdeckung von der Alarmanlage zu nehmen. Ein eifriger neuer Sicherheitsbeauftragter hatte die

Alarmanlage jedoch ohne die übliche Vorwarnung getestet. Und um sicher zu gehen, hatte er die Anlage eine Woche später erneut getestet. Der Zeitpunkt der beiden Tests passte genau zu den Störungen beim Säugen, die ich bei meinen Spitzhörnchen festgestellt hatte. Der Betreuer der Tiere zeigte mir dann die Zuchtprotokolle der Mäuse und Ratten für denselben Zeitraum. Tatsächlich ging die Anzahl registrierter Jungtiere deutlich zurück, wenn die Alarmanlage getestet wurde. Wahrscheinlich wurden zwar gleich viele Jungtiere wie sonst geboren, aber viele starben oder wurden gefressen. Offenbar kann plötzlich auftretender Stress wie ein unerwartetes lautes Geräusch sogar bei Labornagetieren, die schon lange domestiziert sind, die Zucht stören.

Primaten mit ihren gut entwickelten nestflüchtenden Jungtieren reagieren ähnlich auf Stress, allerdings mit einigen wichtigen Unterschieden. In Gefangenschaft ziehen Primatenmütter ihre Babys bisweilen nicht auf. Zumindest teilweise ist daran Milchmangel Schuld. Sofern sie nicht rechtzeitig in die Handaufzucht genommen werden, siechen die Jungtiere einfach dahin.

Während seiner Forschungszeit als mein Doktorand in London untersuchte der Fortpflanzungsbiologe Christopher Pryce das Verhalten der Mütter von Rotbauchtamarinen — kleinen Neuweltaffen aus dem Amazonasgebiet, die normalerweise Zwillinge zur Welt bringen. Wie bei Primatenkolonien üblich zogen einige Mütter ihre Jungtiere auf und andere nicht. Im Verlauf seiner Forschungen entdeckte Pryce einen hormonellen Unterschied zwischen erfolgreichen und erfolglosen Müttern. Überraschend dabei war, dass dieser Unterschied bereits zur Mitte der Tragzeit erkennbar war. Anders gesagt, konnte man durch Hormonbestimmungen schon mitten in der Schwangerschaft zuverlässig voraussagen, ob eine Mutter ihre Jungtiere nach der Geburt aufziehen würde oder nicht. Dieser Befund war einer der ersten klaren Hinweise, dass die Störung des mütterlichen Verhaltens bei Primaten eine hormonelle Basis haben kann.

Weil dies auch für die menschliche Fortpflanzung wichtig sein kann, müssen Forscher unbedingt wissen, ob das Verhalten der Mütter bei den Primaten durch Hormone beeinflusst wird. Häufig wird angenommen, dass es — zumindest bei Affen, Menschenaffen und Menschen — weitgehend, wenn nicht sogar ausschließlich von Lernprozessen abhängt. Einige Zoos zeigten beispielsweise in den Käfigen von Schimpansen und Gorillas Video-

aufnahmen von Müttern, die Babys säugen, und hegten dabei die optimistische Hoffnung, die zuschauenden Primaten würden lernen, wie sie ihre Babys richtig aufziehen. Solche Maßnahmen entstammen der üblichen Vorstellung, dass eine mangelhafte Aufzucht des Nachwuchses durch die Mutter im Allgemeinen sozialen Einflüssen zuzuschreiben wäre. Versagt eine Primatenmutter, wird selten Stress als möglicher Faktor berücksichtigt.

Für die weit verbreitete Meinung, dass das Verhalten der Mütter bei Primaten von Lernprozessen abhängt, gibt es eine einfache Erklärung. Sie hat mit der bekannten Tatsache zu tun, dass sich das mütterliche Verhalten bei späteren Geburten — besonders nach Erstgeburten — oft verbessert. Für Primaten gilt allgemein als Regel, dass Mütter, die schon eine Geburt hinter sich haben (multipare Mütter), erfolgreicher sind als Mütter, die zum ersten Mal gebären (primipare Mütter). In der Regel werden die Verbesserungen Lernprozessen zugeschrieben, aber andere Erklärungen sind auch möglich. Zum Beispiel kann man davon ausgehen, dass eine Erstgeburt für jedes Weibchen besonders stressig ist und die physiologischen Mechanismen eine gewisse Abstimmung benötigen. Vom evolutionären Standpunkt aus ist es kaum wahrscheinlich, dass das Verhalten der Mutter, das für den Fortpflanzungserfolg entscheidend ist, ausschließlich von Lernerfolgen abhängt und es keine physiologische Absicherung gibt.

AB 1957 FÜHRTE DER PSYCHOLOGE HARRY HARLOW an der University of Wisconsin-Madison eine Reihe von umstrittenen Experimenten mit Rhesusaffen durch. Die Ergebnisse dieser Versuche, die von Deborah Blum in *Love at Goon Park* ausgezeichnet besprochen wurden, beeinflussten die Deutungen des Verhaltens von Müttern bei den Primaten dramatisch. Die Forscher aus Harlows Arbeitsgruppe nahmen den Affenmüttern ihre neugeborenen Jungen weg, um die Auswirkungen des mütterlichen Entzugs zu studieren. Harlow entwickelte rudimentäre »Attrappen-Mütter«, an denen sich die Jungtiere festklammern konnten. In einem berühmten Experiment setzte er ein neugeborenes Baby getrennt von seiner Mutter in einen Käfig, wo ihm die Wahl zwischen zwei Attrappen angeboten wurde: einem kahlen Drahtgestell oder einem ähnlichen Gestell, das mit einem Tuch bedeckt war. Anschließend wurde eine Flasche mit Milch zufällig an einem der beiden Gestelle befestigt. Die Babys klammerten sich meist unabhängig davon, wo

sich die Flasche befand, an das mit Tuch bedeckte Gestell. War die Flasche am kahlen Drahtgestell befestigt, hielt sich das Baby nur kurz dort auf, um trinken zu können. Und wenn ein Baby Angst hatte, zog es sich auch dann immer zum mit Tuch bedeckten Gestell zurück, wenn die Milchflasche am kahlen Drahtgestell befestigt war.

Harlow kam zu dem Schluss, dass ein mit Tuch bedecktes Gestell isolierten Babys zwar Geborgenheit bot, aber gewiss nicht genug für eine normale Entwicklung. Babys, die nur Zugang zu einem einfachen Drahtgestell hatten, hatten Probleme bei der Verdauung der Milch und litten häufiger unter Durchfall. Wurden sie später mit anderen Affen zusammengeführt, erwiesen sich die mit Attrappen aufgezogenen Tiere als soziale Außenseiter. Sie zogen sich zurück, waren unsozial, schaukelten apathisch hin und her und schlugen wiederholt mit ihren Köpfen zu. Als Folge waren Affen, die ohne Mutter aufgewachsen waren, nach der Geschlechtsreife nicht in der Lage, sich normal zu paaren. An dieser Stelle griff Harlow ein. Mit einem speziellen Apparat, den er gefühllos als »Vergewaltigungs-Gestell« bezeichnete, setzte er erwachsene Weibchen erzwungener Paarung aus. Führt dieses Verfahren zur Schwangerschaft und Geburt, vernachlässigten die mutterlosen Mütter ihre Babys oder missbrauchten sie sogar. Aus diesem Verhalten schloss Harlow, dass die fehlende Bindung zur eigenen Mutter diese Weibchen abhielt, mit ihren Babys normal umzugehen. Sie gingen keine Mutter-Kind-Bindung ein, und die Aufzucht ihrer Jungtiere war gestört. In einigen Fällen stellte sich eine gewisse Verbesserung ein, nachdem die Mutter mit mehreren Babys Erfahrungen gesammelt hatte. Harlows Experimente und Schlussfolgerungen ernteten viel Kritik. Weitgehend akzeptiert wurde aber, dass ein weibliches Jungtier richtig bemuttert werden muss, um später selbst eine gute Mutter werden zu können.

In einem Artikel aus dem Jahr 1992 kam die Primatologin Maribeth Champoux auf das Thema der mutterlosen Mütter bei Rhesusaffen zurück. Sie lieferte eine andere Erklärung für die Probleme, von denen Harlow berichtet hatte. Sie argumentierte, dass das mangelhafte Verhalten einer Mutter auch durch die Folgen sozialer Isolation während der Kindheit und nicht nur durch mangelhafte Mutterliebe ausgelöst werden könnte. Auch bei normal aufgewachsenen weiblichen Rhesusaffen variiert die Art, wie sich Mütter verhalten, stark. Außerdem sind mutterlose Weibchen durchaus zu angemessener Säuglingspflege fähig, wenn sie Erfahrungen sammeln konnten.

Champoux verglich normale Jungtiere, die von der Mutter aufgezogen wurden, mit Jungtieren, die nach einer Trennung von der Mutter in Gruppen aufwuchsen (in einer Gemeinschaft aufgewachsene), und Jungtieren, die völlig isoliert aufwuchsen (isoliert aufgewachsene). Mütter, die in einer Gemeinschaft aufgewachsen waren, hatten zwar weniger Kontakt mit ihren Babys als die Weibchen, die von der Mutter aufgezogen wurden, aber die isoliert aufgewachsenen Mütter stießen ihre Babys deutlich stärker ab. Die extremen Auswirkungen vollständiger Isolierung werden also etwas gemildert, wenn ein Jungtier nach der Trennung von der Mutter mit anderen mutterlosen Babys zusammenlebt.

In den 1980er Jahren lernte ich zufällig die begeisterte Wildtieranhängerin Peggy O'Neill kennen, als sie an einem Sommerkurs teilnahm, den ich am *Durrell Wildlife Conservation Trust* mitorganisiert hatte. Peggy hatte die überlebenden Rhesusaffen aus der experimentellen Kolonie von Harlow geerbt, und es war ihr gelungen, sie in einem riesigen Außengehege in eine freilaufende Gruppe zu verwandeln, der es gut ging. Unter diesen neuen Bedingungen überwand die mutterlosen Mütter viele ihrer vorherigen sozialen Mängel. Wie sich herausstellte, waren die Weibchen, durchaus in der Lage, ziemlich kompetente Mütter zu sein. Mir wurde klar, dass es unter den richtigen Bedingungen möglich ist, zumindest einige Mängel zu beheben, die durch den Stress der frühkindlichen Isolation verursacht wurden.

MEINE EIGENEN BEOBACHTUNGEN im Laufe der Jahre haben mich zu der Überzeugung gebracht, dass mangelhaftes mütterliches Verhalten bei Affen und Menschenaffen mehr mit Stress als mit fehlenden Lernprozessen zu tun hat. In den 1980er Jahren ergaben Umfragen zu großen Menschenaffen in Gefangenschaft — also Schimpansen, Gorillas und Orang-Utans — dass lediglich die Hälfte der geborenen Babys erfolgreich von ihren Müttern aufgezogen wurde. Aus diesem Grund wurden viele Babys von ihren Müttern getrennt und von Hand aufgezogen. Dies ist immer noch eines der Hauptprobleme bei der Zucht von großen Menschenaffen in Zoos und anderen Anstalten. Die traditionelle Erklärung lautete, dass die großen Menschenaffen häufig als Jungtiere gefangen oder isoliert und unter ungeeigneten Sozialbedingungen aufgezogen wurden. Als Folge, hieß es, hätten sie nie die Fähigkeiten erlernt, die für eine erfolgreiche Mutterschaft erforderlich

sind. In diesem Szenario führen die Trennung von der Mutter und die anschließende Handaufzucht der Babys zu einem Teufelskreis, bei dem das schlechte Verhalten der Mütter von einer Generation zur nächsten weitergegeben wird.

Einige große Menschenaffen, die von Hand aufgezogen wurden, verhielten sich bei der Aufzucht ihrer eigenen Babys aber einwandfrei. Offensichtlich muss man nicht unbedingt in einer sozialen Gruppe aufwachsen, um eine gute Mutter zu werden. In mir wuchs der Verdacht, dass der Stress, der durch das Leben in engen und schlecht ausgestatteten Käfigen entsteht, eine Rolle für das mangelhafte Verhalten als Mutter spielen könnte. Dieser Verdacht verstärkte sich bei meinen langjährigen Studien der Fortpflanzung von Gorillas am *Durrell Wildlife Conservation Trust*, als ich eine interessante Entwicklung beobachten konnte. Zwei Zuchtweibchen, die mit einem erwachsenen Männchen im selben Käfig zusammenlebten, hatten jeweils drei Schwangerschaften hinter sich. Nach jeder Geburt wurde das Baby innerhalb weniger Tage aus dem Käfig genommen, weil die Mutter sich nicht richtig darum kümmerte. Später wurde diese Gruppe von Gorillas aus dem ziemlich engen Käfig in ein umfangreiches Gebäude mit einem großen, gut ausgestatteten Außengehege umgesiedelt, das dem neuesten Stand der Technik entsprach. Kurz danach brachten beide Zuchtweibchen wieder Babys zur Welt. Von Beginn an zogen die Mütter ihre Babys richtig auf. Keines der beiden Weibchen hatte vor der neuen Einrichtung je die Gelegenheit gehabt, das angemessene Verhalten als Mutter zu lernen. Was war geschehen? Es ist überaus wahrscheinlich, dass der ursprüngliche enge Käfig zu Stress führte, und die geräumige neue Behausung diesen und entsprechende hormonelle Auswirkungen reduzierte.

Nach dieser Entdeckung hegte ich jahrelang den Wunsch, mit Forschungen die hormonellen Veränderungen von Gorillas am Ende der Schwangerschaft und in den ersten Wochen nach der Geburt zu untersuchen. Mein Ziel war herauszufinden, ob es zwischen guten und schlechten Müttern nachweisbare hormonelle Unterschiede gibt. Meine Doktorandin Nina Bahr führte an der Universität Zürich ein Forschungsprojekt durch, das dieses Ziel letztlich erreichte. Mehrere Wochen vor und nach der Geburt sammelte sie fleißig Harn- und Kotproben von neun weiblichen Gorillas, die in Gefangenschaft lebten. Anschließend suchte sie nach Verbindungen zwischen den hormonellen Mustern und der Aufzucht der Babys. Sie fand heraus, dass die

Qualität des Verhaltens als Mutter tatsächlich mit dem Vorkommen der Steroidhormone Östrogen und Progesteron und des Stressindikators Cortisol zusammenhängt. Es ist noch viel Arbeit erforderlich, um sicher festzustellen, ob tatsächlich ein Kausalzusammenhang zwischen Stress, Hormonen und dem mütterlichen Verhalten bei großen Menschenaffen besteht. Diese Hypothese aber scheint mindestens genauso wahrscheinlich zu sein wie die traditionelle Vorstellung, dass der Antrieb für ein richtiges Verhalten als Mutter hauptsächlich oder ausschließlich durch soziales Lernen erfolgt.

Andere Untersuchungen am Menschen wie die der Psychologin Alison Fleming und ihren Kollegen aus dem Jahr 1997 stellten ähnliche Zusammenhänge zwischen den Hormonen und dem Verhältnis von Mutter und Baby fest. Die von Fleming geleitete Forschungsgruppe hatte zwei Ziele: Zum einem wollten sie mit einem Fragebogen herausfinden, ob sich gegen Ende der Schwangerschaft etwas an den mütterlichen Gefühlen ändert, wie dies für andere Säugetiere berichtet wurde, und andererseits ermitteln, ob es einen Zusammenhang zwischen hormonellen Veränderungen und Veränderungen der mütterlichen Gefühle und Einstellungen gibt. Bei diesem Teil der Untersuchung führte Fleming auch Messungen verschiedener Steroidhormone durch. Die fürsorglichen Gefühle nahmen während der Schwangerschaft zu und wurden nach der Geburt noch stärker. Die Untersuchung zeigte auch, dass das Gefühl der Zuneigung mit der proportionalen Veränderung von Östradiol und Progesteron zwischen früher und später Schwangerschaft zusammenhängt. Fleming notierte, dass jeder Zusammenhang zwischen Hormonen und Zuneigung auf zwei Weisen erklärt werden kann: durch einen direkten Einfluss auf die fürsorglichen Gefühle oder durch indirekte Auswirkungen eines generellen Wohlbefindens. Auch in diesem Fall sind noch weitere Forschungen notwendig, um herauszufinden, ob ein direkter Kausalzusammenhang existiert.

* * *

FRAUEN SIND OFT UNANGENEHM ÜBERRASCHT, wenn sie nach der Entbindung eine emotionale Enttäuschung erleben. Zum Glück handelt es sich meist nur um einen milden und kurzfristigen »Babyblues«, also ein Stimmungstief nach der Geburt, von dem mehr als die Hälfte aller Mütter

betroffen sind, die zum ersten Mal ein Kind bekommen. Einige Frauen aber leiden an einer dauerhaften Wochenbettdepression, die so schwerwiegend ist, dass sie medizinische Betreuung benötigen. Meist treten die Symptome kurz nach der Geburt auf, manchmal aber auch erst Monate später. Zu den Symptomen zählen neben Müdigkeit und Schlafstörungen auch unerklärliche Trauer, Weinkrämpfe, sozialer Rückzug, Appetitlosigkeit, Ängstlichkeit und Reizbarkeit. Die Wochenbettdepression ist ein schlimmer Zustand, der viel zu häufig auftritt. Obwohl diese Krankheit bereits in den 1850er Jahren offiziell als medizinisches Leiden anerkannt wurde, wurden erst in den letzten zwanzig Jahren genauere Untersuchungen durchgeführt. In der industrialisierten Welt wird jede siebte Mutter, die ihr erstes Kind bekommen hat, davon heimgesucht. Zu allem Überfluss haben die Mütter häufig Schuld- und Schamgefühle, die manchmal sogar zu Selbstmordgedanken führen. Unnötige Schamgefühle halten sie oftmals davon ab, sich die professionelle Hilfe zu suchen, die sie dringend nötig hätten.

»Es war einmal ein kleines Mädchen, das träumte davon, Mama zu werden. Ihr größter Wunsch war, ein Kind zu bekommen ... Eines Tages wurde sie tatsächlich schwanger. Sie war extrem begeistert. Sie erlebte eine wunderbare Schwangerschaft und gebar ein perfektes Mädchen. Endlich war ihr Traum vom Muttersein in Erfüllung gegangen. Doch anstatt erleichtert und glücklich zu sein, heulte sie die ganze Zeit.« So beginnt Brooke Shields die offene und sehr persönliche Darstellung ihrer Wochenbettdepression in ihrem Buch *Down Came the Rain* aus dem Jahr 2005. Mutig ging sie an die Öffentlichkeit, um andere vor dem Zustand zu warnen, der jede Frau befallen kann.

Es gibt eine lange Liste von Risikofaktoren, die laut verschiedenen Studien in Zusammenhang mit der Wochenbettdepression stehen. Dazu zählen Armut, schlechte soziale Unterstützung, eine depressive Vorgeschichte, eine problematische Partnerschaft oder ein alleinerziehender Status, eine ungeplante Schwangerschaft, ein geringes Selbstwertgefühl, Komplikationen bei der Geburt, eine Narkose bei der Geburt, Hormonstörungen, schlimme Ereignisse und Rauchen. Auf der Liste steht auch Flaschennahrung statt Stillen.

In einem Artikel aus dem Jahr 2006 führten die Gynäkologin Sarah Breese McCoy und ihre Kollegen einen Vergleich von 81 Frauen, bei denen die Wochenbettdepression diagnostiziert wurde, mit 128 Frauen durch, die

keine Depression hatten. Von den Risikofaktoren, die in Betracht gezogen wurden, hatte Flaschennahrung die stärksten Auswirkungen. Sie ging mit einem signifikant erhöhten Risiko einher, das doppelt so groß war wie bei Frauen, die stillten. Frauen mit einer depressiven Vorgeschichte wiesen ebenfalls ein signifikant höheres, um etwa 90 Prozent gestiegenes Risiko auf, während Rauchen mit einer fast 60-prozentigen Erhöhung des Risikos assoziiert war. Obwohl die Gefahr einer Wochenbettdepression bei Frauen, die ihr Kind mit einem Kaiserschnitt zur Welt gebracht hatten, etwas höher war, war der Unterschied statistisch nicht signifikant. Bei einigen Risikofaktoren waren die Auswirkungen additiv.

Eine von Mohammed Abou-Saleh geleitete medizinische Forschungsgruppe aus den Vereinigten Arabischen Emiraten hatte schon früher einen Zusammenhang zwischen Flaschennahrung, Hormonen und Wochenbettdepression entdeckt. Diese Forschungsgruppe untersuchte 70 Frauen, indem einige Wochen nach der Geburt verschiedene Hormone durch Blutproben kontrolliert wurden. Die Werte von Östrogen, Prolaktin und Cortisol waren im Vergleich zu Kontrollpersonen, die nicht schwanger waren, bei Frauen erhöht, die gerade ein Kind geboren hatten. Aber Frauen, bei denen eine Wochenbettdepression diagnostiziert wurde, wiesen einen signifikant niedrigeren Prolaktinspiegel auf als Mütter, die gerade niedergekommen waren und keine Depression hatten. Frauen, die sechs bis zehn Wochen nach der Geburt eine Depression entwickelten, hatten zudem einen signifikant erhöhten Progesteronspiegel. Mütter, die Flaschennahrung verwendeten, hatten einen niedrigeren Prolaktinspiegel als Frauen, die ihre Babys stillten, und bei Erstgenannten kam eine Wochenbettdepression signifikant öfter vor. Abou-Saleh und seine Kollegen entdeckten auch, dass der Prolaktinspiegel bei Frauen mit einer depressiven Vorgeschichte signifikant niedriger war, und sie anfälliger waren, in eine Wochenbettdepression zu verfallen.

Mittlerweile wird allgemein anerkannt, dass die Wochenbettdepression durch starke hormonelle Veränderungen gegen Ende der Schwangerschaft und nach der Geburt ausgelöst wird. Befunde deuten darauf hin, dass die mütterlichen Gefühle und die Funktionstüchtigkeit von einem ausgewogenen Verhältnis der Hormone — besonders Östrogen, Progesteron und Prolaktin — abhängen. Diese Hormone wurden mit einigem Erfolg bei der Behandlung der Wochenbettdepression verwendet. Erfreulich ist, dass diese

Behandlung als Kombination aus Medikation und Therapie oftmals sehr wirksam ist. Es dauert eine Weile, aber meist erholen sich die behandelten Frauen.

Mein ganzes Wissen, das ich aus Untersuchungen nicht-menschlicher Primaten erworben habe, brachte mich zu der Überzeugung, dass beim Menschen Stress eine Rolle spielt, wenn eine Wochenbettdepression auftritt. Stress stört das hormonelle Gleichgewicht, und das wiederum kann die Physiologie des mütterlichen Verhaltens beeinflussen. Ist dies tatsächlich ein wesentlicher Aspekt, müssen wir unbedingt nach Möglichkeiten suchen, wie wir die Belastung frischgebackener Mütter senken können. Es gibt klare Hinweise, dass die Wochenbettdepression seltener auftritt, wenn eine Mutter ihr Baby stillt, aber Belastung durch Stress kann die Milchproduktion beeinträchtigen. Daher müssen die Probleme auf breiter Front angepackt werden.

STRESS IST NICHT DER EINZIGE FAKTOR, den wir berücksichtigen müssen. Es gibt ein noch eindrucksvolleres Beispiel eines wesentlichen, aber oft vernachlässigten natürlichen Mechanismus, bei dem Stillen eine wichtige Rolle spielt. Durch ein elegantes Rückschlussverfahren kann man den Zusammenhang, der zwischen der Häufigkeit des Stillens und der Fertilität besteht, herstellen. Eine Volksweisheit, die mindestens zu Aristoteles zurückreicht, lehrt uns, dass eine stillende Frau seltener schwanger wird. Diese Erkenntnis weist darauf hin, dass durch Stillen der Eisprung unterdrückt wird. Allerdings sind so viele stillende Frauen schwanger geworden, dass diese Vorstellung oftmals pauschal abgetan wurde. Letztlich brachte wissenschaftliche Detektivarbeit, die vor allem die beiden Fortpflanzungsbiologen Peter Howie und Alan McNeilly leisteten, Klarheit in die Sache. Wie sich herausstellte, unterdrückt Stillen wirksam den Eisprung, aber nur, wenn das Baby rund um die Uhr gestillt wird. Das grundlegende Verhalten, das Kind nach Bedarf säugen zu lassen, ist ein 24-Stunden-Job. Wird ein Menschenbaby nicht gestillt, ist die Unterdrückung des Eisprungs deutlich schwächer ausgeprägt. Kurz gesagt, man muss rund um die Uhr stillen, um den Eisprung nach der Geburt zuverlässig und langfristig zu unterdrücken.

Durch die Möglichkeit, den Eisprung durch Stillen zu unterdrücken, bietet sich eine einfache Methode, um die Fertilität mit dem Ernährungs-

zustand der Mutter in Zusammenhang zu bringen. Ist die Mutter gut ernährt, wird auch ihre Milch verhältnismäßig nahrhaft sein. Das Baby wird beim Stillen recht schnell satt, und es wird wahrscheinlich einige Zeit dauern, bevor es wieder an die Brust möchte. Dagegen ist die Milch einer schlecht ernährten Mutter weniger konzentriert. Aus diesem Grund wird das Baby generell länger an der Brust bleiben und recht schnell wieder hungrig werden. Babys schlecht ernährter Mütter werden also häufiger gestillt als die Babys gut ernährter Mütter. Als Folge wird bei einer schlecht ernährten Mutter, sofern sie rund um die Uhr säugt, der Eisprung nach der Geburt länger unterdrückt als bei einer gut ernährten Mutter. Dies ist ein wirklich eleganter Rückkopplungsmechanismus.

Experimente mit Rotwild, von denen Andrew Loudon und seine Kollegen 1983 berichteten, zeigten ebenfalls die Wirkung eines solchen Verfahrens. Die Hirschkälber werden auf einer nahrhaften Weide weniger häufig gesäugt, und ihre Mütter werden im Vergleich zu Müttern, die auf einer wenig nahrhaften Weide gehalten werden, schneller wieder fruchtbar. Das Stillen menschlicher Babys ist zweifellos ähnlich angepasst. Sofern das Baby sowohl während der Nacht als auch tagsüber gesäugt wird, entsteht eine natürliche empfängnisverhütende Wirkung, die nach der Geburt noch ein Jahr oder sogar noch länger andauern kann. In einem Artikel aus dem Jahr 1976 behauptete der Biologe Roger Short sogar, dass Stillen weltweit mehr Geburten verhindere als alle anderen Formen der Empfängnisverhütung zusammen.

Nachdem ich das Thema der natürlichen Empfängnisverhütung nun bereits angeschnitten habe, ist es an der Zeit, einen Blick auf die verschiedenen Methoden zu werfen, mit denen wir in unsere eigene Fortpflanzung eingreifen. Mit dem breiten Verständnis des biologischen Hintergrunds menschlicher Fortpflanzung, das wir nun haben, können wir uns getrost mit den speziellen Problemen der künstlichen Manipulation auseinandersetzen.

KAPITEL 8

Menschliche Fortpflanzung auf Abwegen

Bewusste Eingriffe in die eigene Fortpflanzung gibt es nur beim Menschen, und sie haben eine Vorgeschichte, die Tausende von Jahren zurückreicht. Im Gegensatz zu den bisherigen Themen dieses Buches gibt es keinen evolutionären Vorläufer der Geburtenkontrolle. Ein Eingriff in die menschliche Vermehrung ist mit Sicherheit nicht natürlich. Wie in vielen anderen Fällen ist es aber sehr wichtig, den natürlichen Hintergrund zu verstehen. Erfolgreiche Eingriffe in unsere Vermehrung erfordern vor allem dann fundierte Kenntnisse der biologischen Vorgänge, wenn negative Nebenwirkungen möglich sind. Außerdem handelt es sich um einen Bereich, in dem sich regelmäßig die Kirchen und die Politik einmischen, um moralische oder legale Grenzen zu setzen und das Vorgehen zu reglementieren. Ethische Argumente zur menschlichen Fortpflanzung haben häufig mit dem zu tun, was angeblich natürlich ist. Aber inwieweit stimmen diese Annahmen mit der biologischen Wirklichkeit überein? Dies ist eine der Hauptfragen, die ich in diesem Kapitel behandeln möchte.

BEI DEN EINFACHSTEN VERHÜTUNGSMETHODEN, die auch als erste angewendet wurden, wird ein Zusammentreffen von Spermia und Ei verhindert. Die grundlegendste Methode überhaupt ist die Abstinenz. Im Gegensatz zur totalen Abstinenz kann man die weniger drastische Variante der partiellen Abstinenz als eine vergleichsweise harmlose, natürliche Methode der Geburtenkontrolle betrachten.

Eine verbreitete Form der Empfängnisverhütung, die weder Abstinenz noch Rückzug erfordert, ist ein physisches Hindernis, das die Spermien abfängt, bevor sie das Ei erreichen können. Gängige Methoden sind die Verwendung eines Kondoms durch den Mann oder die Benutzung eines Diaphragmas, einer kappenförmigen Portiokappe oder eines Verhütungsschwamms, die bei der Frau in die Scheide eingeführt werden. Kondome — eine moderne Version der Taftosen, die Spallanzani bei seinen Froschexperimenten einsetzte — werden seit mindestens vier Jahrhunderten verwendet. Die erste bekannte schriftliche Erwähnung sind die mit einer chemischen Lösung vorbehandelten Leinenhüllen, die der italienische Anatom Gabriele Falloppio Mitte des 16. Jahrhunderts herstellte. (Der Eileiter wird ihm zu Ehren »Fallopische Röhre« genannt.) Das erste Gummikondom wurde 1855 hergestellt, die ersten Latexversionen folgten 1920.

Diese einfachen Methoden, bei denen eine Barriere errichtet wird, weisen aber allesamt zwei Probleme auf: Sie stören die Intimität und weisen eine hohe praktische Fehlerquote auf. In der Regel werden zwei verschiedene Anwendungsweisen genannt. Als *perfekten Gebrauch* bezeichnet man die komplett richtige und konsequente Verwendung einer bestimmten Methode. Der *normale Gebrauch* dagegen ist der umfassende Begriff für die ungeeignete und/oder nicht konsistente Verwendung. Der perfekte Gebrauch ist ein frommer Wunsch, während der normale Gebrauch die Form der Empfängnisverhütung ist, wie sie von Menschen in der Realität genutzt wird. Der Populationsforscher James Trussell und seine Kollegen berichteten 1990, dass die Fehlerquote von Kondomen bei normalem Gebrauch 12 Prozent beträgt. Diaphragmen, Portiokappen oder Schwämme weisen eine Fehlerquote von rund 18 Prozent auf. Bei perfektem Gebrauch wird die Fehlerquote von Kondomen auf drei Prozent und die von Diaphragmen auf sechs Prozent reduziert.

Kondome haben einen Vorteil, der in letzter Zeit extrem an Wichtigkeit zugenommen hat: der Rückgang von Krankheiten, die beim Sex übertragen werden können. Früher war die größte derartige Geißel zweifelsohne Syphilis, doch glücklicherweise ist sie mit der Zeit weniger virulent geworden. Den ersten größeren Ausbruch von Syphilis, der dokumentiert wurde, erlebte Europa in den 1490er Jahren. Die Symptome waren heftig und führten häufig innerhalb weniger Monate zum Tod. Gegenwärtig ist AIDS die prominenteste Krankheit, die beim Sex übertragen wird, und auch bei ihr haben sich Kondome als wirksam zur Reduktion von Ansteckungen erwiesen.

Es gibt eine weitere, spezielle Form der Empfängnisverhütung mit einer Barriere für Frauen, die in die Gebärmutter eingeführt wird — das Intrauterinpressar (IUP). Im Gegensatz zu anderen Barrieremethoden ist die Einführung eines IUP ein heikles Verfahren, das medizinische Hilfe und regelmäßige Kontrolluntersuchungen erfordert. Jeder Fremdkörper in der Gebärmutter löst eine Entzündung aus, womit eine aggressive Umwelt für Spermien geschaffen wird. Dementsprechend besteht die Hauptwirkung eines IUP wahrscheinlich darin, die Befruchtung zu verhindern. Die Fehlerquote beim typischen Gebrauch von modernen IUPS ist verhältnismäßig niedrig und liegt bei einem bis zwei Prozent pro Jahr. In den seltenen Fällen, in denen eine Frau trotzdem schwanger wird, muss das IUP so schnell wie möglich entfernt werden, da ansonsten das Risiko von Fehl- oder Frühgeburten steigt.

EINE VERBREITETE METHODE DER EMPFÄNGNISVERHÜTUNG ist religiösen Widerständen weitgehend entkommen: Abstinenz zu Zeiten, in denen wahrscheinlich der Eisprung stattfindet. Das konkrete Ziel dieser Methode ist die Antizipation des Zeitraums, während dessen eine Frau fruchtbar ist, um dann den Beischlaf auf den verbleibenden »sicheren Zeitraum« zu beschränken. Bei einer derart gezielten Abstinenz werden Spermien und Eiern bewusst vergeudet, aber sie erfordert keine speziellen Vorrichtungen oder Behandlungen und wird deshalb allgemein als eine recht natürliche Form der Verhütung wahrgenommen. In der Tat ist sie die einzige Methode, die für Katholiken als moralisch akzeptabel gilt. Papst Pius XII. erteilte ihr 1951 seinen offiziellen Segen, wonach sie sich in vielen Regionen der Welt zur vorherrschenden Methode entwickelte.

Bei der gezielten Abstinenz wird auf das gebräuchliche »Eieruhr-Modell« des menschlichen Menstrualzyklus vertraut, das in den Kapiteln 1 und 3 diskutiert wurde. Dabei stellt man sich einen monatlichen Zyklus vor, bei dem der Eisprung jeweils in der Mitte zwischen zwei Menstrualblutungen stattfindet. Bis zu den 1920er Jahren wurde aber vielfach davon ausgegangen, dass der Höhepunkt der Fruchtbarkeit mit der Menstruation und nicht mit der Zyklusmitte zusammenfällt. Tatsächlich empfahl man Frauen, den Beischlaf auf die Zyklusmitte zu beschränken, wenn eine Empfängnis vermieden werden sollte. Die Vorstellung, dass der Eisprung in der Zyklusmitte

stattfindet, wurde erstmals in den 1920er Jahren durch den japanischen Geburtshelfer Kyusaku Ogino und den österreichischen Chirurgen und Gynäkologen Hermann Knaus in den Fruchtbarkeitskalender integriert. Danach wurde die auf ihren Ideen basierende Geburtenkontrolle als Ogino-Knaus- oder Knaus-Ogino-Methode bekannt, die als Abkürzungen ironischerweise entweder OK oder KO ergeben. 1930 empfahl der Arzt John Smulders — ein Katholik — ausdrücklich Abstinenz in der Zyklusmitte, um eine Empfängnis zu vermeiden. Diese Empfehlung spiegelte die allgemeine Überzeugung wider, dass Spermien nach der Ejakulation lediglich etwa zwei Tage überleben können, während sich ein Ei maximal einen Tag hält.

Die Verhütung mit der Kalendermethode ist auch als Rhythmusmethode bekannt. Diese Bezeichnung stammt wahrscheinlich von Leo Latz, einem Arzt aus Chicago, dessen Klassiker *The Rhythm of Fertility and Sterility in Women* erstmals 1932 veröffentlicht und anschließend 26-mal nachgedruckt wurde. Latz entwickelte Grundregeln, um die fertilen und infertilen Phasen des Menstrualzyklus erkennen zu können. Bei der einfachsten Version soll eine Frau die Zyklustage 12 bis 19 als Zentrum des »Fruchtbarkeitszeitraums« betrachten.

Die Rhythmusmethode mag einen natürlichen Eindruck erwecken, sie weist aber einen grundlegenden Fehler auf. Bei normaler Anwendung ist sie unzuverlässig. Im Laufe eines Jahres wird etwa eine von fünf Frauen, die die Rhythmusmethode verwenden, schwanger. In einer Übersicht über klinische Studien aus dem Jahr 1996 gaben die Fortpflanzungsbiologen Robert Kambic und Virginia Lamprecht eine durchschnittliche Fehlerquote von ungefähr 15 Prozent pro Jahr an. Tatsächlich liegt die Fehlerquote bei normaler Anwendung manchmal sogar bei 25 Prozent, und ist damit kaum besser als der Rückzug. Es überrascht daher kaum, dass diese Methode die abwertende Bezeichnung »Vatikan-Roulette« erhielt.

Auf der Suche nach einer Verbesserung der Erfolgsquote wurde die Rhythmusmethode vor allem durch den Arzt John Billings mehrfach verfeinert. In einem Aufsatz aus dem Jahr 1981 wies er darauf hin, dass vom Gebärmutterhals abgesonderter Schleim den Zeitpunkt des Eisprungs zuverlässig kennzeichne. Folglich kann eine Frau die fertilen und infertilen Phasen jedes Menstrualzyklus erkennen, indem sie die Feuchtigkeit und Glitschigkeit der Vulva und jede sichtbare Schleimabsonderung beobachtet. Die *Billings Ovulation Method* fand, vor allem in Australien, rasch eine be-

trächtliche Gefolgschaft, und die offizielle Webseite verkündet aktuell eine Fehlerquote von lediglich 1,5 Prozent. Hingegen ergab eine zuverlässige Erhebung des Populationsforschers James Trussell im Jahr 2011, dass die Fehlerquote der Ovulationsmethode sogar bei perfekter Anwendung drei Prozent beträgt. Bei allen Methoden mit gezielter Abstinenz betrug die durchschnittliche Fehlerquote bei normaler Anwendung 24 Prozent.

Es gab mehrfach Versuche, die Methode der zeitweiligen Abstinenz weiterzuentwickeln, aber diese Form der Geburtenkontrolle erwies sich hartnäckig als unzuverlässig. Die einfachste Pauschallösung verlangt Abstinenz an konkreten Tagen des Zyklus. Wie wir aber gesehen haben, ist die durchschnittliche Zykluslänge von Frau zu Frau verschieden. Deshalb empfahl Latz, dass jede Frau ihre Menstrualzyklen sorgfältig beobachten solle, um ihren individuellen Grundrhythmus herauszufinden. Die individuelle Festsetzung der Einstellung wird als Kalendermethode bezeichnet.

EINE SINNVOLLE ERGÄNZUNG DER KALENDERMETHODE, die vor etwa einem Jahrhundert entdeckt wurde, ist die Messung der Basaltemperatur (BT), die dem Minimum der Körpertemperatur nach dem Aufwachen entspricht. Nach dem Eisprung steigt die BT in der Regel um etwa $0,5^{\circ}\text{C}$ und bleibt danach bis zum Ende des Zyklus auf diesem erhöhten Niveau.

Leider findet der BT-Anstieg normalerweise ein oder zwei Tage *nach* dem Eisprung statt. Folglich kann er nicht dazu verwendet werden, um den Zeitpunkt des Eisprungs in einem laufenden Zyklus vorauszusagen, sondern man ist immer erst hinterher schlauer. Die Ermittlung des Eisprungs mittels BT ist zudem ziemlich ungenau, da der Unsicherheitsbereich plus/minus drei Tage beträgt, und die Methode manchmal gar nicht funktioniert.

Selbst wenn man bei Methoden mit gezielter Abstinenz viel Sorgfalt walten lässt, kommt es während der festgelegten »sicheren Periode« immer noch zu Schwangerschaften. Ein Grund dafür ist, dass das gebräuchliche Eieruhr-Modell des menschlichen Menstrualzyklus einen Durchschnittswert wiedergibt; es ist eine statistische Abstraktion, aber keine biologische Wirklichkeit.

DRINGENDER IST DIE FRAGE, WIE ES SICH MIT ALTEN GESCHLECHTSZELLEN VERHÄLT. Gemäß dem Eieruhr-Modell kommen Eisprung und Empfängnis normalerweise in der Zyklusmitte vor, während Kopulationen jederzeit stattfinden können. Da die Lebensdauer von Spermien und Eiern beschränkt ist, sollte es demnach nur zur Empfängnis kommen, wenn die Kopulation im Bereich des Eisprungs erfolgt. Falls das Eieruhr-Modell zutrifft, ist es unvermeidlich, dass immer wieder die Gefahr der Befruchtung mit alten Geschlechtszellen auftritt. Wenn es mehr als zwei Tage vor dem Eisprung zur Kopulation kommt, könnte ein Samenfaden, der bereits im Verfallsprozess ist, ein frisches Ei kurz nach der Freisetzung vom Eierstock befruchten. Erfolgt die Kopulation dagegen mehr als einen Tag nach dem Eisprung, könnte ein frischer Samenfaden ein im Verfallsprozess befindliches Ei befruchten, das unterwegs zur Gebärmutter ist. Experimente mit Laborsäugetieren haben gezeigt, dass eine Befruchtung mit verfallenden Eiern oder Spermien zu einer Fehlgeburt oder, bei fortschreitender Schwangerschaft, zu einer fötalen Fehlbildung führen kann. Dennoch hat dieses potentielle Problem bei Wissenschaftlern trotz der wohlbekannten Tatsache, dass Menschen während des ganzen Zyklus Sex haben, überraschend wenig Aufmerksamkeit erregt.

Möglicherweise sind beim Menschen — wie bei Affen und Menschenaffen, die auch während eines längeren Zeitraums im Verlauf des Zyklus kopulieren — die Risiken bei Befruchtungen mit verfallenden Spermien oder Eiern durch eine Sonderanpassung reduziert oder sogar beseitigt. Vielleicht gibt es eine Filtermethode, bei der alte Geschlechtszellen identifiziert und deren Entwicklung zum Stillstand gebracht werden. Alternativ könnte es auch einen Mechanismus geben, der die Entwicklung jedes Embryos blockiert, der aus einer Befruchtung mit einem alten Ei oder Samenfaden hervorgegangen ist. Diese Möglichkeiten wurden aber nie untersucht. Wir wissen einfach nicht, ob es beim Menschen zu Befruchtungen mit alten Geschlechtszellen kommt, und wir haben auch keine Ahnung, welche Ergebnisse wir vermutlich bekämen. Beim aktuellen Stand der Dinge haben wir ein Problem, das einerseits vernachlässigt wurde, vor allem im Hinblick auf die Rhythmusmethode, aber andererseits ernste Konsequenzen haben kann.

Falls die Rhythmusmethode wie geplant funktioniert und die Empfängnis vermieden wird, ist alles schön und gut. Aber wenn sie fehlschlägt und es zu einer ungeplanten Empfängnis kommt, liegt zwischen Kopulation und

Eisprung fast sicher ein längerer Zeitraum. Kommt es nur in einem vermeintlich sicheren Zeitraum zur Kopulation, steigt bei jeder Empfängnis die Wahrscheinlichkeit, dass eine alte Geschlechtszelle daran beteiligt ist. Entweder erfolgt die Befruchtung, wenn ein Samenfaden gerade noch lange genug überlebt, um auf ein eben freigesetztes frisches Ei zu treffen, oder wenn ein Ei gerade noch lange genug überlebt, um einem frisch ejakulierten Samenfaden zu begegnen. In beiden Fällen hinterlässt das Vatikan-Roulette keinen guten Eindruck.

Schwankende Zyklen verringern die Zuverlässigkeit der Rhythmusemethode. Obwohl es Belege gibt, dass der Eisprung meist im Bereich der Zyklusmitte erfolgt, können die Zykluslänge und der zeitliche Ablauf große Unterschiede aufweisen. Durch die Standardmethode, die zum Nachweis von Hormonmustern verwendet wird, entsteht aber die Illusion der Gleichmäßigkeit. Gerade weil die Zyklen bekanntlich sehr unterschiedlich lang sein können, werden die Hormonwerte nicht aufgezeichnet, indem man den Zyklustag nach der Menstrualblutung ausrechnet. Stattdessen werden sie nach dem Zeitpunkt des Eisprungs geordnet, der gewöhnlich durch einen Höchstwert des luteinisierenden Hormons (LH) identifiziert wird. Der Zeitpunkt des Eisprungs wird als Zyklustag 0 definiert, und die anderen Tage werden in beiden Richtungen mit plus oder minus durchnummeriert. Rein optisch entsteht so der Eindruck, der Zeitpunkt des Eisprungs könne recht genau festgelegt werden, doch ist dies im wirklichen Leben gar nicht der Fall.

ES GIBT ABER EIN NOCH GRÖßERES PROBLEM. Wenn Spermien, Eier oder beide länger überleben können, als allgemein anerkannt wird, muss ein Beischlaf, der zur Empfängnis führt, nicht mit dem Zeitpunkt des Eisprungs zusammenzufallen. Es erscheint sehr unwahrscheinlich, dass ein Ei länger als ein Tag überleben kann. Wie in Kapitel 3 erörtert, kommen vereinzelte Kopulationen, die zur Empfängnis führen, häufig während der Follikelphase vor, und nur selten während der Lutealphase. Aus diesem Grund ist wahrscheinlich eine größere Lebensdauer von Spermien größtenteils oder sogar komplett verantwortlich für jeden zeitlichen Unterschied zwischen Eisprung und Kopulation, die zur Empfängnis führt. Können Spermien länger als die allgemein akzeptierten zwei Tage überleben, muss es in der Gebärmutter oder in den Eileitern eine Möglichkeit geben, diese zu spei-

chern. Bekanntermaßen erzeugen blinde, verzweigte Krypten im Gebärmutterhals Schleim, können aber auch als vorübergehenden Zufluchtsort für Hunderttausende von Spermien dienen. Anschließend werden sie während eines Zeitraums von mindestens fünf Tagen allmählich freigelassen. Da die Speicherung der Spermien in den Krypten bislang aber kaum untersucht wurde, sind noch viele Fragen offen. Wir wissen zum Beispiel nicht, ob die Spermien, die nach einem Zeitraum von mehr als ein paar Tagen von den Krypten freigesetzt werden, noch zur Befruchtung fähig sind. Auch die zusätzliche Möglichkeit der kurzfristigen Speicherung von Spermien im Eileiter sollte möglichst gut erforscht werden.

Im Hinblick auf die Rhythmusmethode zur Verhütung ist der Unterschied zwischen dem gebräuchlichen Eieruhr-Modell und einem Alternativmodell, bei dem von einem längeren Überleben der Spermien ausgegangen wird, in einem zentralen Punkt wesentlich. Wenn das gebräuchliche Modell zutrifft, erhöht Abstinenz in der Zyklusmitte vermutlich das Risiko, dass ein alter Samenfaden ein frisches Ei befruchtet. Im Gegensatz dazu würde eine erhöhte Lebensdauer der Spermien dieses Risiko reduzieren oder beseitigen. So oder so muss man bei beiden Modellen mit Problemen rechnen, die durch zu alte Eier entstehen. Abstinenz in der Zyklusmitte erhöht vermutlich unabhängig davon, ob die Spermien frisch sind oder gespeichert wurden, das Risiko, dass ein verfallendes Ei befruchtet wird.

Und damit kommen wir zum entscheidenden Punkt: Man kann davon ausgehen, dass die Rhythmusmethode zu mehr Schwangerschaften mit verfallenden Eiern, und vielleicht auch mit verfallenden Spermien, führen wird. Wenn Spermien im Genitaltrakt der Frau verhältnismäßig lange überleben können, sind die Aussichten in Bezug auf Schwangerschaften mit alten Geschlechtszellen nicht so besorgniserregend. In diesem Fall kann man jede Zunahme auf verfallende Eier beschränken, die lange genug überlebt haben, um durch eine Besamung befruchtet zu werden, mit der der Zeitraum der Fruchtbarkeit eigentlich umgangen werden sollte. Ein Trostpflaster dabei ist, dass ein Samenfaden, der nach einer Kopulation vor dem Eisprung gespeichert wurde, viel eher das Ei nach dessen Freisetzung befruchtet wird, als ein Samenfaden, der von einer Kopulation nach dem Eisprung stammt.

KOMMT ES ZUR BEFRUCHTUNG mit alten Geschlechtszellen kann davon ausgegangen werden, dass die Häufigkeit von Fehlgeburten zunimmt. Konkrete Zahlen zu ermitteln, um diese Annahme zu stützen, ist allerdings schwierig, da Fehlgeburten innerhalb der ersten vier Wochen nach der Empfängnis leicht unbemerkt bleiben können. Eine schwache Blutung kann ohne weiteres als verzögerte oder unregelmäßige Menstruation fehlgedeutet werden. 1970 berichteten die Geburtshelfer Rodrigo Guerrero und Claude Lanctot von einer möglichen Verbindung zwischen verfallenden Geschlechtszellen und Fehlgeburten. Laut einer Schätzung scheitern fast drei Viertel aller menschlichen Schwangerschaften.

Tieruntersuchungen weisen auf eine schwerwiegendere Möglichkeit hin: Eine Abstinenz in der Zyklusmitte erhöht womöglich das Risiko einer Anomalie in der Entwicklung bei menschlichen Schwangerschaften, die bis zur Geburt gelangen. Dieses Phänomen wurde wenig studiert, aber Artikel, die in den 1960er und 1970er Jahren vom Gynäkologen Leslie Iffy veröffentlicht wurden, lieferten hierzu wertvolle Informationen. Angetrieben von seinem Interesse an Anomalien in der menschlichen Schwangerschaft — besonders hinsichtlich der Entwicklung des Fötus an ungeeigneten Orten (ektopische Schwangerschaft) — erforschte Iffy mögliche Zusammenhänge mit dem mutmaßlichen Zeitpunkt der Empfängnis. Da es keine direkten Informationen zum Zeitpunkt der Empfängnis gab, verwendete Iffy Standardtabellen zur Schätzung des Entwicklungsalters neugeborener Babys und rechnete dann rückwärts, um den Zeitpunkt der Empfängnis zu ermitteln. 1963 hielt er fest, dass die vermutlichen Zeitpunkte der Empfängnis von ektopischen Schwangerschaften sich nach der Zyklusmitte und während der Lutealphase häuften. Seine Ergebnisse lieferten aber eine noch größere Überraschung. Mehrere geschätzte Zeitpunkte der Empfängnis fielen in die Lutealphase vor der letzten protokollierten Menstrualblutung. Mit anderen Worten kam es einen Zyklus früher zur Empfängnis, als man vermutet hatte. Vergleichbare Ergebnisse wurden bei anderen Fötalanomalien festgestellt.

In einer weiteren bedeutenden Veröffentlichung von James German wurde auf einen potentiellen Zusammenhang zwischen verzögerter Befruchtung und dem Vorkommen des Down-Syndroms hingewiesen. Allgemein anerkannt ist, dass die Häufigkeit des Down-Syndroms, das mit einer klar definierten chromosomalen Anomalie zusammenhängt, bei Müttern über 35 Jahren zunimmt. Diese Zunahme wird normalerweise der abnehmenden

Qualität der Eier von älteren Frauen zugeschrieben. German machte den interessanten Gegenvorschlag, dass mit zunehmendem Alter seltenerer Geschlechtsverkehr eine Rolle spielen könne. Eine Analyse von Krankenhausdaten bestätigte das prognostizierte Muster.

DER EPIDEMIOLOGE PIET JONGBLOET ERFORSCHTE mögliche Zusammenhänge zwischen gezielter Abstinenz und Entwicklungsfehlern. Er prüfte verschiedene indirekte Verbindungen zwischen missglückter Empfängnisverhütung und der Geburt von Babys mit Anomalien, besonders chromosomalen Aberrationen. Er hielt fest, dass junge katholische Mütter mehr als doppelt so viele Kinder mit Down-Syndrom zur Welt brachten. Eine retrospektive Studie, bei der geistig zurückgebliebene Kinder mit ihren Geschwistern verglichen wurden, ergab zudem, dass es öfter zu Anomalien kam, wenn Eltern, die die Rhythmusmethode anwendeten, ausschließlich nach der Zyklusmitte Sex hatten.

Solche Probleme sind nicht auf Katholiken beschränkt. Die Fortpflanzungsbiologin Teresa Sharav veröffentlichte einen Artikel, in dem sie die Beziehung zwischen alten Geschlechtszellen und der Häufigkeit des Down-Syndroms bei orthodoxen Juden in Jerusalem untersuchte. Orthodoxe Jüdinnen halten sich im Bereich der Fortpflanzung an sehr strenge Regeln: Sie sind von Beginn der Menstruation bis zu dem Zeitpunkt, an dem sie sich sieben Tage nach der letzten Spur von Menstruationsblut bei einem rituellen Bad (*Mikwe*) gereinigt haben, abstinent. Bei einem normalen 28-tägigen Zyklus hieße dies, dass die Abstinenz etwa am zwölften Tag, also ziemlich nahe am Eisprung, beendet würde. Zu einer verspäteten Befruchtung kann es aber kommen, wenn die Menstruation übermäßig lange dauert, die Follikelphase kurz ist oder die Frau den Besuch der *Mikwe* hinauszögert. Dieses Ritual bietet die einmalige Gelegenheit, den Zusammenhang zwischen dem Zeitpunkt der Empfängnis und dem Zeitpunkt der Geburt zu studieren. Sharav fand heraus, dass das Down-Syndrom bei Kindern von Frauen unter 37 Jahren bei orthodoxen Jüdinnen signifikant höher als bei der restlichen Bevölkerung war.

Diese Schlussfolgerung passt gut zu einem Bericht des Fortpflanzungsbiologen Ernest Hook und der Medizinerin Susan Harlap aus dem Jahr 1979. Sie zeigten, dass das Down-Syndrom bei Kindern jüdischer

Mütter aus Asien und Nordafrika im Durchschnitt fast doppelt so oft vorkam wie in der restlichen Welt. Die festgestellten Quoten zählen zu den weltweit höchsten.

VOR ETWAS MEHR ALS FÜNFZIG JAHREN KAM ES BEI DER WEIBLICHEN VERHÜTUNG ZU EINER GROSSEN REVOLUTION. Ausgelöst wurde sie durch die Entwicklung von Hormonpräparaten, die bequem oral eingenommen werden konnten. Tabletten zur Empfängnisverhütung — heutzutage einfach als »die Pille« bekannt — enthalten eine genau bemessene Tagesdosis von Steroidhormonen. In den meisten Präparaten sind progesteron- und östrogenähnliche Substanzen miteinander kombiniert. Schon lange vor der Entwicklung der Pille war bekannt, dass hohe Dosen bestimmter Steroide den Eisprung von Säugetieren blockieren. Diese Hormone stören die natürliche Regelung des Eierstocks, indem sie die Ausschüttung der Hormone FSH und LH von der Hirnanhangdrüse blockieren. Hauptsächlich wirkt sich darin aus, dass keine Follikel mehr entwickelt werden und der Eisprung unterdrückt wird. Die Strategie, sich diesen natürlichen Mechanismus zwecks Verhütung zunutze zu machen, ist wirklich genial. Bei jeder Schwangerschaft verhindern zirkulierende Hormone — besonders Progesteron — den Eisprung. Simuliert man den Hormonspiegel, der die frühe Schwangerschaft kennzeichnet, kann man somit bei einer Frau, die nicht schwanger ist, den Eisprung unterdrücken. Anders gesagt, führt die Antibabypille den Körper der Frau durch eine vorgetäuschte Schwangerschaft in die Irre. Dies ist ein herausragendes Beispiel, wie man einen natürlichen Mechanismus sinnvoll nutzen kann.

Tatsächlich gibt es unter den Pflanzen ein entsprechendes Gegenstück zur Pille. Bei der Untersuchung der Kotproben von zwei Sozialgruppen einer freilebenden Population von Pavianen in Nigeria entdeckten der Biologe James Higham und seine Kollegen deutliche jahreszeitliche Höchstwerte von progesteronähnlichen Nebenprodukten. Nachträgliche Detektivarbeit zeigte, dass beide Sozialgruppen bestimmte Nahrung nur zu den Zeiten zu sich nahmen, an denen diese Nebenprodukte Höchstwerte aufwiesen. Es handelte sich um die pflaumenartigen Früchte und frischen Blätter der afrikanischen Baumart *Vitex doniana*. Labortests bestätigten, dass in dieser Pflanzenart große Mengen von progesteronähnlichen Substanzen enthalten

sind. Die Spitzenwerte dieser Nebenprodukte im Kot der weiblichen Paviane waren in den Phasen, in denen sie die Früchte und Blätter des *Vitex doniana* verzehrten, sogar höher als die Spitzenwerte des echten Progesterons während der Schwangerschaft. Die außergewöhnlich großen Mengen progesteronähnlicher Substanzen in der Nahrung unterdrückten die Sexuelschwellung, die als externer Indikator für einen aktiven Eierstock fungiert. Außerdem kam es in den Zeiten, in denen die Paviane am meisten vom *Vitex doniana* fraßen, zu keinen Empfängnissen. Der Verzehr dieser Pflanze hat anscheinend eine empfängnisverhütende Wirkung, indem wie bei Antibabypillen eine Schwangerschaft simuliert wird.

Solche pflanzliche Verhütungsmittel wurden auch vom Menschen verwendet. Ein naher Verwandter des *Vitex doniana*, der am europäischen Mittelmeer vorkommt, konnte mit erhöhten Mengen von progesteronähnlichen Substanzen im Blut in Verbindung gebracht werden. Die gebräuchlichen Namen für die am Mittelmeer wachsende Art *Vitex agnus-castus* — wie »Keuschbaum« und »Mönchspfeffer« — spiegeln deren Verwendung im Mittelalter wider, um das sexuelle Verlangen Geistlicher einzudämmen. Schon vor Jahrtausenden wurde Mönchspfeffer im antiken Ägypten und Griechenland hauptsächlich zur Behandlung gynäkologischer Störungen verwendet. Eine wichtige Anwendung war die Stimulierung der Menstruation, und wie moderne klinische Studien bewiesen, hat er bei der Behandlung von Menstrualstörungen und Unfruchtbarkeit heilsame Wirkung. Der Medizinhistoriker John Riddle führte Belege an, dass Mönchspfeffer lange auch zur Empfängnisverhütung verwendet wurde. Dioskurides — die führende Autorität für uralte Arzneimittel im ersten Jahrhundert — erwähnte in seiner Abhandlung *De materia medica* (*Arzneimittellehre*), dass Mönchspfeffer »nicht nur die Menstruation erregt, sondern auch die Zeugung verhindert«. Anscheinend stimuliert eine beschränkte Dosis von Mönchspfeffer die Menstruation, während höhere Dosen die Empfängnis blockieren. Hier haben wir also ein frühes pflanzliches Äquivalent der Pille, das in kleinen Dosen dafür sorgte, dass Mönche das Zölibat einhielten. Was könnte natürlicher sein?

Möglicherweise ließen sich die mittelalterlichen Mönche von dem portugiesischen Arzt Pedro Julião inspirieren, der verwirrenderweise als »Peter von Spanien« bekannt wurde. 1272 veröffentlichte er ein sehr bekanntes Buch mit dem Titel *Thesaurus pauperum* (*Schatz der Armen*). Ausgehend von

Mixturen, die das sexuelle Verlangen verringern sollten, lieferte das Buch auch Ratschläge zur Geburtenkontrolle. Julião listete verschiedene Kräuterpräparate auf, darunter auch Mönchspfeffer, die man einnehmen sollte. 1276 wurde dieser frühe Befürworter der pflanzlichen Geburtenkontrolle Papst und nannte sich Johannes XXI. Bedauerlicherweise hatte der einzige Arzt unter den Päpsten sein Amt lediglich acht Monate inne. Er bestand darauf, seine wissenschaftlichen Studien nach seiner Wahl weiterzuführen, und ließ dafür ein spezielles Nebengebäude bauen. Eines Tages brach die Decke zusammen, und er wurde tödlich verletzt.

DIE ERSTEN FELDVERSUCHE MIT ORALER EMPFÄNGNISVERHÜTUNG bei Frauen wurden 1956 in Puerto Rico durchgeführt. Die Version der Pille, die verwendet wurde, enthielt von Djerassi und anderen Chemikern hergestellte Steroide: eine progesteronähnliche Substanz kombiniert mit einem Östrogen. 1960 erteilte die Federal Drug Administration der Vereinigten Staaten die Erstzulassung für die Verwendung der oralen Empfängnisverhütung. Danach wurde die Pille schnell weltweit zu einer begehrten Form der Geburtenkontrolle. Gegenwärtig werden orale Verhütungsmittel von rund 12 Millionen Frauen in den Vereinigten Staaten und global von mehr als 100 Millionen Frauen verwendet. In Großbritannien verwendet aktuell ein Viertel aller Frauen im Alter zwischen 16 und 49 Jahren die Pille. Erhebungen zeigten, dass die Geburtenraten bei Populationen, die die Pille verwenden, um die Hälfte zurückgehen.

Ein unbestrittener Vorteil der Pille als Methode der Geburtenkontrolle ist ihre sehr hohe Zuverlässigkeit. Bei normalem Gebrauch der Pille liegen die jährlichen Schwangerschaftsquoten bei zwei bis acht Prozent, während die Quote bei perfektem Gebrauch weniger als 0,33 Prozent beträgt. Die Methode ist daher zweifellos zuverlässiger als die Barrieremethoden oder alle Formen gezielter Abstinenz. Außerdem sind die Vorteile der Zuverlässigkeit der Pille nicht darauf beschränkt, die Größe der Familie unter Kontrolle zu halten. Ein wichtiger Aspekt ist, dass in jedem Land, in dem die Pille legalisiert wurde, schon bald deutlich mehr Frauen höhere Schulen besuchten und einen Studienabschluss erreichten.

DASS DIE VERWENDUNG DER PILLE MIT GESUNDHEITSRISIKEN verbunden sein könnte, erregte vielfach große Bedenken. Ende der 1960er Jahre erschienen mehrere Berichte, dass es als Folge öfter zu Blutgerinnseln, Schlaganfällen und Herzinfarkten gekommen sei. Dies führte dazu, dass die Anzahl der Frauen, die in den Vereinigten Staaten die Pille verwendeten, zwischen 1975 und 1984 um die Hälfte zurückging. In der Tat scheint es wahrscheinlich, dass Antibabypillen sich nachteilig auf die Blutgerinnung auswirken können. Dies kann zu einer Gerinnung in den Lungen und den Venen führen und dadurch das Risiko für Schlaganfälle und Herzinfarkte steigern. Wegen dieses Risikos wird die Pille generell nicht für Frauen verschrieben, die unter bestehenden Herz-Kreislauf-erkrankungen, einer erblichen Prädisposition zur Bildung von Blutgerinnseln, schwerer Fettleibigkeit und/oder einem hohen Cholesterinspiegel leiden. Die Verwendung der Pille wird auch bei Raucherinnen über 35 Jahren als ungeeignet angesehen.

Wichtig ist, dass die Antibabypille verschiedene Erkrankungen lindert, wie eine unregelmäßige Menstrualblutung, das prämenstruelle Syndrom und Unterleibsentzündungen. Noch wichtiger ist, dass die Wahrscheinlichkeit, später im Leben Eierstock- oder Gebärmutterkrebs zu bekommen, um die Hälfte zurückgeht, wenn eine Frau fünf Jahre lang die Pille nimmt. Und dieser Rückgang des Risikos nimmt zu, wenn die Pille noch länger genommen wird.

Ebenfalls ausgiebig diskutiert wurden mögliche Zusammenhänge zwischen hormongestützter Empfängnisverhütung und dem der Gefahr, an Brustkrebs zu erkranken. Historisch gesehen, zeigte die Forschung komplexe Zusammenhänge und widersprüchliche Ergebnisse. Alle Fragen wurden aber 1996 mit den Ergebnissen einer groß angelegten Neuanalyse der Daten von mehr als 150.000 Frauen aus 54 individuellen Studien geklärt, die von der *Collaborative Group on Hormonal Factors in Breast Cancer* veröffentlicht wurde. Man fand heraus, dass die Wahrscheinlichkeit einer Brustkrebsdiagnose tatsächlich zunimmt, wenn Frauen kombinierte Verhütungspillen einnehmen. Aber der Brustkrebs, der bei Frauen festgestellt wird, die kombinierte Verhütungspillen verwenden oder früher verwendeten, ist klinisch weniger fortgeschritten als der Brustkrebs von Frauen, die nie die Pille verwendet haben. Wahrscheinlich profitieren Frauen, die sich zwecks Geburtenkontrolle gynäkologisch beraten lassen auch davon, dass Tests durchgeführt werden und dadurch Brustkrebs früh erkannt wird.

MIT AUSNAHME DER KONDOME stand die Entwicklung von Methoden zur Empfängnisverhütung bei Männern immer klar im Schatten der weiblichen Methoden. Möglichkeiten zur Entwicklung einer Pille für Männer wurden vielfach diskutiert, aber eine praktisch verwendbare Methode bleibt schwer vorstellbar. In einem Kommentar in der Zeitschrift *Nature* schätzten Carl Djerassi und der Fortpflanzungsphysiologe Stanley Leibo 1994 die Aussichten für die Entwicklung einer Pille für Männer über das Jahr 2010 hinaus als düster ein. Da man zur Entwicklung einer neuen Verhütungspille, für die üblichen Tests und die Genehmigung durch die Behörden 15 bis 20 Jahre braucht, wird sich daran vermutlich auch in den nächsten Jahrzehnten nichts ändern. Kurz gesagt, haben die Feministinnen allen Grund sich darüber zu beschweren, dass die Entwicklung der Empfängnisverhütung sich vorwiegend auf die Frauen konzentriert.

DIE BISHER DISKUTIERTEN METHODEN DER EMPFÄNGNISVERHÜTUNG sind in der Regel reversibel. Aber wer sich entschieden hat, jegliche Aussicht auf künftige Fortpflanzung aufzugeben, kann die Sterilisierung wählen, die praktisch unwiderruflich ist. Bei Männern können die Samenleiter (*Vas deferens*) beider Hoden in einem als Vasektomie bekannten Verfahren durchtrennt werden. Bei Frauen ist das entsprechende Vorgehen die Unterbindung der Eileiter (Tubenligatur).

Bei Männern ist die Vasektomie ein kleiner operativer Eingriff, nach dem sich keine Spermien mehr im Ejakulat befinden. Die Hoden bleiben im Hodensack, wo sie weiterhin Spermien sowie Testosteron und andere männliche Hormone produzieren. Die mit Spermien versetzte Flüssigkeit aus den Hoden beträgt weniger als zehn Prozent eines normalen Ejakulats, daher verringert eine Vasektomie das Volumen des Ejakulats nur geringfügig. Alles andere bleibt weitgehend unberührt. Der Sexualtrieb geht aber bei mindestens einem von zehn vasktomierten Männern zurück, und etwa die gleiche Anzahl von Männern bereut ihre ursprüngliche Entscheidung, den Eingriff überhaupt durchgeführt haben zu lassen. Es ist auf jeden Fall empfehlenswert, vor der Durchführung einer Vasektomie Samenproben zu sammeln und aufzubewahren. Als Methode zur Empfängnisverhütung hat die Vasektomie sehr niedrige Ausfallraten. Schon einige Monate nach ihr sinkt die Wahrscheinlichkeit einer unerwünschten Schwangerschaft auf unter ein

Prozent. Weltweit verlassen sich etwa sechs Prozent der Ehepaare, die Empfängnisverhütung praktizieren, auf diese Methode.

Bei Frauen ist die Tubenligatur eine Form der definitiven Sterilisierung, bei der beide Eileiter durchtrennt, kauterisiert oder geklammert werden. Das Ziel ist, dass ein Ei, das vom Eierstock freigesetzt wird, nicht mehr befruchtet werden kann. Wie bei der Vasektomie ist ein chirurgischer Eingriff notwendig, wobei es auch mehrere Methoden gibt, bei denen dieser durch die Verwendung eines Laparoscops recht gering ausfällt. Die Hormonproduktion, die Menstrualzyklen und das sexuelle Verlangen können durch diesen Eingriff beeinflusst werden. Wie bei der Vasektomie beträgt auch die Ausfallquote der Tubenligatur im ersten Jahr nach dem chirurgischen Eingriff lediglich ein Prozent. Unter Ehepaaren, die sich zu einer Sterilisierung entscheiden, kommt die Tubenligatur weltweit etwa fünfmal so häufig vor wie die Vasektomie.

Die chirurgische Entfernung beider Eierstöcke (Ovariectomie), bei der manchmal auch die Eileiter herausgenommen werden, ist eine drastische Methode der weiblichen Sterilisierung, die nur sehr selten zur Geburtenkontrolle verwendet wird. Die Entfernung der Eierstöcke führt zu großen hormonellen Veränderungen, und die begleitenden Nebenwirkungen sind wie verstärkte Symptome der Menopause.

Auf globaler Ebene zählt die chirurgische Sterilisierung zu den häufigsten Methoden der Geburtenkontrolle. In China ist bei fast 40 Prozent der Ehepaare einer der beiden Partner sterilisiert. Anderswo sind die Raten niedriger. In den Vereinigten Staaten wählt ein Drittel der Paare die weibliche Sterilisierung als Form der Empfängnisverhütung, womit sie die häufigste Methode der Geburtenkontrolle ist.

DIE UNBESTREITBAR EXTREMSTE FORM der definitiven Sterilisierung ist die Kastration. Dieses Wort wird oft nur im Zusammenhang mit männlichen Personen verwendet, da es im Vergleich zur chirurgischen Entfernung der Eierstöcke aus der Bauchhöhle verhältnismäßig einfach ist, die heruntergewanderten Hoden abzuschneiden.

Berichte über männliche Kastration als Akt der Hingabe finden sich unter den frühesten archäologischen Aufzeichnungen menschlicher Religionen. Funde an der neolithischen Stätte von Çatalhöyük im südlichen Anato-

lien weisen darauf hin, dass es vor fast 10.000 Jahren rituelle Selbstkastrationen als Zeichen der Verehrung von Göttinnen gab. Diese Praxis wurde von römischen Gläubigen weitergeführt und dauerte sogar einige Zeit unter den Christen an. Andere Religionen wendeten sich gegen die Kastration. Sie ist im Judentum und im Islam nicht nur bei Menschen, sondern auch bei Tieren offiziell verboten.

Durch eine Kastration nach der Pubertät werden Eunuchen produziert, deren Sexualtrieb normalerweise stark reduziert oder völlig beseitigt wird. Muskelmasse, Muskelkraft und Körperbehaarung können schwinden. Infertile Eunuchen, die als Diener oder Haremswächter beschäftigt werden, sind das bekannteste Beispiel, wie man die männliche Kastration einsetzt, um Ehebruch zu verhindern. Im Altertum wurden Eunuchen sehr oft als Hauspersonal, Höflinge, hochrangige politische Beamte, Militärkommandanten oder sogar Statthalter eingesetzt, weil von ihnen deutlich weniger Widerstand zu erwarten war.

Die verwerflichste Art der Kastration waren zweifelsohne die Eingriffe, die an pubertären Jungen in Europa verübt wurden, um den Stimmbruch zu verhindern. Bei Jungen, die vor der Pubertät kastriert werden, verändert sich der Kehlkopf nicht mehr normal, und sie behalten deshalb neben schwach entwickelten Muskeln und kleinen Geschlechtsteilen eine hohe Stimme. Da Frauen in der römisch-katholischen Kirche ursprünglich nicht in Chören mitsingen durften, wurden Jungen kastriert, um die gewünschte hohe Tonlage zu erhalten. Die ältesten Zeugnisse solcher Kastraten findet man in italienischen Kirchenbüchern aus den 1550er Jahren, und ab 1558 gehörten Kastraten dem Chor der Sixtinischen Kapelle an.

Einer Schätzung zufolge wurden in den 1720er und 1730er Jahren, als diese Mode der künstlichen Erhaltung der Stimme ihren Höhepunkt erreicht hatte, jährlich mehr als 4.000 Jungen kastriert. 1878 schließlich verbot Papst Leo XIII. den Einsatz neuer Kastraten in der römisch-katholischen Kirche, und 1903 gab der neue Papst Pius X. das offizielle Ende dieser Praxis bekannt. Der letzte überlebende Kastrat der Sixtinischen Kapelle, Alessandro Moreschi, starb 1922.

WENDEN WIR UNS JETZT DER ASSISTIERTEN FORTPFLANZUNG ZU, bei der unsere Kenntnisse der biologischen Vorgänge eher zur Förderung der Fortpflanzung als zu ihrer Einschränkung verwendet werden. Ein richtiges Verständnis des menschlichen Menstrualzyklus ist für jede Behandlung der Unfruchtbarkeit unentbehrlich. Die bahnbrechende Erforschung des weiblichen Zyklus durch Hermann Knaus, Kyusaku Ogino und andere legte nicht nur den Grundstein für die Geburtenkontrolle, sondern auch für die assistierte Fortpflanzung. In der Tat entwickelte Ogino seine Methode der Zyklenbeobachtung mit der Absicht, Paaren dabei zu helfen, ihre Chancen für eine Empfängnis zu erhöhen, indem sie den Zeitraum der höchsten Fruchtbarkeit ermitteln konnten. Ogino lehnte die Verwendung seiner Methode für die Geburtenkontrolle mit dem Argument ab, dass ihre Ausfallrate inakzeptabel hoch sei. Er war der Meinung, dass die Förderung der Zyklusbeobachtung als Konkurrenz zu wirksameren Methoden der Empfängnisverhütung zu vielen ungewollten, durch Aborte beendeten Schwangerschaften führen würde. Es ist also gar nicht angebracht, dass die Rhythmusmethode nachträglich als Ogino-Knaus-Methode bekannt wurde.

Unfruchtbarkeit ist ein bedeutendes Problem. Bereits 1985 ging man davon aus, dass allein in den Vereinigten Staaten die jährlichen Kosten für die Behandlung von etwa zwei Millionen infertilen Paaren \$64 Milliarden betragen. Und dabei betrug die Erfolgsrate nur ein Siebtel. Obwohl die Verfahren in den letzten 30 Jahren schrittweise verbessert wurden, sind weiterhin niedrige Erfolgsraten das Problem. Die assistierte Fortpflanzung könnte zweifellos von einem besseren Verständnis der Abläufe der menschlichen Empfängnis profitieren, insbesondere was die Bedeutung alter Geschlechtszellen und der Filtermechanismen, die zu Fehlgeburten führen, betrifft.

DIE EINFACHSTE METHODE DER ASSISTIERTEN FORTPFLANZUNG ist die künstliche Besamung (KB), bei der Samen in den weiblichen Genitaltrakt eingeführt wird, um eine Empfängnis herbeizuführen. Es war Lazzaro Spallanzani, der Erfinder der befruchtungshemmenden Taftosen für Frösche, der Berichten zufolge die erste erfolgreiche künstliche Besamung bei Säugetieren durchführte. 1784 hielt er fest, dass eine künstliche besamte Hündin nach einer normalen zweimonatigen Trächtigkeit drei Welpen geboren hatte. Die künstliche Besamung hat eine lange Vorgeschichte bei

Laboruntersuchungen und in der Tierzucht, wo sie heutzutage vielerorts für selektive Zuchtprogramme verwendet wird. Angeblich wurde sie sogar schon im 14. Jahrhundert in Arabien für die Pferdezucht benutzt, allerdings sind die Anfänge dieser Praxis nicht zuverlässig dokumentiert.

Nach Spallanzani dauerte es dann mehr als ein Jahrhundert, ehe 1897 Berichte erschienen, laut denen die künstliche Besamung erfolgreich bei individuellen Forschungen mit Kaninchen, Hunden und Pferden verwendet wurde. Unter anderen führte der Fortpflanzungsbiologe Walter Heape — der Erfinder des »Oestrus«-Begriffs — Experimente durch, um die Anwendung der künstlichen Besamung weiter zu testen.

1785 gelang dem berühmten schottischen Chirurg John Hunter der entscheidende Durchbruch bei seinen ersten Versuchen mit der künstlichen Besamung des Menschen, als diese zur Geburt eines Babys führten. Wie bei den Haussäugetieren dauerte es aber mehr als ein Jahrhundert, bis sich die regelmäßige Anwendung beim Menschen durchgesetzt hatte. Das moderne Standardverfahren der künstlichen Besamung beim Menschen beruht auf zwei grundlegenden Ansätzen. Beim ersten sammelt man Samenflüssigkeit vom subfertilen männlichen Partner eines Paares, das es bislang nicht geschafft hat, schwanger zu werden. Die Samenflüssigkeit wird auf verschiedene Arten aufgewertet und dann in die Gebärmutter der Frau transferiert (homologe Insemination). Bei der zweiten Form der künstlichen Besamung, die in den Fällen verwendet wird, wenn der männliche Partner effektiv unfruchtbar ist, nimmt man Samenflüssigkeit, die von einem anderen Mann, der nachgewiesen fruchtbar ist, gespendet wurde (heterologe Insemination). Bei beiden Ansätzen kann man die Besamung entweder im Bereich des normalen Eisprungs durchführen oder den Eisprung durch eine hormonelle Behandlung auslösen. Die Tatsache, dass Gynäkologen ein künstliches Herbeiführen des Eisprungs allgemein vorziehen, anstatt sich auf dessen natürliches Vorkommen im Bereich der Zyklusmitte zu verlassen, zeugt von der großen Verschiedenheit der Menstrualzyklen.

KÜNSTLICHE BEFRUCHTUNG KANN EINGESETZT WERDEN, wenn die Hauptursache der Unfruchtbarkeit beim männlichen Partner liegt, was in etwa der Hälfte der Fälle zutrifft. Zur Behandlung weiblicher Unfruchtbarkeit benötigt man aber einen anderen Ansatz. Eine häufige Ursache, die

bei etwa einer von fünf unfruchtbaren Frauen vorkommt, ist eine Blockade der Eileiter. In der Regel haben Frauen mit diesem Leiden normale Zyklen, die von einem Eisprung begleitet werden, aber ein unüberwindliches Hindernis für den Durchgang der Spermien verhindert die Befruchtung. In solchen Fällen ist es heutzutage möglich, Eizellen aus dem Eierstock einer Frau zu entnehmen und diese anschließend *in vitro* (Lateinisch für »im Glas«) heranreifen zu lassen und zu befruchten. Die daraus resultierenden Embryos werden anschließend in die Gebärmutter der Frau eingeführt. Kinder, die als Ergebnis einer In-vitro-Fertilisation (IVF) auf die Welt kommen, werden oft als »Retortenbabys« bezeichnet, obwohl der Vorgang gewöhnlich in einer flachen Petrischale durchgeführt wird.

Selbstverständlich muss der Embryo nach der IVF in den Mutterleib überführt werden. Wieder einmal spielte Walter Heape eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung dieses Verfahrens. 1890 führte er Experimente mit Embryotransfers bei Kaninchen durch. Schließlich war es John Rock, der als Erster ein unversehrtes befruchtetes menschliches Ei barg und der mit Spermien, die er in einem Tiefkühlschrank aufbewahrte, die IVF vornahm. Mehreren Berichten zufolge führte Rock gemeinsam mit Arthur Hertig und Miriam Menkin 1944 in den Vereinigten Staaten die ersten Experimente mit menschlicher IVF durch.

Die erste erfolgreiche Anwendung der IVF mit anschließendem Embryotransfer beim Menschen fand 1977 in England statt, als die dreißigjährige Lesley Brown wegen blockierter Eileiter behandelt wurde. Die Operation wurde vom Gynäkologen Patrick Steptoe und dem Physiologen Robert Edwards durchgeführt, und das Ergebnis war eine Schwangerschaft, die am 25. Juli 1978 zur Geburt von Louise Brown führte. 1981 berichtete Edwards von den raschen Fortschritten, die man bei der IVF samt Embryotransfer in lediglich drei Jahren erzielt hatte. In dieser Phase gelangte man an die Eier, in dem man kurz vor dem Eisprung Follikel vom Eierstock entnahm. In einigen Fällen wurden die Eier gewonnen, indem man den normalen Zyklus der Frau verfolgte, während in anderen eine gezielte Hormonbehandlung durchgeführt wurde. Bei beiden Vorgehensweisen wurde die Entwicklung der Follikel entweder durch die Bestimmung des Östrogenspiegels oder mittels Ultraschall verfolgt. Mit einer gezielten Hormonkur wurde der Eisprung zu gegebener Zeit ausgelöst, indem das menschliche Schwangerschaftshormon HCG injiziert wurde. War die Samenflüssigkeit des männlichen Partners in

einem normalen Zustand, war die Erfolgsrate der IVF ziemlich hoch und lag bei etwa 90 Prozent. In fast allen Fällen war nur ein einziger Samenfaden an der Befruchtung beteiligt. Wie sich aber herausstellte, war das schwierigste und unberechenbarste Stadium des Verfahrens das Einnisten der Keimblase nach dem Embryotransfer. Nur bei einer von fünf Keimblasen, die in die Gebärmutter transferiert wurden, verlief das Einnisten erfolgreich.

2010 berichteten der Fortpflanzungsbiologe Mark Connolly und seine Kollegen, dass zwischen 1978 und 2008 weltweit mehr als 3,5 Millionen Babys durch IVF und ähnliche Methoden der assistierten Fortpflanzung auf die Welt gekommen seien. Als späte Anerkennung dieser bedeutenden Leistung erhielt Edwards 2010 — also etwa 30 Jahre nach seinem ersten Erfolg — den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin.

Die IVF hat aber auch Nachteile. Bei etwa jeder vierten Schwangerschaft kommt es zu einer Mehrgeburt, während dies bei natürlichen Empfängnissen nur in einem von 100 Fällen vorkommt. Außerdem kommen mehr IVF-Babys frühzeitig auf die Welt, und die perinatale Sterblichkeit liegt bei fast zwei Prozent und ist damit doppelt so hoch wie bei Kontrollpersonen. Auch Missbildungen kommen bei IVF-Babys etwas häufiger vor. Es gibt Hinweise, dass es einen Zusammenhang zwischen der IVF mit anschließendem Embryotransfer und einem erhöhtem Geburtsfehlerrisiko gibt. In einer groß angelegten Studie, bei der Darine El-Chaar an der University of Ottawa mehr als 60.000 Geburten untersuchte, wurde festgestellt, dass das Geburtsfehlerrisiko bei IVF-Babys etwa 60 Prozent höher war als bei einer natürlichen Empfängnis. In ähnlicher Weise ergab eine von Jennita Reefhuis durchgeführte Analyse von Daten aus der *National Birth Defects Prevention Study* in den Vereinigten Staaten, dass bestimmte Geburtsfehler signifikant häufiger bei Babys auftreten, die durch eine IVF gezeugt wurden. Die Ursachen des erhöhten Risikos für Geburtsfehler, das mit der IVF zusammenhängt, wurden noch nicht ermittelt. Die Arzneimittel, die zur Auslösung des Eisprungs verwendet werden, sind eine potentielle Ursache, aber einige Studien wiesen darauf hin, dass das höhere Risiko im Grunde nur die Probleme widerspiegelt, die von Anfang an für die Unfruchtbarkeit verantwortlich waren. Der Umgang mit den Eiern und Spermien im Labor könnte eine Rolle spielen, und schließlich könnte es sein, dass bei der IVF teilweise die natürlichen Mechanismen umgangen werden, bei denen normalerweise junge Embryos mit Entwicklungsfehlern herausgefiltert würden.

DER NÄCHSTE SCHRITT IN DER ENTWICKLUNG der IVF war die Aufbewahrung junger menschlicher Embryos in flüssigem Stickstoff, anstatt sie sofort in die Gebärmutter einzuführen. Der Fortpflanzungsbiologe Gerard Zeilmaker und seine Kollegen berichteten 1984 von den ersten erfolgreichen Schwangerschaften, die auf eingefrorene Embryos zurückgingen. Bis 2008 stammten schätzungsweise etwa eine halbe Million IVF-Babys von in flüssigem Stickstoff eingefrorenen menschlichen Embryos, und die Gesamtzahl ist inzwischen auf rund zwei Millionen gestiegen. Werden bei einer IVF mehrere Embryos erzeugt, von denen einige nicht sofort in die Gebärmutter überführt werden, können sich die Patientinnen dafür entscheiden, die zusätzlichen Embryos in flüssigem Stickstoff aufbewahren zu lassen. Man schätzt, dass allein in den Vereinigten Staaten gegenwärtig mehr als eine halbe Million eingefrorene Embryos gelagert werden. Embryos, die von einer Infertilitätsbehandlung stammen, können auch einer anderen Frau gespendet werden, und die Eier und Spermien können für die Zeugung von Embryos verwendet werden, die eingefroren und aufbewahrt und später gespendet werden. Überzählige Embryos im Gefrierschrank werfen aber auch heikle ethische und rechtliche Fragen auf.

Die IVF eröffnete Frauen die Möglichkeit, auch nach den Wechseljahren noch schwanger zu werden. Die Gebärmutter ist durchaus in der Lage, eine Schwangerschaft auch nach der Menopause zu unterstützen, und durch IVF können Frauen über 50 und sogar über 60 noch schwanger werden.

Ein entscheidendes Problem bei der Aufbewahrung eingefrorener Embryos ist die Möglichkeit, dass es zu Zerfallserscheinungen kommen kann. In einer 2010 erschienenen Arbeit prüften der Gynäkologe Ryan Riggs und seine Kollegen, ob die Aufbewahrungsdauer das Überleben der Embryos und den Ausgang der Schwangerschaft nachteilig beeinflusst. Die Autoren analysierten eine Stichprobe von fast 12.000 eingefrorenen menschlichen Embryos aus dem Zeitraum zwischen 1986 und 2007 und fanden heraus, dass die Aufbewahrungsdauer keinen signifikanten Einfluss auf das Überleben nach dem Auftauen hatte. Außerdem hatte die Aufbewahrungsdauer keine signifikante Auswirkung auf klinische Schwangerschaftsraten, Fehlgeburten, das Einnistens der Keimblasen oder Lebendgeburten mit IVF. Das Hauptproblem bei eingefrorenen IVF-Embryos ist das Mehrgeburtenrisiko. Dies ist eine direkte Folge der fragwürdigen Praxis des mehrfachen Embryotransfers, mit dem die Wahrscheinlichkeit einer Schwangerschaft erhöht werden soll.

Wie bei der künstlichen Besamung kann die IVF samt Embryotransfer auf ein Paar beschränkt bleiben oder mit gespendeten Eiern einer anderen Frau durchgeführt werden. Es ist auch möglich, eine In-vitro-Fertilisation mit einem Ei einer Frau durchzuführen, die infertil ist, weil ihre Gebärmutter zum Beispiel nicht funktionsfähig ist, und anschließend das befruchtete Ei zur weiteren Entwicklung in die Gebärmutter einer fertilen Frau zu transferieren. Der erste IVF-Embryotransfer von einer Frau zur anderen, der zu einer Schwangerschaft führte, fand im Juli 1983 statt und endete 1984 mit der ersten derartigen Geburt. Dieses als Leihmutterchaft bekannte Verfahren kommt in verschiedenen Zusammenhängen vor und hat vor allem deshalb Kontroversen verursacht, weil es komplizierte Rechtsfragen auslöst.

DIE ENTWICKLUNG DER IN-VITRO-FERTILISATION machte den Weg für Mikromanipulationen frei, bei denen ein Ei durch Injektion eines einzigen Samenfadens befruchtet wird. 1992 leisteten die Embryologen Paul Devroey und André van Steirteghem Pionierarbeit, indem sie ein Verfahren entwickelten, das heutzutage als Intrazytoplasmatische Spermieninjektion (ICSI) bekannt ist. ICSI wird meist verwendet, um die männliche Unfruchtbarkeit zu beheben, sie wird aber auch in Fällen gebraucht, bei denen Spermien nicht ohne weiteres in das Ei eindringen können. Manchmal wird sie auch verwendet, um bei der In-vitro-Fertilisation sicherzugehen, dies ist vor allem bei Spendersamen der Fall. Die ICSI hat Bedenken erregt, weil mit ihr der natürliche Mechanismus der Spermien Selektion während der Befruchtung umgangen wird. Heute kann man testen, inwieweit reife Spermien mit einem Ei eine Verbindung eingehen können, um diese vorab auf die Tauglichkeit bei einer ICSI zu untersuchen. Trotzdem gibt es zunehmende Hinweise, dass die ICSI, wie die IVF, wenn man ein Ei mit einer Vielzahl von Spermien kombiniert, zu mehr Geburtsfehlern führt. Der erste Bericht dazu wurde 2002 von Michèle Hansen, einer Spezialistin für Gesundheitswesen, veröffentlicht. Hansen und ihre Kollegen kamen zu dem Schluss, dass bei Babys, die durch ICSI gezeugt wurden, das Risiko eines schwerwiegenden Geburtsschadens doppelt so hoch ist wie bei einer natürlichen Empfängnis. Da die IVF aber *per se* zu diesem Ergebnis führt, gibt es keinen Hinweis auf ein zusätzliches Risiko, das mit der direkten Injektion eines einzigen Samen-

fadens zu tun hat. 2004 konnten die Erfinder Devroey und van Steirteghem auf zehn Jahre Erfahrung mit der ICSI zurückblicken. Sie betonten, dass viele Paare dank dieses Verfahrens jetzt ihr eigenes genetisches Kind haben können, anstatt auf die künstliche Besamung mit gespendeter Samenflüssigkeit zurückgreifen zu müssen. Devroey und van Steirteghem bestätigten auch, dass das Risiko einer schwerwiegenden angeborenen Fehlbildung mit ICSI zwar etwas höher ist als bei einer natürlichen Empfängnis, aber nicht höher als bei einer IVF ohne ICSI.

MAN KÖNNTE VERMUTEN, DASS RELIGIÖSE EINWÄNDE vorwiegend oder sogar ausschließlich die Geburtenkontrolle betreffen, und dass Eingriffe, die Schwangerschaften ermöglichen, durchaus begrüßt werden. Wie sich zeigt, stößt aber auch die assistierte Fortpflanzung häufig auf religiöse Tabus, und wieder lautet die Begründung, sie sei »unnatürlich«.

Das Thema Eingriff in die menschliche Fortpflanzung ist voller heikler Fragen. Für die Geburtenkontrolle gibt es auf jeden Fall genauso starke Argumente — vor allem die außer Kontrolle geratene Bevölkerungsexplosion, die uns alle betrifft — wie für die assistierte Fortpflanzung, mit der kinderlosen Paare bei ihrem durchaus verständlichen Kampf, Eltern zu werden, unterstützt werden. Wir haben einen weiten Weg zurückgelegt, seitdem sich unsere Stammlinie von unseren nächsten Verwandten trennte, und wir haben unsere stark vergrößerten Gehirne eingesetzt, um unsere Lebensweise in vielerlei Hinsicht zu verändern. Dabei veränderte sich die Fortpflanzung, wie alle anderen Aspekte der menschlichen Existenz, radikal. Wir können nicht mehr zu den Bedingungen, unter denen unsere einstigen Vorfahren, die Jäger und Sammler, lebten, zurückkehren. Aber wir können zumindest die natürlichen Grundlagen für die menschliche Fortpflanzung erkennen und sicherstellen, dass alle Eingriffe biologisch korrekt sind.

* * *

ES IST AUS MEINER SICHT ANGEBRACHT, DIESES LETZTE KAPITEL mit einigen Bemerkungen über die Zukunft der menschlichen Fortpflanzung abzuschließen, die sich auf evolutionäre Befunde stützen.

Das durchschnittliche menschliche Ejakulat enthält ungefähr 250 Millionen Spermien, von denen nur eines das Ei befruchten kann. Wir wissen immer noch nicht, warum so viele Spermien zur Erfüllung dieser Aufgabe notwendig sind. Mehrere Filter im weiblichen Genitaltrakt sorgen wahrscheinlich dafür, dass die Spermienmenge auf eine Elite von Überlebenden verringert wird, die sich dem Ei nähern dürfen. Mindestens einen dieser Filter kennen wir: Der Schleim im Gebärmutterhals blockiert die Weiterreise missgebildeter Spermien. Wahrscheinlich ist auch, dass die Anbindung der Spermien an die Eileiterwand hochwertige Spermien begünstigt. Ist der Rest der Reise nur zufällig? Dies ist ein weiteres Gebiet, bei dem zusätzliche Forschung dringend erforderlich ist. Angesichts der überzeugenden Belege für sinkende Spermienzahlen ist es zu unserem eigenen Schaden, wenn wir dieses Problem weiter ignorieren.

Das größte Kopfzerbrechen bereitet uns vermutlich die genetische Manipulation und das vorhandene Potenzial, Menschen zu klonen. Gegenwärtig sind in den Vereinigten Staaten und Europa bestimmte Formen der genetischen Manipulation unter strengen Regeln gestattet. Sowohl das direkte Klonen von Individuen als auch der vorsätzliche Eingriff in die Keimbahn — die speziellen Zellen, die Spermien oder Eier produzieren — sind jedoch verboten. Die genetische Manipulation eines Individuums scheint unbedenklich, wenn die Keimbahn auf jeden Fall unangetastet bleibt. Aber gibt es eine Garantie, dass es keine unbeabsichtigten Auswirkungen haben wird, wenn man einem menschlichen Patienten mit einem Träger fremde DNS-Sequenzen einführt? Wird eine DNS unabsichtlich oder bewusst in die menschliche Keimbahn integriert, wird sie danach automatisch von einer Generation zur nächsten weitergegeben. Obwohl viele Länder den vorsätzlichen Eingriff in die Keimbahn und das Klonen verboten haben, ist die Technik für diese Verfahren außerdem leicht zugänglich.

Wie alle anderen Organismen entstanden wir Menschen durch eine Evolution unter natürlichen Bedingungen, und diesen Hintergrund müssen wir erforschen, um uns komplett zu verstehen und unsere Zukunft zu sichern. Obwohl Erfolge bei der Fortpflanzung ein zentraler Aspekt der natürlichen Selektion sind, wurde die Entwicklung der menschlichen Fortpflanzung nur selten eingehend untersucht. Bei der Rekonstruktion der Evolutionsgeschichte unserer eigenen Fortpflanzung stehen wir freilich vor dem Problem, dass Fossilien nur wenige indirekte Hinweise liefern. Wir können

aber viel erreichen, indem wir uns selbst studieren und Vergleiche mit anderen Lebewesen durchführen, und dabei nach allgemeinen Prinzipien suchen, auf deren Basis wir sinnvolle Schlüsse ziehen können. Breit angelegte Vergleiche auf verschiedenen Ebenen des Baums des Lebens sind notwendig, um viele grundlegende Fragen zur Evolution der menschlichen Fortpflanzung zu beantworten. Diese Erkenntnis war während meiner eigenen vierzigjährigen Entdeckungsreise durch die Naturgeschichte unserer Fortpflanzung stets die Triebfeder, die letztlich auch zu diesem Buch führte. Mein Ziel war immer, nach weitergehendem Wissen zu suchen und so viele praktische Schlussfolgerungen wie möglich zu ziehen. Die Entdeckungsreise führte mich von der grundlegenden Biologie der Spermien und Eier zu dem komplizierten Gebiet der Geburtenkontrolle und der assistierten Fortpflanzung. Ich hoffe, dass der Leser die menschliche Fortpflanzung — wie ich — nun in einem neuen Licht sieht.

DANKSAGUNG

Während meiner Entdeckungsreise zu den Spuren der Evolution der menschlichen Fortpflanzung hatte ich viele motivierende und freudvolle Erlebnisse. Unter anderem brachte sie mich dazu, die Zucht verschiedener Primatenarten in Gefangenschaft zu studieren, einige von ihnen unter natürlichen Bedingungen zu beobachten, etliche Museumsexemplare zu untersuchen, zahllose Stunden mit der akribischen Messung winziger Hormonmengen zu verbringen und mich in die Sequenzen des grundlegenden genetischen Materials, die DNS, zu vertiefen. Während des gesamten Unternehmens arbeitete ich zudem eine riesige Menge Fachliteratur durch, um der Lösung des evolutionären Rätsels der menschlichen Fortpflanzung näherzukommen. Das vorhandene Material ist eine Goldgrube und liefert fast immer wertvolle Erkenntnisse. Unterm Strich habe ich mehr als 5.000 wissenschaftliche Artikel und Bücher durchgestöbert, um das Wesentliche für dieses Buch herauszufiltern.

Großen Dank schulde ich vielen Menschen, die für meine Ausbildung und meine Forschungen eine wichtige Rolle spielten. Als Student der Zoologie an der University of Oxford inspirierten mich vor allem die Vorlesungen Niko Tinbergens über das Verhalten der Tiere. Er betonte stets, wie wichtig die natürliche Umgebung für die Deutung der Evolution des Verhaltens ist. Niko entfachte in mir das Feuer für meine späteren Forschungen. Mein zunehmendes Interesse an der Verhaltensforschung schürte auch Richard Dawkins, der im Rahmen seiner Doktorarbeit gerade mit seinen eigenen Untersuchungen in Oxford angefangen hatte. Er unterstützte und ermutigte mich während eines Praktikums, bei dem ich mein allererstes Forschungsprojekt durchführte. Nach meinem Abschluss im Jahr 1964 führte mich meine Begeisterung für die Verhaltensforschung an das Max-Planck-Institut für Verhaltensphysiologie in Seewiesen, wo ich dank der Unterstützung des

Deutschen Akademischen Austauschdiensts arbeiten durfte. Dort führte ich im von Irenäus Eibl-Eibesfeldt gegründeten Säugetierlabor Forschungen an Spitzhörnchen (Tupajas) durch. Während dieser Zeit profitierte ich von zahlreichen Diskussionen mit Konrad Lorenz. Wie sich nach meiner Heimkehr herausstellte, sollte Desmond Morris — der einige Monate zuvor den Bestseller *Der nackte Affe* veröffentlichte hatte — der externe Prüfer meiner Doktorarbeit in Oxford sein.

Die Einführung in die Primatenfeldforschung verdanke ich Jean-Jacques Petter, dem Leiter meiner Forschung als Postdoktorand an der Abteilung für Allgemeine Ökologie des Nationalen Museums für Naturgeschichte in Brunoy, Frankreich. Nach ersten Beobachtungen seiner Mausmaki-Zuchtkolonie konnte ich diese winzigen Lemuren im Jahr 1968 erstmals in freier Wildbahn untersuchen, als ich die Oxford-Expedition in Madagaskar leitete, die von der Royal Society in London unterstützt wurde. Einige Jahre später unterstützte die Royal Society zudem eine zweijährige Feldstudie südafrikanischer Galagos, bei der ich mit Simon Bearder, einem außerordentlich begabten Primatenfeldforscher, zusammenarbeitete.

1969 wurde es in meiner akademischen Karriere richtig ernst, denn in diesem Jahr trat ich meine Dozentenstelle an der biologischen Anthropologie des University College London an. Dort hatte ich mit Nigel Barnicot einen hervorragenden Mentor, der nicht nur ein hochgeschätzte Kollege, sondern auch ein lieber Freund wurde. Sein früher Tod war eine bittere Erfahrung. Insgesamt verbrachte ich dreizehn Jahre in der anthropologischen Abteilung am University College London, die durch einen vierjährigen Aufenthalt an der Zoological Society of London unterbrochen wurden, wo ich als Senior Research Fellow das Wellcome Institute für vergleichende Physiologie leitete. Während meiner Zeit an der Zoological Society lernte ich Alan Dixson kennen, der mit mir ein Postdoc-Projekt mit Nachtaffen durchführte. Seither haben Alan und ich mehrere gemeinsame Untersuchungen durchgeführt, rasch zählte er auch zu meinen besten Freunden. An der Zoological Society führte ich gemeinsam mit Brian Seaton, Maya Stavy und anderen Mitarbeitern anhand von Urinproben Hormonbestimmungen von Gorillas und Orang-Utans durch, die in Zoos lebten. Die Erforschung der Fortpflanzungsbiologie von gefährdeten Arten in Gefangenschaft führte direkt zu einer langjährigen Zusammenarbeit mit dem Jersey Wildlife Preservation Trust (jetzt Durrell Wildlife Conservation Trust genannt) und zu einer wert-

vollen Freundschaft mit dem Ehrendirektor Gerald Durrell und dem Zoologischen Direktor Jeremy Mallinson.

Meine Jahre zwischen 1986 und 2001 als Direktor und Professor des Anthropologischen Instituts der Universität Zürich ebneten mir den Weg, um weitere wertvolle Erfahrungen mit der Fortpflanzungsbiologie der Primaten sammeln zu können. Besonders wichtig war dabei, dass Christopher Pryce — ein ehemaliger Doktorand aus meiner Zeit in London — ins Institut kam, um ein Postdoc-Projekt mit Springtamarinen (Neuweltaffen aus Bolivien) aufzubauen. Seit dieser Zeit ist Chris ein hochgeschätzter Kollege und Freund. In enger Zusammenarbeit mit Max Döbeli vom benachbarten Veterinärmedizinischen Institut führten wir, zuerst mit Harnproben und später auch mit Kotproben, Hormonbestimmungen durch. Diese Forschungen erwiesen sich für mehrere andere Untersuchungen als äußerst wichtig, besonders für Nina Bahrs Doktorarbeit über das Verhältnis von Hormonen und mütterlichem Verhalten bei Gorillas. Ein großes Glück war auch, dass Gustl Anzenberger — der eine besondere Gabe für die Pflege von Tieren in Gefangenschaft hat — mir ans Anthropologische Institut folgte. Wie ich hatte Gustl zuvor am Max-Planck-Institut in Seewiesen geforscht, und er wurde rasch ein enger Freund, der mein Interesse am Verhalten der Primaten teilte.

2001 wurde ich als Vizepräsident und später Vorsteher für akademische Angelegenheiten ans Field Museum in Chicago berufen. Nach Ablauf meines fünfjährigen Vertrags für diese Verwaltungsstelle wurde ich zum A. Watson Armour III-Kurator für Biologische Anthropologie ernannt. Dieser Wechsel ermöglichte mir, wieder voll und ganz zur Forschung zurückzukehren. Dem Field Museum und seinem damaligen Präsidenten John McCarter schulde ich großen Dank, dass ich meine Forschung in neue Richtungen lenken durfte und gleichzeitig die einmalige Gelegenheit hatte, bei der Förderung der öffentlichen Anerkennung der Wissenschaft eine aktive Rolle zu spielen. Besonders dankbar bin ich auch drei nahestehenden Kollegen der University of Chicago — Dario Maestripieri, Callum Ross und Russell Tuttle. Die drei sind ausgezeichnete Kenner der Primatenkunde und unterstützen mich, wo immer es nötig ist.

Neben den bereits namentlich erwähnten Personen und den Generationen von Studentinnen und Studenten, die mich mit klugen und begeisterten Reaktionen anspornten, möchte ich den vielen Helfern danken, die einen wesentlichen Beitrag zur englischsprachigen Originalausgabe dieses Buches

leisteten. An erster Stelle schulde ich meiner Frau Anne Elise Martin, meiner ständigen Begleiterin und Stütze, außerordentlichen Dank. In allen Stadien des Manuskripts unterstützte sie mich mit scharfsinnigen Einschätzungen und äußerst wertvollen Erkenntnissen. Sehr dankbar bin ich auch meinem Literaturagenten Esmond Harmsworth (von Zachary Shuster Harmsworth). Dank seiner großen Erfahrung konnte er mir mit einem Intensivkurs, wie man für ein allgemeines Publikum schreibt, entscheidend weiterhelfen. Von Albert Einstein stammt die weise Bemerkung: »Kannst du etwas nicht einfach erklären, hast du es nicht ganz verstanden.« Esmond brachte mir aber auch bei, dass eine Geschichte spannend erzählt werden muss, und Vereinfachung und eine klare Ausdrucksform alleine nicht genügen. Bei Basic Books begleiteten Tisse Takagi und TJ Kelleher mich bis zur Veröffentlichung, während John Donohue und Sue Warga das Lektorat äußerst gewissenhaft und fachgerecht erledigten. Bei der Herausgabe der deutschsprachigen Version des Buches tat der Verleger von LIBRUM Publishers & Editors LLC, Dominique-Charles R. Oppler, alles, um das Projekt auf den richtigen Weg zu bringen. Die Zusammenarbeit mit Dominique erwies vom ersten Moment an als erstklassig und äußerst angenehm. Für die sehr rasche Verwirklichung der deutschen Ausgabe bin ich ihm sehr dankbar. Beim Lektorat meiner Rohübersetzung leistete Rainer Vollmar mit großem Geschick und Einfühlungsvermögen exzellente Arbeit. Die Übersetzungsarbeit konnte ich als Fellow am Wissenschaftskolleg Berlin dank der außerordentlich stimulierenden Arbeitsumgebung und der ausgezeichneten Unterstützung während des akademischen Jahrs 2014/2015 durchführen. Zu guter Letzt bin ich meinem ehemaligen Institutskollegen und Freund Gustl Anzenberger zutiefst dankbar für die sorgfältige Überprüfung der wissenschaftlichen Details der Übersetzung.

Von ganzem Herzen danke ich auch mehreren engagierten Personen, die Entwürfe der englischen Originalausgabe lasen und hilfreiche Kommentare abgaben. Sowohl Ken Kaye, ein versierter Autor, als auch Christie Henry und Glynn Meter, beide erfahrene Lektorinnen, lasen einzelne Kapitel und führten mich in die Kunst des Schreibens ein. Andere lasen das ganze Manuskript und halfen mir, verschiedene Verbesserungen umzusetzen: mein Sohn Oliver und Christopher Martin, meine Tochter Alexandra Martin, meine Schwester Valerie Angus, meine lieben Freunde Marjorie Benton, Alan Dixson und Peter Freeman, meine hochgeschätzte Kollegin Alaka Wali,

meine ehemalige Forschungsassistentin Edna Davion und die Praktikantinnen und Praktikanten Timothy Murphy, Lu Yao, Hannah Koch und Andrea Rummel. Besondere Dankbarkeit verdienen auch mehrere Praktikantinnen und Praktikanten und Freiwillige, die seltene Veröffentlichungen aufspürten und damit immer wieder auftauchende Lücken füllten: Catherine Althaus, Heather Baker, Joe Cottal, Victoria DeMartelly, Hannah Koch, Tim Murphy, Andrea Rummel, Sarah Sticha und Meghan White. Trotz dieses wahren Heers von Gehilfinnen und Gehilfen muss ich gemäß altem Brauch die Verantwortung für alle Fehler übernehmen, die der Text noch enthält.

Danken möchte ich auch folgenden ehemaligen Studenten und Kollegen, die im Laufe der Jahre — wissentlich oder nicht — einen persönlichen Beitrag zu den dargestellten Themen leisteten: Andrew Barbour, Rosemary Bonney, Heather Brand, Bryan Carroll, Matt Cartmill, Pierre Charles-Dominique, Janice Cliff, Juliette Cross, Deborah Curtis, Christopher Dean, Andrea Dettling, Frances D'Souza, Anna Feistner, Stephen Ferrari, Dirk Fleming, Michel Genoud, Paul Harvey, Michael Heistermann, Charlotte Hemelrijk, Marcel Hladik, Keith Hodges, Katherine Homewood, Louise Humphrey, Karin Isler, Mike Jerky, Alison Jolly, Susan Kingsley, die verstorbene Devra Kleiman, Leslie Knapp, Rolf Kümmerli, Elisabeth Langenegger, Ann MacLarnon, Alan McNeilly, Lara Modolo, Theya Molleson, Alexandra Müller, Thomas Mutschler, Caroline Nievergelt, Ann-Kathrin Oerke, Jennifer Pastorini, Martine Perret, William Pestle, Arlette Petter-Rousseaux, Alison Richard, Caroline Ross, Ben Rudder, Jeffrey Schwartz, Christophe Soligo, Robert Sussman, Ian Tattersall, Urs Thalmann, Krisztina Vàsàrhelyi, Franziska von Segesser, Rüdiger Wehner, Sybille Wehner, Jean Wickings und Lesley Willner.

Zum Schluss möchte ich noch kurz einige Bemerkungen über das Schreiben dieses Buches loswerden. Abgesehen von einigen Artikeln für ein allgemeines Publikum, um deren Veröffentlichung man mich gebeten hatte, war dies mein erster Versuch, ein populärwissenschaftliches Werk zu schreiben. Als Akademiker war ich dazu geneigt, viele Fachausdrücke zu benutzen (obwohl ich mit der Zeit gelernt habe, sie auch im Hörsaal auf ein Minimum zu reduzieren), etliche Abbildungen zu verwenden und zahlreiche Originalveröffentlichungen zu zitieren. Für mich war es eine befreiende Erfahrung, ein Manuskript zu schreiben, in dem ich so weit wie möglich auf abschreckende Fachsprache, Abbildungen und Literaturhinweise verzichten konnte.

Trotzdem habe ich mich durchweg bemüht, wissenschaftliche Genauigkeit mit einer unkomplizierten Ausdrucksform zu verbinden. Meine Meinung war schon immer, dass die besten Bücher für eine allgemeine Leserschaft diejenigen sind, die komplizierte Themen erklären, ohne in Halbwahrheiten abzugleiten. Diesem hohen Anspruch gerecht zu werden, war mein Ziel.

LITERATURVERZEICHNIS

Bücher

- Abitbol, M. M., F. A. Chervenah und W. J. Ledger. 1996. *Birth and Human Evolution: Anatomical and Obstetrical Mechanisms in Primates*. Westport, CT: Bergin and Garvey.
- Allman, J. 1999. *Evolving Brains*. New York: W. H. Freeman/Scientific American.
- Asdell, S. A. 1946. *Patterns of Mammalian Reproduction*. London: Constable.
- Baker, R. R. 2006. *Sperm Wars: Infidelity, Sexual Conflict and Other Bedroom Battles*. New York: Basic Books.
- Baker, R. R., und M. A. Bellis. 1994. *Human Sperm Competition: Copulation, Masturbation and Infidelity*. London: Chapman & Hall.
- Bancroft, J. 2009. *Human Sexuality and Its Problems*. 3. Auflage. Edinburgh: Churchill Livingstone, Elsevier.
- Beischer, N. A., E. V. Mackay und P. B. Colditz. 1997. *Obstetrics and the Newborn: An Illustrated Textbook*. 3. Auflage. London: Baillière Tindall.
- Betzig, L. L., M. Borgerhoff Mulder und P. Turke. 1988. *Human Reproductive Behaviour: A Darwinian Perspective*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Billings, J. J. 1983. *The Ovulation Method: The Achievement or Avoidance of Pregnancy by a Technique Which Is Reliable and Universally Acceptable*. Melbourne: Advocate Press.
- Birkhead, T. R. 2000. *Promiscuity: An Evolutionary History of Sperm Competition and Sexual Conflict*. London: Faber and Faber.
- Blum, D. 2002. *Love at Goon Park: Harry Harlow and the Science of Affection*. New York: Basic Books.
- Boucke, L. 2008. *Infant Potty Training: A Gentle and Primeval Method Adapted to Modern Living*. 3. Auflage. Lafayette, CO: White-Boucke Publishing.
- Cobb, M. 2006. *The Egg and Sperm Race: The Seventeenth-Century Scientists Who Unravelling the Secrets of Sex, Life and Growth*. London: Free Press.
- Cunnane, S. C. 2005. *Survival of the Fattest: The Key to Human Brain Evolution*. Hackensack, NJ: World Scientific.
- De Jonge, C. J. und C. L. R. Barratt. 2002. *Assisted Reproductive Technology: Accomplishments and New Horizons*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dettwyler, K. und P. Stuart-Macadam, (Hrsg.) 1995. *Breastfeeding: Biocultural Perspectives*. Piscataway, NJ: Aldine Transaction.

- Diamond, J. M. 1997. *Why Is Sex Fun? The Evolution of Human Sexuality*. New York: Basic Books.
- Dixon, A. F. 2009. *Sexual Selection and the Origins of Human Mating Systems*. Oxford: Oxford University Press.
- . 2012. *Primate Sexuality: Comparative Studies of the Prosimians, Monkeys, Apes and Human Beings*. 2. Auflage. Oxford: Oxford University Press.
- Djerassi, C. 2001. *This Man's Pill: Reflections on the 50th Birthday of the Pill*. Oxford: Oxford University Press.
- Edwards, R. G. 1980. *Conception in the Human Female*. London: Academic Press.
- Ellison, P. T. 2001. *On Fertile Ground: A Natural History of Human Reproduction*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Fildes, V. A. 1986. *Breasts, Bottles and Babies: A History of Infant Feeding*. Edinburgh: Edinburgh University Press.
- Ford, C. S. 1945. *A Comparative Study of Human Reproduction*. New Haven, CT: Yale University Press.
- Ford, C. S. und F. A. Beach. 1951. *Patterns of Sexual Behaviour*. New York: Harper & Bros.
- Gould, S. J. 1996. *The Mismeasure of Man* (2. Auflage). New York: W. W. Norton & Co.
- Grosser, O. 1909. *Vergleichende Anatomie und Entwicklungsgeschichte der Eihäute und der Placenta*. Wien: Wilhelm Braumüller.
- Hartman, C. G. 1962. *Science and the Safe Period: A Compendium of Human Reproduction*. Baltimore: Williams and Wilkins Co.
- Hellin, D. 1895. *Die Ursache der Multiparität der uniparen Thiere überhaupt und der Zwillingsschwangerschaft beim Menschen insbesondere*. München: Seitz & Schauer.
- Hrdy, S. B. 2009. *Mothers and Others: The Evolutionary Origins of Mutual Understanding*. Cambridge, MA: Belknap Press of Harvard University Press.
- Huntington, E. 1938. *The Season of Birth*. New York: John Wiley.
- Jelliffe, D. B., E. F. P. Jelliffe und L. Kersey. 1989. *Human Milk in the Modern World*. Oxford: Oxford University Press.
- Jerison, H. J. 1973. *Evolution of the Brain and Intelligence*. New York: Academic Press.
- Jirásek, J. E. 2001. *An Atlas of the Human Embryo and Fetus: A Photographic Review of Human Prenatal Development*. Boca Raton, FL: Parthenon Publishing.
- Jolly, A. 1999. *Lucy's Legacy: Sex and Intelligence in Human Evolution*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Jordan, B. 1992. *Birth in Four Cultures: A Crosscultural Investigation of Childbirth in Yucatan, Holland, Sweden, and the United States*. 4. Auflage. Prospect Heights, IL: Waveland Press.
- Kaye, K. 1982. *The Mental and Social Life of Babies: How Parents Create Persons*. Chicago: University of Chicago Press.
- Klaus, M. H. und P. H. Klaus. 2000. *Your Amazing Newborn*. Cambridge, MA: Da Capo.
- Konner, M. 2010. *The Evolution of Childhood: Relationships, Emotion, Mind*. Cambridge, MA: Belknap Press of Harvard University Press.
- Latz, L. J. 1932. *The Rhythm of Sterility and Fertility in Women: A Discussion of the Physiological, Practical, and Ethical Aspects of the Discoveries of Drs. K. Ogino (Japan) and Prof. H.*

- Knaus (Austria) Regarding the Periods When Conception Is Impossible and When Possible.* Chicago: Latz Foundation.
- Leakey, M. D. 1984. *Disclosing the Past.* London: Weidenfeld & Nicolson.
- Low, B. S. 2000. *Why Sex Matters: A Darwinian Look at Human Behavior.* Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Malthus, T. R. 1798. *An Essay on the Principles of Population as It Affects the Future Improvement of Society.* London: J. Johnson.
- Marantz Henig, R. 2004. *Pandora's Baby: How the First Test Tube Babies Sparked the Reproductive Revolution.* Boston: Houghton Mifflin.
- Marshall, J. 1963. *The Infertile Period — Principles and Practice.* London: Darton, Longman and Todd.
- Martin, R. D. 1990. *Primate Origins and Evolution: A Phylogenetic Reconstruction.* Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Masters, W. H. und V. E. Johnson. 1966. *Human Sexual Response.* London: Churchill.
- McLaren, A. 1992. *A History of Contraception: From Antiquity to the Present Day.* Oxford: Blackwell.
- Michael, R. T., J. H. Gagnon, B. O. Laumann und G. Kolata. 1994. *Sex in America: A Definitive Survey.* New York: Little, Brown.
- Miller, G. F. 2000. *The Mating Mind: How Sexual Choice Shaped the Evolution of Human Nature.* London: Heinemann.
- Morris, D. 1967. *The Naked Ape: A Zoologist's Study of the Human Animal.* London: Jonathan Cape.
- Nesse, R. M. und G. C. Williams. 1995. *Why We Get Sick: The New Science of Darwinian Medicine.* New York: Times Books.
- Ogino, K. 1934. *Conception Period of Women.* Harrisburg, PA: Medical Arts.
- Paterniti, M. 2000. *Driving Mr. Albert: A Trip Across America with Einstein's Brain.* New York: The Dial Press.
- Pinto-Correia, C. 1997. *The Ovary of Eve: Eggs and Sperm and Preformation.* Chicago: University of Chicago Press.
- Pollard, I. 1994. *A Guide to Reproduction: Social Issues and Human Concerns.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Pond, C. M. 1998. *The Fats of Life.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Portmann, A. 1990. *A Zoologist Looks at Human Kind.* New York: Columbia University Press.
- Potts, M. und R. V. Short. 1999. *Ever Since Adam and Eve: The Evolution of Human Sexuality.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Profet, M. 1997. *Pregnancy Sickness: Using Your Body's Natural Defenses to Protect Your Baby-to-Be.* Reading, MA: Perseus.
- Quetelet, A. 1869. *Physique sociale ou essai sur le développement des facultés de l'homme.* Paris: J.-B. Baillière et Fils.
- Redshaw, M. E., R. P. A. Rivers und D. B. Rosenblatt. 1985. *Born Too Early: Special Care for Your Preterm Baby.* Oxford: Oxford University Press.
- Riddle, J. M. 1992. *Contraception and Abortion from the Ancient World to the Renaissance.* Cambridge, MA: Harvard University Press.

- Robin, P. 1998. *When Breastfeeding Is Not an Option: A Reassuring Guide for Loving Parents*. Roseville, CA: Prima Lifestyles.
- Rock, J. C. 1963. *The Time Has Come: A Catholic Doctor's Proposals to End the Battle over Birth Control*. New York: Knopf.
- Shields, B. 2005. *Down Came the Rain: My Journey Through Postpartum Depression*. New York: Hyperion.
- Small, M. 1998. *Our Babies, Ourselves: How Biology and Culture Shape the Way We Parent*. New York: Anchor Books.
- Smolensky, M. H., und L. Lamberg. 2000. *The Body Clock Guide to Better Health: How to Use Your Body's Natural Clock to Fight Illness and Achieve Maximum Health*. New York: Henry Holt.
- Symons, D. 1979. *The Evolution of Human Sexuality*. Oxford: Oxford University Press.
- Tanner, J. M. 1989. *Foetus into Man: Growth from Conception to Maturity*. 2. Auflage. Hertfordshire, UK: Castlemead.
- Taylor, G. 2000. *Castration: An Abbreviated History of Western Manhood*. London: Routledge.
- Thornhill, R. und S. W. Gangestad. 2008. *The Evolutionary Biology of Human Female Sexuality*. Oxford: Oxford University Press.
- Tone, A. 2001. *Devices and Desires: A History of Contraception in America*. New York: Hill and Wang.
- Trevathan, W. R. 1987. *Human Birth: An Evolutionary Perspective*. Hawthorne, NY: Aldine de Gruyter.
- Vollman, R. F. 1977. *The Menstrual Cycle*. Philadelphia: W. B. Saunders.
- Wolf, J. H. 2001. *Don't Kill Your Baby: Public Health and the Decline of Breastfeeding in the Nineteenth and Twentieth Centuries*. Columbus: Ohio State University Press.
- Wood, J. W. 1995. *Dynamics of Human Reproduction: Biology, Biometry, Demography*. New York: Aldine de Gruyter.
- World Health Organization. 2003. *Global Strategy for Infant and Young Child Feeding*. Genf: WHO Press.
- . 2005. *Guiding Principles for Feeding Non-Breastfed Children 6–24 Months*. Genf: WHO Press.
- . 2006. *Pregnancy, Childbirth, Postpartum and Newborn Care: A Guide for Essential Practice*. 2. Auflage. Genf: WHO Press.
- . 2010. *WHO Laboratory Manual for the Examination and Processing of Human Semen*. 5. Auflage. Genf: WHO Press.
- Worth, J. 2002. *Call the Midwife: A True Story of the East End in the 1950s*. Twickenham, UK: Merton Books.
- Wrangham, R. 2009. *Catching Fire: How Cooking Made Us Human*. New York: Basic Books.

Wissenschaftliche Artikel

- Abou-Saleh, M. T., R. Ghubash, L. Karim, M. Krymski und I. Bhai. 1998. Hormonal Aspects of Postpartum Depression. *Psychoneuroendocrinology* 23: 465–475.
- Ahlfeld, F. 1869. Beobachtungen über die Dauer der Schwangerschaft. *Monatsschrift für Geburtskunde und Frauenkrankheiten* 34: 180–225.
- Aitken, R. J., P. Koopman und S. E. M. Lewis. 2004. Seeds of Concern. *Nature* 432: 48–52.
- Albers, L. L. 1999. The Duration of Labor in Healthy Women. *Journal of Perinatology* 19: 114–119.
- Alliende, M. E. 2002. Mean Versus Individual Hormonal Profiles in the Menstrual Cycle. *Fertility and Sterility* 78: 90–95.
- Allsworth, J. E., J. Clarke, J. F. Peipert, M. R. Hebert, A. Cooper und L. A. Boardman. 2007. The Influence of Stress on the Menstrual Cycle Among Newly Incarcerated Women. *Women's Health Issues* 17: 202–209.
- Altmann, J. und A. Samuels. 1992. Costs of Maternal Care: Infant-carrying in Baboons. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 29: 391–398.
- Anderson, J. W., B. M. Johnstone und D. T. Remley. 1999. Breast-feeding and Cognitive Development: A Meta-analysis. *American Journal of Clinical Nutrition* 70: 525–535.
- Anderson, K. G. 2006. How Well Does Paternity Confidence Match Actual Paternity? *Current Anthropology* 47: 513–520.
- Anderson, M. J. und A. F. Dixson. 2002. Motility and the Midpiece in Primates. *Nature* 416: 496.
- Anderson, M. J., J. Nyholt und A. F. Dixson. 2005. Sperm Competition and the Evolution of Sperm Midpiece Volume in Mammals. *Journal of Zoology, London* 267: 135–142.
- Andrade, A. T. L., J. P. Souza, S. T. Shaw, E. M. Belsey und P. J. Rowe. 1991. Menstrual Blood Loss and Iron Stores in Brazilian Women. *Contraception* 43: 241–249.
- Auger, J., J. M. Kunstmann, F. Gzyglik und P. Jouannet. 1995. Decline in Semen Quality Among Fertile Men in Paris During the Past Twenty Years. *New England Journal of Medicine* 332: 281–285.
- Backe, B. 1991. A Circadian Variation in the Observed Duration of Labor. *Acta Obstetrica et Gynecologica Scandinavica* 70: 465–468.
- Baker, T. G. 1963. A Quantitative and Cytological Study of Germ Cells in Human Ovaries. *Proceedings of the Royal Society, London B Biological Sciences* 158: 417–433.
- Benshoof, L. und R. Thornhill. 1979. The Evolution of Monogamy and Concealed Ovulation in Humans. *Journal of Social & Biological Structures* 2: 95–106.
- Bergsjø, P., D. W. Denman, H. J. Hoffman und O. Meirik. 1990. Duration of Human Singleton Pregnancy: A Population-Based Study. *Acta Obstetrica et Gynecologica Scandinavica* 69: 197–207.
- Bernier, M. O., G. Plu-Bureau, N. Bossard, L. Ayzac und J. C. Thalabard. 2000. Breastfeeding and Risk of Breast Cancer: A Meta-analysis of Published Studies. *Human Reproduction Update* 6: 374–386.
- Bielert, C. und J. G. Vandenbergh. 1981. Seasonal Influences on Births and Male Sex Skin Coloration in Rhesus Monkeys (*Macaca mulatta*) in the Southern Hemisphere. *Journal of Reproduction & Fertility* 62: 229–233.

- Billings, J. J. 1981. Cervical Mucus: The Biological Marker of Fertility and Infertility. *International Journal of Fertility* 26: 182–195.
- Bogin, B. 1997. Evolutionary Hypotheses for Human Childhood. *Yearbook of Physical Anthropology* 40: 63–89.
- Boklage, C. E. 1990. Survival Probability of Human Conceptions from Fertilisation to Term. *International Journal of Fertility* 35: 75–94.
- Bonde, J. P., E. Ernst, T. K. Jensen, N. H. Hjollund, H. Kolstad, T. B. Henriksen, T. Scheike, A. Giwercman, J. Olsen und N. E. Skakkebaek. 1998. Relation Between Semen Quality and Fertility: A Population-Based Study of 430 First-Pregnancy Planners. *Lancet* 352: 1172–1177.
- Bostofte, E., J. Serup und H. Rebbe. 1982. Relation Between Sperm Count and Semen Volume, and Pregnancies Obtained During a Twenty-Year Follow-Up Period. *International Journal of Andrology* 5: 267–275.
- Bovens, L. 2006. The Rhythm Method and Embryonic Death. *Journal of Medical Ethics* 32: 355–356.
- Boyle, P., S. N. Kaye und A. G. Robertson. 1987. Changes in Testicular Cancer in Scotland. *European Journal of Cancer & Clinical Oncology* 23: 827–830.
- Bronson, F. H. 1995. Seasonal Variation in Human Reproduction: Environmental Factors. *Quarterly Review of Biology* 70: 141–164.
- Brophy, J. T., M. M. Keith, A. Watterson, R. Park, M. Gilbertson, E. Maticka-Tyndale, M. Beck, H. Abu-Zahra, K. Schneider, A. Reinhartz, R. DeMatteo und I. Luginaah. 2012. Breast Cancer Risk in Relation to Occupations with Exposure to Carcinogens and Endocrine Disruptors: A Canadian Case-Control Study. *Environmental Health* 11/87.
- Brosens, J. J., M. G. Parker, A. McIndoe, R. Pijnenborg und I. A. Brosens. 2009. A Role for Menstruation in Preconditioning the Uterus for Successful Pregnancy. *American Journal of Obstetrics & Gynecology* 200: 615 e1–6.
- Brown, J. E., E. S. Kahn und T. J. Hartman. 1997. Profet, Profits, and Proof: Do Nausea and Vomiting of Early Pregnancy Protect Women from »Harmful« Vegetables? *American Journal of Obstetrics & Gynecology* 176: 179–181.
- Brummelte, S. und L. A. M. Galea. 2010. Depression During Pregnancy and Postpartum: Contribution of Stress and Ovarian Hormones. *Progress in Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry* 34: 766–776.
- Buckley, S. J. 2006. Placenta Rituals and Folklore from Around the World. *Midwifery Today: International Midwife* 80: 58–59.
- Bujan, L., M. Daudin, J.-P. Charlet, P. Thonneau und R. Mieusset. 2000. Increase in Scrotal Temperature in Car Drivers. *Human Reproduction* 15: 1355–1357.
- Burley, N. 1979. The Evolution of Concealed Ovulation. *American Naturalist* 114: 835–858.
- Burr, M. L., E. S. Limb, M. J. Maguire, L. Amarah, B. A. Eldridge, J. C. Layzell und T. G. Merrett. 1993. Infant Feeding, Wheezing, and Allergy: A Prospective Study. *Archive of Disease in Childhood* 68: 724–728.
- Byard, R. W., M. Makrides, M. Need, M. A. Neumann und R. A. Gibson. 1995. Sudden Infant Death Syndrome: Effect of Breast and Formula Feeding on Frontal Cortex and Brainstem Lipid Composition. *Journal of Paediatrics & Child Health* 31: 14–16.
- Cancho-Candela, R., J. M. Andres-de Llano und J. Ardura-Fernandez. 2007. Decline and

- Loss of Birth Seasonality in Spain: Analysis of 33 421 731 Births over 60 Years. *Journal of Epidemiology & Community Health* 61: 713–718.
- Carlsen, E., A. Giwercman, N. Keiding und N. E. Skakkebaek. 1992. Evidence for Decreasing Quality of Semen During Past 50 Years. *British Medical Journal* 305: 609–613.
- Carnahan, S. J. und M. I. Jensen-Seaman. 2008. Hominoid Seminal Protein Evolution and Ancestral Mating Behavior. *American Journal of Primatology* 70: 939–948.
- Caro, T. M. 1987. Human Breasts, Unsupported Hypotheses Reviewed. *Human Evolution* 2: 271–282.
- Carpenter, C. R. 1942a. Sexual Behavior of Free Ranging Rhesus Monkeys (*Macaca mulatta*). I. Specimens, Procedures and Behavior Characteristics of Estrus. *Journal of Comparative Psychology* 33: 113–142.
- . 1942b. Sexual Behavior of Free Ranging Rhesus Monkeys (*Macaca mulatta*). II. Periodicity of Estrus, Homosexual, Autoerotic and Non-conformist Behavior. *Journal of Comparative Psychology* 33: 143–162.
- Chandwani, K. D., I. Cech, M. H. Smolensky, K. Burau und R. C. Hermida. 2004. Annual Pattern of Human Conception in the State of Texas. *Chronobiology International* 21: 73–93.
- Chard, T. 1991. Frequency of Implantation and Early-pregnancy Loss in Natural Cycles. *Baillière's Clinical Obstetrics & Gynaecology* 5: 179–189.
- Chauhan, S. P., J. A. Scardo, E. Hayes, A. Z. Abuhamad und V. Berghella. 2010. Twins: Prevalence, Problems, and Preterm Births. *American Journal of Obstetrics & Gynecology* 203: 305–315.
- Chen, A. M. und W. J. Rogan. 2004. Breastfeeding and the Risk of Postneonatal Death in the United States. *Pediatrics* 113: e435–e439.
- Chilvers, C., M. C. Pike, D. Forman, K. Fogelman und M. E. J. Wadsworth. 1984. Apparent Doubling of Frequency of Undescended Testis in England and Wales in 1962–81. *Lancet* 324: 330–332.
- Chua, S., S. Arulkumaran, I. Lim, N. Selamat und S. S. Ratnam. 1994. Influence of Breastfeeding and Nipple Stimulation on Postpartum Uterine Activity. *British Journal of Obstetrics & Gynaecology* 101: 804–805.
- Clark, N. L. und W. J. Swanson. 2005. Pervasive Adaptive Evolution in Primate Seminal Proteins. *PLoS Genetics* 1/3: e35.
- Collaborative Group on Hormonal Factors in Breast Cancer. 1996. Breast Cancer and Hormonal Contraceptives: Collaborative Reanalysis of Individual Data on 53 297 Women with Breast Cancer and 100 239 Women without Breast Cancer from 54 Epidemiological Studies. *Lancet* 347: 1713–1727.
- . 2002. Breast Cancer and Breastfeeding: Collaborative Reanalysis of Individual Data from 47 Epidemiological Studies in 30 Countries, Including 50,302 Women With Breast Cancer and 96,973 Women Without the Disease. *Lancet* 360: 187–196.
- Conaway, C. H. und C. B. Koford. 1964. Estrous Cycles and Mating Behavior in a Free-Ranging Band of Rhesus Monkeys. *Journal of Mammalogy* 45: 577–588.
- Conaway, C. H. und D. S. Sade. 1965. The Seasonal Spermatogenic Cycle in Free Ranging Rhesus Monkeys. *Folia Primatologica* 3: 1–12.
- Connolly, M. P., S. Hoorens und G. M. Chambers. 2010. The Costs and Consequences of

- Assisted Reproductive Technology: An Economic Perspective. *Human Reproduction Update* 16: 603–613.
- Consensus Statement: Breastfeeding as a Family Planning Method. 1988. *Lancet* 332: 1204–1205.
- Cooper, T. G., E. Noonan, S. von Eckardstein, J. Auger, H. W. G. Baker, H. M. Behre, T. B. Haugen, T. Kruger, C. Wang, M. T. Mbizvo und K. M. Vogelsong. 2010. World Health Organization Reference Values for Human Semen Characteristics. *Human Reproduction Update* 16: 231–245.
- Coqueugniot, H., J.-J. Hublin, F. Veillon, F. Houët und T. Jacob. 2004. Early Brain Growth in *Homo erectus* and Implications for Cognitive Ability. *Nature* 431: 299–302.
- Cowgill, U. M. 1966a. Historical Study of the Season of Birth in the City of York, England. *Nature* 209: 1067–1070.
- . 1966b. The Season of Birth in Man. *Man (new.series)* 1: 232–241.
- . 1966c. Season of Birth in Man: Contemporary Situation with Special Reference to Europe and the Southern Hemisphere. *Ecology* 47: 614–623.
- Cunnane, S. C. und M. A. Crawford. 2003. Survival of the Fattest: Fat Babies Were the Key to Evolution of the Large Human Brain. *Comparative Biochemistry & Physiology A* 136: 17–26.
- Cunningham, A. S., D. B. Jelliffe und E. F. P. Jelliffe. 1991. Breastfeeding and Health in the 1980s: A Global Epidemiological Review. *Journal of Pediatrics* 118: 659–666.
- Czeizel, A. E., E. Puho, N. Acs und F. Banhidy. 2006. Inverse Association Between Severe Nausea and Vomiting in Pregnancy and Some Congenital Abnormalities. *American Journal of Medical Genetics* 140A, 453–462.
- Danilenko, K. und E. A. Samoilova. 2007. Stimulatory Effect of Morning Bright Light on Reproductive Hormones and Ovulation: Results of a Controlled Crossover Trial. *PLoS Clinical Trials* 2/2: e7.
- de Boer, C. H. 1972. Transport of Particulate Matter Through the Female Genital Tract. *Journal of Reproduction & Fertility* 28: 295–297.
- DeSilva, J. M. 2011. A Shift Toward Birthing Relatively Large Infants Early in Human Evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 108: 1022–1027.
- Dettwyler, K. A. 2004. When to Wean: Biological Versus Cultural Perspectives. *Clinical Obstetrics & Gynecology* 47: 712–723.
- deVries, M. W. und M. R. deVries. 1977. Cultural Relativity of Toilet Training Readiness: A Perspective from East Africa. *Pediatrics* 60: 170–177.
- Dixon, B. J., G. M. Grimshaw, W. L. Linklater und A. F. Dixon. 2010. Eye-tracking of Men's Preferences for Waist-to-Hip Ratio and Breast Size of Women. *Archives of Sexual Behavior* 40: 43–50.
- Djerassi, C. und S. P. Leibo. 1994. A New Look at Male Contraception. *Nature* 370: 11–12.
- Dodds, E. C. und W. Lawson. 1936. Synthetic Estrogenic Agents Without the Phenanthrene Nucleus. *Nature* 137: 996.
- . 1938. Molecular Structure in Relation to Oestrogenic Activity. Compounds Without a Phenanthrene Nucleus. *Proceedings of the Royal Society, London B* 125: 222–232.
- Dorus, S., P. D. Evans, G. J. Wyckoff, S. S. Choi und B. T. Lahn. 2004. Rate of Molecular

- Evolution of the Seminal Protein Gene SEMG2 Correlates with Levels of Female Promiscuity. *Nature Genetics* 36: 1326–1329.
- Doyle, R. 1996. World Birth-Control Use. *Scientific American* 275(9): 34.
- Dunn, P. M. 2000. Dr. Emmett Holt (1855–1924) and the Foundation of North American Paediatrics. *Archive of Disease in Childhood Fetal & Neonatal Edition* 83: F221–F223.
- Dupras, T. L., H. P. Schwarcz und S. I. Fairgrieve. 2001. Infant Feeding and Weaning Practices in Roman Egypt. *American Journal of Physical Anthropology* 115: 204–212.
- Edwards, C. A. und A. M. Parrett. 2002. Intestinal Flora During the First Months of Life: New Perspectives. *British Journal of Nutrition* 88, S1: S11–S18.
- Edwards, R. G. 1981. Test-Tube Babies, 1981. *Nature* 293: 253–256.
- Egli, G. E. und M. Newton. 1961. The Transport of Carbon Particles in the Human Female Reproductive Tract. *Fertility & Sterility* 12: 151–155.
- Eiben, B., I. Bartels, S. Bähr-Porsch, S. Borgmann, G. Gatz, G. Gellert, R. Goebel, W. Hammans, M. Hentemann, R. Osmers, R. Rauskolb und I. Hansmann. 1990. Cytogenetic Analysis of 750 Spontaneous Abortions with the Direct-Preparation Method of Chorionic Villi and Its Implications for Studying Genetic Causes of Pregnancy Wastage. *American Journal of Human Genetics* 47: 656–663.
- El-Chaar, D., O. Y. Yang, J. Bottomely, S. W. Wen und M. Walker. 2006. Risk of Birth Defects in Pregnancies Associated with Assisted Reproductive Technology. *American Journal of Obstetrics & Gynecology* 195: S21.
- Ellington, J. E., D. P. Evenson, R. W. Wright, A. E. Jones, C. S. Schneider, G. A. Hiss und R. S. Brisbois. 1999. Higher-Quality Human Sperm in a Sample Selectively Attach to Oviduct (Fallopian Tube) Epithelial Cells in Vitro. *Fertility & Sterility* 71: 924–929.
- Emera, D., R. Romero und G. Wagner. 2012. The Evolution of Menstruation: A New Model for Genetic Assimilation. *BioEssays* 34: 26–35.
- Evans, K. M. und V. J. Adams. 2010. Proportion of Litters of Purebred Dogs Born by Caesarean Section. *Journal of Small Animal Practice* 51: 113–118.
- Falk, H. C. und S. A. Kaufman. 1950. What Constitutes a Normal Semen? *Fertility & Sterility* 1: 489–503.
- Fell, D. B. und K. S. Joseph. 2012. Temporal Trends in the Frequency of Twins and Higher-Order Multiple Births in Canada and the United States. *BMC Pregnancy & Childbirth* 12/103: 1–7.
- Figà-Talamanca, I., C. Cini, G. C. Varricchio, F. Dondero, L. Gandini, A. Lenzi, F. Lombardo, L. Angelucci, R. Di Grezia und F. R. Patacchioli. 1996. Effects of Prolonged Autovehicle Driving on Male Reproductive Function: A Study Among Taxi Drivers. *American Journal of Industrial Medicine* 30: 750–758.
- Finn, C. A. 1998. Menstruation: A Non-adaptive Consequence of Uterine Evolution. *Quarterly Review of Biology* 73: 163–173.
- Fisch, H., E. T. Goluboff, J. H. Olson, J. Feldshuh, S. J. Broder und D. H. Barad. 1996. Semen Analyses in 1,283 Men from the United States over a 25-Year Period: No Decline in Quality. *Fertility & Sterility* 65: 1009–1014.
- Flaxman, S. M. und P. W. Sherman. 2000. Morning Sickness: A Mechanism for Protecting Mother and Embryo. *Quarterly Review of Biology* 75: 113–148.
- Fleming, A. S., D. Ruble, H. Krieger und P. Y. Wong. 1997. Hormonal and Experiential

- Correlates of Maternal Responsiveness During Pregnancy and the Puerperium in Human Mothers. *Hormones & Behavior* 31: 145–158.
- Foote, R. H. 2002. The History of Artificial Insemination: Selected Notes and Notables. *Journal of Animal Science* 80: 1–10.
- Fox, C. A., S. J. Meldum und B. W. Watson. 1973. Continuous Measurement by Radio-Telemetry of Vaginal pH During Human Coitus. *Journal of Reproduction & Fertility* 33: 69–75.
- Francis, C. M., E. L. P. Anthony, J. A. Brunton und T. H. Kunz. 1994. Lactation in Male Fruit Bats. *Nature* 367: 691–692.
- Franciscus, R. G. 2009. When Did the Modern Human Pattern of Childbirth Arise? New Insights from an Old Neandertal Pelvis. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 106: 9125–9126.
- Fuller, B. T., J. L. Fuller, D. A. Harris und R. E. M. Hedges. 2006. Detection of Breastfeeding and Weaning in Modern Human Infants with Carbon and Nitrogen Stable Isotope Ratios. *American Journal of Physical Anthropology* 129: 279–293.
- Galloway, T., R. Cipelli, J. Guralnik, L. Ferrucci, S. Bandinelli, A. M. Corsi, C. Money, P. McCormack und D. Melzer. 2010. Daily Bisphenol A Excretion and Associations with Sex Hormone Concentrations: Results from the InCHIANTI Adult Population Study. *Environmental Health Perspectives* 118: 1603–1608.
- Garwicz, M., M. Christensson und E. Psouni. 2009. A Unifying Model for Timing of Walking Onset in Humans and Other Mammals. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 106: 21889–21893.
- German, J. 1968. Mongolism, Delayed Fertilization and Human Sexual Behaviour. *Nature* 217: 516–518.
- Gibbons, A. 2008. The Birth of Childhood. *Science* 322: 1040–1043.
- Gibson, J. R. und T. McKeown. 1950. Observations on All Births (23,970) in Birmingham, 1947. I: Duration of Gestation. *British Journal of Social Medicine* 4: 221–233.
- . 1952. Observations on All Births (23,970) in Birmingham, 1947. VI: Birth Weight, Duration of Gestation and Survival Related to Sex. *British Journal of Social Medicine* 6: 152–158.
- Gilbert, S. F. und Z. Zevit. 2001. Congenital Human Baculum Deficiency: The Generative Bone of Genesis 2: 21–23. *American Journal of Medical Genetics* 101: 284–285.
- Glazier, A. und A. S. McNeilly. 1990. Physiology of Lactation. *Clinical Endocrinology & Metabolism* 4: 379–395.
- Goldman, A. S. 2002. Evolution of the Mammary Gland Defense System and the Ontogeny of the Immune System. *Journal of Mammary Gland Biology & Neoplasia* 7: 277–289.
- Goldwater, P. N. 2011. A Perspective on SIDS Pathogenesis. The Hypotheses: Plausibility and Evidence. *BMC Medicine* 9/64.
- Gomendio, M. und E. R. S. Roldan. 1993. Co-evolution Between Male Ejaculates and Female Reproductive Biology in Eutherian Mammals. *Proceedings of the Royal Society, London B Biological Sciences* 252: 7–12.
- Gould, J. E., J. W. Overstreet und F. W. Hanson. 1984. Assessment of Human Sperm Function after Recovery from the Female Reproductive Tract. *Biology of Reproduction* 31: 888–894.

- Gray, J. P. und L. D. Wolfe. 1983. Human Female Sexual Cycles and the Concealment of Ovulation Problem. *Journal of Social and Biological Structures* 6: 345–352.
- Gray, L., L. W. Miller, B. L. Philipp und E. M. Blass. 2002. Breastfeeding Is Analgesic in Healthy Newborns. *Pediatrics* 109: 590–593.
- Groer, M. W., M. W. Davis und J. Hemphill. 2002. Postpartum Stress: Current Concepts and the Possible Protective Role of Breastfeeding. *Journal of Obstetric, Gynecologic, & Neonatal Nursing* 31: 411–417.
- Guerrero, R. und C. A. Lanctot. 1970. Aging of Fertilizing Gametes and Spontaneous Abortion: Effect of the Day of Ovulation and the Time of Insemination. *American Journal of Obstetrics & Gynecology* 107: 263–267.
- Guerrero, V. und O. I. Rojas. 1975. Spontaneous Abortion and Aging of Human Ova and Spermatozoa. *New England Journal of Medicine* 293: 573–575.
- Gunz, P., S. Neubauer, B. Maureille und J.-J. Hublin. 2010. Brain Development After Birth Differs Between Neanderthals and Modern Humans. *Current Biology* 20: R921–R922.
- Guzick, D. S., J. W. Overstreet, P. Factor-Litvak, C. K. Brazil, S. T. Nakajima, C. Coutifaris, S. A. Carson, P. Cisneros, M. P. Steinkampf, J. A. Hill, D. Xu und D. L. Vogel. 2001. Sperm Morphology, Motility, and Concentration in Fertile and Infertile Men. *New England Journal of Medicine* 345: 1388–1393.
- Häger, R. M., A. K. Daltveit, D. Hofoss, S. T. Nilsen, T. Kolaas, P. Oian und T. Henriksen. 2004. Complications of Cesarean Deliveries: Rates and Risk Factors. *American Journal of Obstetrics & Gynecology* 190: 428–434.
- Haimov-Kochman, R., R. Har-Nir, E. Ein-Mor, V. Ben-Shoshan, C. Greenfield, I. Eldar, Y. Bdolah und A. Hurwitz. 2012. Is the Quality of Donated Semen Deteriorating? Findings from a 15 Year Longitudinal Analysis of Weekly Sperm Samples. *Israel Medical Association Journal* 14: 372–377.
- Hallberg, L., A.-M. Hogdahl, L. Nilsson und G. Rybo. 1966. Menstrual Blood Loss—A Population Study. *Acta Obstetrica et Gynecologica Scandinavica* 45: 320–351.
- Hammes, L. M. und A. E. Treloar. 1970. Gestational Interval from Vital Records. *American Journal of Public Health* 60: 1496–1505.
- Hansen, M., J. J. Kurinczuk, N. de Klerk, P. Burton und C. Bower. 2012. Assisted Reproductive Technology and Major Birth Defects in Western Australia. *Obstetrics & Gynecology* 120: 852–863.
- Harcourt, A. H., P. H. Harvey, S. G. Larson und R. V. Short. 1981. Testis Weight, Body Weight and Breeding System in Primates. *Nature* 293: 55–57.
- Harcourt, A. H., A. Purvis und L. Liles. 1995. Sperm Competition: Mating System, Not Breeding Season, Affects Testes Size of Primates. *Functional Ecology* 9: 468–476.
- Harder, T., R. Bergmann, G. Kallschnigg und A. Plagemann. 2005. Duration of Breastfeeding and Risk of Overweight: A Meta-analysis. *American Journal of Epidemiology* 162: 397–403.
- Harlow, H. F. und M. K. Harlow. 1962. Social Deprivation in Monkeys. *Scientific American* 207(5): 136–146.
- . 1966. Learning to Love. *American Scientist* 54: 244–272.
- Hartman, C. G. 1931. The Phylogeny of Menstruation. *Journal of the American Medical Association* 97: 1863–1865.

- . 1932. Studies in the Reproduction of the Monkey *Macacus (Pithecus) rhesus*, with Special Reference to Menstruation and Pregnancy. *Contributions to Embryology: Carnegie Institute Washington* 23: 1–161.
- Heape, W. 1900. The »Sexual Season« of Mammals and the Relation of the »Pro-oestrum« to Menstruation. *Quarterly Journal of Microscopical Science* 44: 1–70.
- Hedges, L. V. und A. Nowell. 1995. Sex Differences in Mental Test Scores, Variability, and Numbers of High-Scoring Individuals. *Science* 269: 41–45.
- Heikkilä, K., A. Sacker, Y. Kelly, M. J. Renfrew und M. A. Quigley. 2011. Breast Feeding and Child Behaviour in the Millennium Cohort Study. *Archive of Disease in Childhood* 96: 635–642.
- Heird, W. C. 2001. The Role of Polyunsaturated Fatty Acids in Term and Preterm Infants and Breastfeeding Mothers. *Pediatric Clinics of North America* 48: 173–188.
- Helland, I. B., L. Smith, K. Saarem, O. D. Saugstad und C. A. Drevon. 2003. Maternal Supplementation with Very-Long-Chain n-3 Fatty Acids During Pregnancy and Lactation Augments Children's IQ at 4 Years of Age. *Pediatrics* 111: e39–e44.
- Heres, M. H. G., M. Pel, M. Borkent-Polet, P. E. Treffers und M. Mirmiran. 2000. The Hour of Birth: Comparisons of Circadian Pattern Between Women Cared for by Midwives and Obstetricians. *Midwifery* 16: 173–176.
- Higham, J. P., C. Ross, Y. Warren, M. Heistermann und A. M. MacLarnon. 2007. Reduced Reproductive Function in Wild Baboons (*Papio hamadryas anubis*) Related to Natural Consumption of the African Black Plum (*Vitex doniana*). *Hormones & Behavior* 52: 384–390.
- Hill, S. A. 1888. The Life Statistics of an Indian Province. *Nature* 38: 245–250.
- Hinde, K. und L. A. Milligan. 2011. Primate Milk: Proximate Mechanisms and Ultimate Perspectives. *Evolutionary Anthropology* 20: 9–23.
- Hirata, S., K. Fuwa, K. Sugama, K. Kusunoki und H. Takeshita. 2011. Mechanism of Birth in Chimpanzees: Humans Are Not Unique Among Primates. *Biological Letters* 7: 686–688.
- Holdcroft, A., A. Oatridge, J. V. Hajnal und G. M. Bydder. 1997. Changes in Brain Size in Normal Human Pregnancy. *Journal of Physiology* 499P: 79P–80P.
- Holt, L. E. 1890. Observations upon the Capacity of the Stomach in Infancy. *Archives of Pediatrics* 7: 960–967.
- Honnebier, M. B. O. M. 1994. The Role of the Circadian System During Pregnancy and Labor in Monkey and Man. *Acta Obstetrica et Gynecologica Scandinavica* 73: 85–88.
- Honnebier, M. B. O. M. und P. W. Nathanielsz. 1994. Primate Parturition and the Role of Maternal Circadian System. *European Journal of Obstetrics & Gynaecology and Reproductive Biology* 55: 193–203.
- Hook, E. B. und S. Harlap. 1979. Difference in Maternal-Age Specific Rates of Down's Syndrome Between Jews of European Origin and of North African or Asian Origin. *Teratology* 20: 243.
- Howie, P. W., J. S. Forsyth, S. A. Ogston, A. Clark und C. D. Florey. 1990. Protective Effect of Breast Feeding Against Infection. *British Medical Journal* 300: 11–16.
- Howie, P. W. und A. S. McNeilly. 1982. Effect of Breast-feeding Patterns on Human Birth Intervals. *Journal of Reproduction & Fertility* 65: 545–557.

- Huang, F. J., S. Y. Chang, F. T. Kung, J. F. Wu und M. Y. Tsai. 1998. Timed Intercourse After Intrauterine Insemination for Treatment of Infertility. *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology* 80: 257–261.
- Hubrecht, A. A. W. 1898. Über die Entwicklung der Placenta von *Tarsius* und *Tupaia*, nebst Bemerkungen über deren Bedeutung als haemopoetische Organe. *Proc Int Congr Zool* 4: 345–411.
- Huyghe, E., T. Matsuda und P. Thonneau. 2003. Increasing Incidence of Testicular Cancer Worldwide: A Review. *Journal of Urology* 170: 5–11.
- Iffy, L. 1963a. Embryonic Studies of Time of Conception in Ectopic Pregnancy and First Trimester Abortion. *Obstetrics & Gynecology* 26: 490–498.
- Iffy, L. 1963b. The Time of Conception in Foetal Monstrosities. *Gynaecologia* 156: 140–142.
- Iffy, L. und M. B. Wingate. 1970. Risks of Rhythm Method of Birth Control. *Journal of Reproductive Medicine* 5: 11–17.
- Insler, V., M. Glezerman, L. Zeidel, D. Bernstein und N. Misgav. 1980. Sperm Storage in the Human Cervix: A Quantitative Study. *Fertility & Sterility* 33: 288–293.
- Irvine, S., E. Cawood und D. Richardson. 1996. Evidence of Deteriorating Semen Quality in the United Kingdom: Birth Cohort Study in 577 Men in Scotland over 11 Years. *British Medical Journal* 312: 467–471.
- Itan, Y., A. Powell, M. A. Beaumont, J. Burger und M. G. Thomas. 2009. The Origins of Lactase Persistence in Europe. *PLoS Computational Biology* 5, 8: e1000491; doi:10.1371/journal.pcbi.1000491.
- James, W. H. 1971. The Distribution of Coitus Within the Human Inter-Menstruum. *Journal of Biosocial Science* 3: 159–171.
- . 1980. Secular Trend in Reported Sperm Counts. *Andrologia* 12: 381–388.
- . 1990. Seasonal Variation in Human Births. *Journal of Biosocial Science* 22: 113–119.
- . 1996. Down Syndrome and Natural Family Planning. *American Journal of Medical Genetics* 66: 365.
- Jarnfelt-Samsioe, A. 1987. Nausea and Vomiting in Pregnancy: A Review. *Obstetrical & Gynecological Survey* 41: 422–427.
- Jensen, T. K., N. Jørgensen, M. Punab, T. B. Haugen, J. Suominen, B. Zilaitiene, A. Horte, A.-G. Andersen, E. Carlsen, Ø. Magnus, V. Matulevicius, I. Nermon, M. Vierula, N. Keiding, J. Toppari und N. E. Skakkebaek. 2004. Association of In Utero Exposure to Maternal Smoking with Reduced Semen Quality and Testis Size in Adulthood: A Cross-Sectional Study of 1,770 Young Men from the General Population in Five European Countries. *American Journal of Epidemiology* 159: 49–58.
- Jensen-Seaman, M. I. und W.-H. Li. 2003. Evolution of the Hominoid Semenogelin Genes, the Major Proteins of Ejaculated Semen. *Journal of Molecular Evolution* 57: 261–270.
- Jöchle, W. 1973. Coitus-Induced Ovulation. *Contraception* 7: 523–564.
- Jolly, A. 1972. Hour of Birth in Primates and Man. *Folia Primatologica* 18: 108–121.
- . 1973. Primate Birth Hour. *International Zoo Yearbook* 13: 391–397.
- Jongbloet, P. H. 1985. The Ageing Gamete in Relation to Birth Control Failures and Down Syndrome. *European Journal of Pediatrics* 144: 343–347.

- Jongbloet, P. H., A. J. M. Poestkoke, A. J. H. Hamers und J. H. J. van Erkelens-Zwets. 1978. Down Syndrome and Religious Groups. *Lancet* 312: 1310.
- Jørgensen, N., A.-G. Andersen, F. Eustache, D. S. Irvine, J. Suominen, J. H. Petersen, J. Holm, A. N. Andersen, A. Nyboe, J. Auger, E. H. H. Cawood, A. Horte, T. K. Jensen, P. Jouannet, N. Keiding, M. Vierula, J. Toppari und N. E. Skakkebaek. 2001. Regional Differences in Semen Quality in Europe. *Human Reproduction* 16: 1012–1019.
- Jørgensen, N., M. Vierula, R. Jacobsen, E. Pukkala, A. Perheentupa, H. E. Virtanen, N. E. Skakkebaek und J. Toppari. 2010. Recent Adverse Trends in Semen Quality and Testis Cancer Incidence Among Finnish Men. *International Journal of Andrology* 34: e37–e48.
- Juberg, R. C. 1983. Origin of Chromosome Abnormalities: Evidence for Delayed Fertilization in Meiotic Nondisjunction. *Human Genetics* 64: 122–127.
- Kaiser, I. H. und F. Halberg. 1962. Circadian Periodic Aspects of Birth. *Annals of the New York Academy of Sciences* 98: 1056–1068.
- Kakar, D. N., S. A. Samuel, K. Singar und S. Chopra. 1989. Beliefs and Practices Related to Disposal of Human Placenta. *Nursing Journal of India* 80: 315–317.
- Kambic, R. T. und V. M. Lamprecht. 1996. Calendar Rhythm Efficacy: A Review. *Advances in Contraception* 12: 123–128.
- Kang, J. H., F. Kondo und Y. Katayama. 2006. Human Exposure to Bisphenol A. *Toxicology* 226: 79–89.
- Katz, G. 1953. The Seasonal Variation in the Incidence of Premature Deliveries. *Nordic Medicine* 50: 1638.
- Katzenberg, M. A., D. A. Herring und S. R. Saunders. 1996. Weaning and Infant Mortality: Evaluating the Skeletal Evidence. *Yearbook of Physical Anthropology* 39: 177–199.
- Kenagy, G. J. und S. C. Trombulak. 1986. Size and Function of Mammalian Testes in Relation to Body Size. *Journal of Mammalogy* 67: 1–22.
- Kennedy, K. J., R. Rivera und A. S. McNeilly. 1989. Consensus Statement on the Use of Breastfeeding as a Family Planning Method. *Contraception* 39: 477–496.
- Kesserü, E. 1984. Sexual Intercourse Enhances the Success of Artificial Insemination. *International Journal of Fertility* 29: 143–145.
- Khatamee, M. A. 1988. Infertility: A Preventable Epidemic. *International Journal of Fertility* 33: 246–251.
- Kielan-Jaworowska, Z. 1979. Pelvic Structure and Nature of Reproduction in Multituberculata. *Nature* 277: 402–403.
- Kiltie, R. A. 1982. Intraspecific Variation in the Mammalian Gestation Period. *Journal of Mammalogy* 63: 646–652.
- Kintner, H. J. 1985. Trends and Regional Differences in Breastfeeding in Germany from 1871–1937. *Journal of Family Medicine* 10: 163–182.
- Klaus, M. H. 1987. The Frequency of Suckling: A Neglected but Essential Ingredient of Breast-feeding. *Obstetrics & Gynecology Clinics of North America* 14: 623–633.
- Knodel, J. E. 1977. Breastfeeding and Population Growth: Assessing the Demographic Impact of Changing Infant Feeding Practices in the Third World. *Science* 198: 1111–1115.
- Kobeissi, L., M. C. Inhorn, A. B. Hannoun, N. Hammoud, J. Awwad und A. A. Abu-Musa. 2008. Civil War and Male Infertility in Lebanon. *Fertility & Sterility* 90: 340–345.
- Koletzko, B., E. Lien, C. Agostoni, H. Böhles, C. I. Campoy, T. Decsi, J. W. Dudenhausen,

- C. Dupont, S. Forsyth, I. Hoesli, W. Holzgreve, A. Lapillonne, G. Putet, N. J. Secher, M. Symonds, H. Szajewska, P. Willatts und R. Uauy. 2008. The Roles of Long-Chain Polyunsaturated Fatty Acids in Pregnancy, Lactation, and Infancy: Review of Current Knowledge and Consensus Recommendations. *Journal of Perinatal Medicine* 36: 5–14.
- Konner, M. und C. Worthman. 1980. Nursing Frequency, Gonadal Function, and Birth Spacing Among !Kung Hunter-Gatherers. *Science* 207: 788–791.
- Kovar, W. R. und R. J. Taylor. 1960. Is Spontaneous Abortion a Seasonal Problem? *Obstetrics & Gynecology* 16: 350–353.
- Kramer, P. A. 1998. The Costs of Human Locomotion: Maternal Investment in Child Transport. *American Journal of Physical Anthropology* 107: 71–86.
- Kunz, G., H. Deininger, L. Wildt und G. Leyendecker. 1996. The Dynamics of Rapid Sperm Transport Through the Female Genital Tract: Evidence from Vaginal Sonography of Uterine Peristalsis and Hysterosalpingoscintigraphy. *Human Reproduction* 11: 627–632.
- Kuruto-Niwa, R., Y. Tateoka, Y. Usuki und R. Nozawa. 2007. Measurement of Bisphenol A Concentration in Human Colostrum. *Chemosphere* 66: 1160–1164.
- Kuzawa, C. W. 1998. Adipose Tissue in Human Infancy and Childhood: An Evolutionary Perspective. *Yearbook of Physical Anthropology* 41: 177–209.
- Labbok, M. H. 2001. Effects of Breastfeeding on the Mother [review]. *Pediatric Clinics of North America* 48: 143–158.
- Lam, D. A. und J. A. Miron. 1994. Global Patterns of Seasonal Variation in Human Fertility. *Annals of the New York Academy of Sciences* 709: 9–28.
- Lansac, J., F. Thepot, M. J. Mayaux, F. Czyglick, T. Wack, J. Selva und P. Jalbert. 1997. Pregnancy Outcome After Artificial Insemination or IVF With Frozen Semen Donor: A Collaborative Study of the French CECOS Federation on 21,597 Pregnancies. *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology* 74: 223–228.
- Lanting, C. I., V. Fidler, M. Huisman, B. C. L. Touwen und E. R. Boersma. 1994. Neurological Differences Between 9-Year-Old Children Fed Breast-Milk or Formula-Milk as Babies. *Lancet* 344: 1319–1322.
- Lau, C. 2001. Effects of Stress on Lactation. *Pediatric Clinics of North America* 48: 221–234.
- Lee, P. C. 1987. Nutrition, Fertility and Maternal Investment in Primates. *Journal of Zoology, London* 213: 409–422.
- Leigh, S. R. und P. B. Park. 1998. Evolution of Human Growth Prolongation. *American Journal of Physical Anthropology* 107: 331–350.
- Lerchl, M., M. Simoni und E. Nieschlag. 1993. Changes in the Seasonality of Birth Rates in Germany from 1951 to 1990. *Naturwissenschaften* 80: 516–518.
- Leutenegger, W. 1973. Maternal-Fetal Weight Relationships in Primates. *Folia Primatologica* 20: 280–293.
- Levin, R. J. 1975. Masturbation and Nocturnal Emissions: Possible Mechanisms for Minimising Teratospermie and Hyperspermie in Man. *Medical Hypotheses* 1: 130–131.
- Lewy, A. J., T. A. Wehr, F. K. Goodwin, D. A. Newsome und S. P. Markey. 1980. Light Suppresses Melatonin Secretion in Humans. *Science* 210: 1267–1269.
- Li, D.-K., Z.-J. Zhou, M. Miao, Y. He, J.-T. Wang, J. Ferber, L. J. Herrinto, E.-S. Gao und W. Yuan. 2011. Urine Bisphenol-A (BPA) Level in Relation to Semen Quality. *Fertility & Sterility* 95: 625–630.

- Li, D., Z. Zhou, D. Qing, Y. He, T. Wu, M. Miao, J. Wang, X. Weng, J. R. Ferber, L. J. Herrinton, Q. Zhu, E. Gao, H. Checkoway und W. Yuan. 2010. Occupational Exposure to Bisphenol-A (BPA) and the Risk of Self-reported Male Sexual Dysfunction. *Human Reproduction* 25: 519–527.
- Lijeros, F., C. R. Edling, L. A. N. Amaral, H. E. Stanley und Y. Åberg. 2001. The Web of Human Sexual Contacts. *Nature* 411: 907–908.
- Linzenmeier, G. 1947. Zur Frage der Empfängniszeit der Frau: Hat Knaus oder Stieve recht? *Zentralblatt für Gynäkologie* 69: 1108–1110.
- Lloyd, J., N. S. Crouch, C. L. Minto, L.-M. Liao und S. M. Creighton. 2005. Female Genital Appearance: »Normality« Unfolds. *British Journal of Obstetrics & Gynaecology* 112: 643–646.
- Lönnerdal, B. 2000. Breast Milk: A Truly Functional Food. *Nutrition* 16: 509–511.
- Lopata, A. 1996. Implantation of the Human Embryo. *Human Reproduction* 11 (Supplement 1): 175–184.
- Loucks, A. B. und L. M. Redman. 2004. The Effect of Stress on Menstrual Function. *Trends in Endocrinology & Metabolism* 15: 466–471.
- Loudon, A. S. I., A. S. McNeilly und J. A. Milne. 1983. Nutrition and Lactational Control of Fertility in Red Deer. *Nature* 302: 145–147.
- Loy, J. 1987. The Sexual Behavior of African Monkeys and the Question of Estrus. In *Comparative Behavior of African Monkeys*, ed. E. Zucker, 175–195. New York: Alan Liss.
- Luckett, W. P. 1974. The Comparative Development and Evolution of the Placenta in Primates. *Contributions to Primatology* 3: 142–234.
- MacDorman, M. F., F. Menacker und E. Declercq. 2008. Cesarean Birth in the United States: Epidemiology, Trends, and Outcomes. *Clinical Perinatology* 35: 293–307.
- MacLeod, J. und R. Z. Gold. 1951. The Male Factor in Fertility and Infertility. II. Spermatozoon Counts in 1000 Men of Known Fertility and 1000 Cases of Infertile Marriage. *Journal of Urology* 66: 436–449.
- . 1957. The Male Factor in Fertility and Infertility. IX. Semen Quality in Relation to Accidents of Pregnancy. *Fertility & Sterility* 8: 36–49.
- MacLeod, J. und R. S. Hotchkiss. 1941. The Effect of Hyperpyrexia upon Spermatozoa Counts in Men. *Endocrinology* 28: 780–784.
- MacLeod, J. und Y. Wang. 1979. Male Fertility Potential in Terms of Semen Quality. A Review of the Past, a Study of the Present. *Fertility & Sterility* 31: 103–116.
- Macomber, D. und M. B. Sanders. 1929. The Spermatozoa Count. *New England Journal of Medicine* 200: 981–984.
- Málek, J., J. Gleich und V. Maly. 1962. Characteristics of the Daily Rhythm of Menstruation and Labor. *Annals of the New York Academy of Science* 98: 1042–1055.
- Mancuso, P. J., J. M. Alexander, D. D. McIntire, E. Davis, G. Burke und K. J. Leveno. 2004. Timing of Birth After Spontaneous Onset of Labor. *Obstetrics & Gynaecology* 103: 653–656.
- Mann, D. R. und H. M. Fraser. 1996. The Neonatal Period: A Critical Interval in Male Primate Development. *Journal of Endocrinology* 149: 191–197.
- Marshall, J. 1968. Congenital Defects and the Age of Spermatozoa. *International Journal of Fertility* 13, 110–120.

- Martin, R. D. 1968. Reproduction and Ontogeny in Tree-Shrews (*Tupaia belangeri*) with Reference to Their General Behaviour and Taxonomic Relationships. *Zeitschrift für Tierpsychologie* 25: 409–532.
- . 1969. The Evolution of Reproductive Mechanisms in Primates. *Journal of Reproduction & Fertility, Supplement* 6: 49–66.
- . 1981. Relative Brain Size and Metabolic Rate in Terrestrial Vertebrates. *Nature* 293: 57–60.
- . 1984. Scaling Effects and Adaptive Strategies in Mammalian Lactation. *Symposia of the Zoological Society of London* 51: 87–117.
- . 1992. Female Cycles in Relation to Paternity in Primate Societies. In *Paternity in Primates: Genetic Tests and Theories. Implications of Human DNA Fingerprinting*, hrsg. von R. D. Martin, A. F. Dixson und E. J. Wickings, 238–274. Basel: Karger.
- . 1996. Scaling of the Mammalian Brain: The Maternal Energy Hypothesis. *News in Physiological Sciences* 11: 149–156.
- . 2003. Human Reproduction: A Comparative Background for Medical Hypotheses. *Journal of Reproductive Immunology* 59: 111–135.
- . 2007. The Evolution of Human Reproduction: A Primatological Perspective. *Yearbook of Physical Anthropology* 50: 59–84.
- . 2008. Evolution of Placentation in Primates: Implications of Mammalian Phylogeny. *Evolutionary Biology* 35: 125–145.
- . 2012. Primer: Primates. *Current Biology* 22: R785–R790.
- Martin, R. D. und K. Isler. 2010. The Maternal Energy Hypothesis of Brain Evolution: An Update. In *The Human Brain Evolving: Paleoneurological Studies in Honor of Ralph L. Holloway*, hrsg. von D. Broadfield, M. Yuan, K. Schick und N. Toth, 15–35. Bloomington, IN: Stone Age Institute Press.
- Martin, R. D. und A. M. MacLarnon. 1985. Gestation Period, Neonatal Size and Maternal Investment in Placental Mammals. *Nature* 313: 220–223.
- . 1988. Comparative Quantitative Studies of Growth and Reproduction. *Symposia of the Zoological Society of London* 60: 39–80.
- Martin, R. D., L. A. Willner und A. Dettling. 1994. The Evolution of Sexual Size Dimorphism in Primates. In *The Differences Between the Sexes*, hrsg. von R. V. Short und E. Balaban, 159–200. Cambridge: Cambridge University Press.
- Matsuda, S. und H. Kahyo. 1992. Seasonality of Preterm Births in Japan. *International Journal of Epidemiology* 21: 91–100.
- McCance, R. A., M. C. Luff und E. E. Widdowson. 1937. Physical and Emotional Periodicity in Women. *Journal of Hygiene* 37: 571–611.
- McCoy, S. J. B., J. M. Beal, S. B. M. Shipman, M. E. Payton und G. H. Watson. 2006. Risk Factors for Postpartum Depression: A Retrospective Investigation at 4-Weeks Postnatal and a Review of the Literature. *Journal of the American Osteopathic Association* 106: 193–198.
- McGrath, J. J., A. G. Barnett und D. W. Eyles, 2005. The Association Between Birth Weight, Season of Birth and Latitude. *Annals of Human Biology* 32: 547–559.
- McKenna, J. J., H. L. Ball und L. T. Gettler. 2007. Mother-Infant Cosleeping, Breastfee-

- ding and Sudden Infant Death Syndrome: What Biological Anthropology Has Discovered About Normal Infant Sleep and Pediatric Sleep Medicine. *Yearbook of Physical Anthropology* 45: 133–161.
- McKeown, T. und J. R. Gibson. 1951. Observations on All Births (23,970) in Birmingham, 1947. II: Birth Weight. *British Journal of Social Medicine* 5: 98–112.
- . 1952. Period of Gestation. *British Medical Journal* 1: 938–941.
- McKeown, T. und R. G. Record. 1952. Observations on Foetal Growth in Multiple Pregnancy in Man. *Journal of Endocrinology* 8: 386–401.
- McNeilly, A. S. 2001. Lactational Control of Reproduction. *Reproduction, Fertility & Development* 13: 583–590.
- McTiernan, A. und D. B. Thomas. 1986. Evidence for a Protective Effect of Lactation on Risk of Breast Cancer in Young Women. Results from a Case Control Study. *American Journal of Epidemiology* 124: 353–358.
- Menacker, F. und B. E. Hamilton. 2010. Recent Trends in Cesarean Delivery in the United States. *NCHS Data Brief* 35: 1–8.
- Mendiola, J., N. Jørgensen, A.-M. Andersson, A. M. Calafat, X. Ye, J. B. Redmon, E. Z. Drobnis, C. Wang, A. Sparks, S. W. Thurston und S. H. Swan. 2010. Are Environmental Levels of Bisphenol A Associated with Reproductive Function in Fertile Men? *Environmental Health Perspectives* 118: 1286–1291.
- Michael, R. P. und E. B. Keverne. 1971. An Annual Rhythm in the Sexual Activity of the Male Rhesus Monkey, *Macaca mulatta*, in the Laboratory. *Journal of Reproduction & Fertility* 25: 95–98.
- Michaelsen, K. F., L. Lauritzen und E. L. Mortensen. 2009. Effects of Breast-feeding on Cognitive Function. *Advances in Experimental Medicine & Biology* 639: 199–215.
- Mieusset, R. und L. Bujan. 1994. The Potential of Mild Testicular Heating as a Safe, Effective and Reversible Contraceptive Method for Men. *International Journal of Andrology* 17: 186–191.
- Miller, J. F., E. Williamson, J. Glue, Y. B. Gordon, J. G. Grudzinskas und A. Sykes. 1980. Fetal Loss After Implantation. *Lancet* 316: 554–556.
- Milligan, L. A. und R. P. Bazinet. 2008. Evolutionary Modifications of Human Milk Composition: Evidence from Long-Chain Polyunsaturated Fatty Acid Composition of Anthropoid Milks. *Journal of Human Evolution* 55: 1086–1095.
- Milstein-Moscati, I. und W. Beçak. 1978. Down Syndrome and Frequency of Intercourse. *Lancet* 312: 629–630.
- . 1981. Occurrence of Down Syndrome and Human Sexual Behavior. *American Journal of Medical Genetics* 9: 211–217.
- Moffett, A. und Y. W. Loke. 2006. Immunology of Placentation in Eutherian Mammals. *Nature Reviews Immunology* 6: 584–594.
- Moghissi, K. S. 1976. Accuracy of Basal Body Temperature for Ovulation Detection. *Fertility & Sterility* 27: 1415–1421.
- Møller, A. P. 1988. Ejaculate Quality, Testes Size and Sperm Competition in Primates. *Journal of Human Evolution* 17: 479–488.
- . 1989. Ejaculate Quality, Testes Size and Sperm Production in Mammals. *Functional Ecology* 3: 91–96.

- Montagu, A. 1961. Neonatal and Infant Immaturity in Man. *Journal of the American Medical Association* 178: 56.
- Morrow-Tlucak, M., R. H. Haude und C. B. Ernhart. 1988. Breastfeeding and Cognitive Development in the First 2 Years of Life. *Social Science & Medicine* 26: 635–639.
- Mortensen, E. L., K. F. Michaelson, S. A. Sanders und J. M. Reinisch. 2002. The Association Between Duration of Breastfeeding and Adult Intelligence. *Journal of the American Medical Association* 287: 2365–2371.
- Mortimer, D. 1983. Sperm Transport in the Human Female Reproductive Tract. *Oxford Reviews of Reproductive Biology* 5: 30–61.
- Mulcahy, M. T. 1978. Down Syndrome and Parental Coital Rate. *Lancet* 312: 895.
- Munshi-South, J. 2007. Extra-Pair Paternity and the Evolution of Testis Size in a Behaviorally Monogamous Tropical Mammal, the Large Treeshrew (*Tupaia tana*). *Behavioral Ecology & Sociobiology* 62: 201–212.
- Münster, K., L. Schmidt und P. Helm. 1992. Length and Variation in the Menstrual Cycle—A Cross-Sectional Study from a Danish County. *British Journal of Obstetrics & Gynaecology* 99: 422–429.
- Nadler, R. D. 1994. Walter Heape and the Issue of Estrus in Primates. *American Journal of Primatology* 33: 83–99.
- Nathanielsz, P. W. 1998. Comparative Studies on the Initiation of Labor. *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology* 78: 127–132.
- Nelson, C. M. K. und R. G. Bunge. 1974. Semen Analysis: Evidence for Changing Parameters of Male Fertility Potential. *Fertility & Sterility* 25: 503–507.
- Neugebauer, F. L. 1886. Eine bisher einzig dastehende Beobachtung von Polymastie mit 10 Brustwarzen. *Zentralblatt für Gynäkologie* 10: 720–736.
- Newman, J. 1995. How Breast Milk Protects Newborns. *Scientific American* 273(12): 76–79.
- Oatridge, A., A. Holdcroft, N. Saeed, J. V. Hajnal, B. K. Puri, L. Fusi und G. M. Bydder. 2002. Change in Brain Size During and After Pregnancy: Study in Healthy Women and Women with Preeclampsia. *American Journal of Neuroradiology* 23: 19–26.
- Odeblad, E. 1997. Cervical Mucus and Their Functions. *Journal of the Irish Colleges of Physicians and Surgeons* 26: 27–32.
- Oftedal, O. T. und S. J. Iverson. 1995. Phylogenetic Variation in the Gross Composition of Milks. In *The Handbook of Milk Composition*, hrsg. von R. G. Jensen, M. P. Thompson, und R. Jenness, 749–789. Orlando, FL: Academic Press.
- O'Hara, M. W. und A. M. Swain. 1996. Rates and Risk of Postpartum Depression—A Meta-analysis. *International Review of Psychiatry* 8: 37–54.
- O'Rand, M. G., E. E. Widgren, S. Beyler und R. T. Richardson. 2009. Inhibition of Human Sperm Motility by Contraceptive Anti-eppin Antibodies from Infertile Male Monkeys: Effect on Cyclic Adenosine Monophosphate. *Biology of Reproduction* 80: 279–285.
- Papanicolau, G. N. 1933. The Sexual Cycle of the Human Female as Revealed by Vaginal Smears. *American Journal of Anatomy* 52: 519–637.
- Paraskevaides, E. C., G. W. Pennington und S. Naik. 1988. Seasonal Distribution in Con-

- ceptions Achieved by Artificial Insemination by Donor. *British Medical Journal* 297: 1309–1310.
- Parazzini, F., M. Marchini, L. Luchini, L. Tozzi, R. Mezzopane und L. Fedele. 1995. Tight Underpants and Trousers and the Risk of Dyspermia. *International Journal of Andrology* 18: 137–140.
- Parente, R. C. M., L. P. Bergqvist, M. B. Soares und O. B. Moraes. 2011. The History of Vaginal Birth. *Archives of Gynecology & Obstetrics* 284: 1–11.
- Parker, G. A. 1982. Why So Many Tiny Sperm? The Maintenance of Two Sexes with Internal Fertilization. *Journal of Theoretical Biology* 96: 281–294.
- Pawlowski, B. 1998. Why Are Human Newborns So Big and Fat? *Human Evolution* 13: 65–72.
- . 1999. Permanent Breasts as a Side Effect of Subcutaneous Fat Tissue Increase in Human Evolution. *Homo* 50: 149–162.
- Pearson, J. A., R. E. M. Hedges, T. I. Molleson und M. Özbek. 2010. Exploring the Relationship Between Weaning and Infant Mortality: An Isotope Case Study from Asikli Höyük and Cayönü Tepesi. *American Journal of Physical Anthropology* 143: 448–457.
- Penrose, L. S. und J. M. Berg. 1968. Mongolism and Duration of Marriage. *Nature* 218: 300.
- Pepper, G. V. und S. C. Roberts. 2006. Rates of Nausea and Vomiting in Pregnancy and Dietary Characteristics Across Populations. *Proceedings of the Royal Society, London B* 273: 2675–2679.
- Piovanetti, Y. 2001. Breastfeeding Beyond 12 Months: An Historical Perspective. *Pediatric Clinics of North America* 48: 199–206.
- Plavcan, J. M. 2012. Sexual Size Dimorphism, Canine Dimorphism, and Male-Male Competition in Primates: Where Do Humans Fit In? *Human Nature* 23: 45–67.
- Poikkeus, P., M. Gissler, L. Unkila-Kallio, C. Hyden-Granskog und A. Tiitinen. 2007. Obstetric and Neonatal Outcome After Single Embryo Transfer. *Human Reproduction* 22: 1073–1079.
- Procopé, B.-J. 1965. Effect of Repeated Increase of Body Temperature on Human Sperm Cells. *International Journal of Fertility* 10: 333–339.
- Profet, M. 1993. Menstruation as a Defence Against Pathogens Transported by Sperm. *Quarterly Review of Biology* 68: 335–386.
- Racey, P. A. 1979. The Prolonged Storage and Survival of Spermatozoa in Chiroptera. *Journal of Reproduction & Fertility* 56: 391–402.
- Ramlau-Hansen, C. H., G. Toft, M. S. Jensen, K. Strandberg-Larsen, M. L. Hansen und J. Olsen. 2010. Maternal Alcohol Consumption During Pregnancy and Semen Quality in the Male Offspring: Two Decades of Follow-Up. *Human Reproduction* 25: 2340–2345.
- Ramm, S. A. 2007. Sexual Selection and Genital Evolution in Mammals: A Phylogenetic Analysis of Baculum Length. *American Naturalist* 169: 360–369.
- Ramm, S. A., P. L. Oliver, C. P. Ponting, P. Stockley und R. D. Emes. 2008. Sexual Selection and the Adaptive Evolution of Mammalian Ejaculate Proteins. *Molecular Biology & Evolution* 25: 207–219.
- Record, R. G. 1952. Relative Frequencies and Sex Distributions of Human Multiple Births. *British Journal of Social Medicine* 6: 192–196.

- Reefhuis, J., M. A. Honein, L. A. Schieve, A. Correa, C. A. Hobbs, S. A. Rasmussen und National Birth Defects Prevention Study. 2009. Assisted Reproductive Technology and Major Structural Birth Defects in the United States. *Human Reproduction* 24: 360–366.
- Rehan, N., A. J. Sobbero und J. W. Fertig. 1975. The Semen of Fertile Men: Statistical Analysis of 1300 Men. *Fertility & Sterility* 26: 492–502.
- Reinberg, A. 1974. Aspects of Circannual Rhythms in Man. In *Circannual Clocks: Annual Biological Rhythms*, hrsg. von E. T. Pengelley, 423–505. New York: Academic Press.
- Reinberg, A. und M. Lagoguey. 1978. Circadian and Circannual Rhythms in Sexual Activity and Plasma Hormones (FSH-LH, Testosterone) of Five Human Males. *Archives of Sexual Behavior* 7: 13–30.
- Renaud, R. L., J. Macler, I. Dervain, M.-C. Ehret, C. Aron, S. Plas-Roser, A. Spira und H. Pollack. 1980. Echographic Study of Follicular Maturation and Ovulation During the Normal Menstrual Cycle. *Fertility & Sterility* 33: 272–276.
- Reynolds, A. 2001. Breastfeeding and Brain Development. *Pediatric Clinics of North America* 48: 159–171.
- Richard, A. F. 1974. Patterns of Mating in *Propithecus verreauxi*. In *Prosimian Biology*, hrsg. von R. D. Martin, G. A. Doyle, and A. C. Walker, 49–75. London: Duckworth.
- Riggs, R., J. Mayer, D. Dowling-Lacey, T.-F. Chi, E. Jones und S. Oehninger. 2010. Does Storage Time Influence Postthaw Survival and Pregnancy Outcome? An Analysis of 11,768 Cryopreserved Human Embryos. *Fertility & Sterility* 93: 109–115.
- Roberts, C. und C. Lowe. 1975. Where Have All the Conceptions Gone? *Lancet* 305: 498–499.
- Robinson, D., J. Rock und M. F. Menkin. 1968. Control of Human Spermatogenesis by Induced Changes in Intrascrotal Temperature. *Journal of the American Medical Association* 204: 290–297.
- Rock, J. C. und D. Robinson. 1965. Effect of Induced Intrascrotal Hyperthermia on Testicular Function in Man. *American Journal of Obstetrics & Gynecology* 93: 793–801.
- Rodgers, B. 1978. Feeding in Infancy and Later Ability and Attainment: A Longitudinal Study. *Developmental Medicine & Child Neurology* 20: 421–426.
- Roenneberg, T. und J. Aschoff. 1990a. Annual Rhythm of Human Reproduction. I. Biology, Sociobiology or Both? *Journal of Biological Rhythms* 5: 195–216.
- . 1990b. Annual Rhythm of Human Reproduction. II. Environmental Correlations. *Journal of Biological Rhythms* 5: 217–239.
- Rogan, J. W. und B. C. Gladen. 1993. Breast Feeding and Cognitive Development. *Early Human Development* 31: 181–193.
- Rojansky, N., A. Brzezinski und J. G. Schenker. 1992. Seasonality in Human Reproduction: An Update. *Human Reproduction* 7: 735–745.
- Rolland, M., J. Moal, V. Wagner, D. Royère und J. De Mouzon. 2012. Decline in Semen Concentration and Morphology in a Sample of 26 609 Men Close to General Population between 1989 and 2005 in France. *Human Reproduction* 28: 462–470.
- Ron-El, R., A. Golan, H. Nachum, E. Caspi, A. Herman und Y. Softer. 1991. Delayed Fertilization and Poor Embryonic Development Associated with Impaired Semen Quality. *Fertility & Sterility* 55: 338–344.

- Rosenberg, K. R. und W. Trevathan. 1996. Bipedalism and Human Birth: The Obstetrical Dilemma Revisited. *Evolutionary Anthropology* 4: 161–168.
- . 2002. Birth, Obstetrics and Human Evolution. *British Journal of Obstetrics & Gynaecology* 109: 1199–1206.
- Rowley, M. J., F. Teshima und C. G. Heller. 1970. Duration of Transit of Spermatozoa Through the Human Male Ductular System. *Fertility & Sterility* 21: 390–396.
- Rubenstein, B. B., H. Strauss, M. L. Lazarus und H. Hankin. 1951. Sperm Survival in Women: Motile Sperm in the Fundus and the Tubes of Surgical Cases. *Fertility & Sterility* 2: 15–19.
- Sacher, G. A. 1982. The Role of Brain Maturation in the Evolution of the Primates. In *Primate Brain Evolution*, hrsg. von E. Armstrong und D. Falk, 97–112. New York: Plenum.
- Sacher, G. A. und E. F. Staffeldt. 1974. Relation of Gestation Time to Brain Weight for Placental Mammals: Implications for the Theory of Vertebrate Growth. *American Naturalist* 108: 593–615.
- Sade, D. S. 1964. Seasonal Cycle in Size of Testes of Free-Ranging *Macaca mulatta*. *Folia Primatologica* 2: 171–180.
- Sanders, D. und J. Bancroft. 1982. Hormones and the Sexuality of Women — The Menstrual Cycle. *Clinical Endocrinology & Metabolism* 11: 639–659.
- Sas, M. und J. Szöllösi. 1979. Impaired Spermiogenesis as a Common Finding Among Professional Drivers. *Archives of Andrology* 3: 57–60.
- Schaffir, J. 2006. Sexual Intercourse at Term and Onset of Labor. *Obstetrics & Gynaecology* 107: 1310–1314.
- Schernhammer, E. S. und S. E. Hankinson. 2005. Urinary Melatonin Levels and Breast Cancer Risk. *Journal of the National Cancer Institute* 97: 1084–1087.
- Schiebinger, L. 1993. Why Mammals Are Called Mammals: Gender Politics in Eighteenth-Century Natural History. *American Historical Review* 90: 382–411.
- Schneiderman, J. U. 1998. Rituals of Placenta Disposal. *American Journal of Maternal/Child Nursing* 23: 142–143.
- Schradin, C. und G. Anzenberger. 2001. Costs of Infant Carrying in Common Marmosets, *Callithrix jacchus*: An Experimental Analysis. *Animal Behaviour* 62: 289–295.
- Sellen, D. W. 2001. Comparison of Infant Feeding Patterns Reported for Nonindustrial Populations with Current Recommendations. *Journal of Nutrition* 131: 2707–2715.
- . 2009. Evolution of Human Lactation and Complementary Feeding: Implications for Understanding Contemporary Cross-Cultural Variation. *Advances in Experimental Medicine & Biology* 639: 253–282.
- Setchell, B. P. 1997. Sperm Counts in Semen of Farm Animals 1932–1995. *International Journal of Andrology* 20: 209–214.
- . 1998. The Parkes Lecture: Heat and the Testes. *Journal of Reproduction & Fertility* 114: 179–194.
- Settlage, D. S. F., M. Motoshima und D. R. Tredway. 1973. Sperm Transport from the External Cervical Os to the Fallopian Tubes in Women. *Fertility & Sterility* 24: 655–661.
- Shafik, A. 1992. Contraceptive Efficacy of Polyester-Induced Azoospermia in Normal Men. *Contraception* 45: 439–451.

- Sharav, T. 1991. Aging Gametes in Relation to Incidence, Gender, and Twinning in Down Syndrome. *American Journal of Medical Genetics* 39: 116–118.
- Sharpe, R. M. 1994. Could Environmental, Oestrogenic Chemicals Be Responsible for Some Disorders of Human Male Reproductive Development? *Current Opinion in Urology* 4: 295–302.
- Sharpe, R. M. und N. E. Skakkebaek. 1993. Are Oestrogens Involved in Falling Sperm Counts and Disorders of the Male Reproductive Tract? *Lancet* 341: 1392–1395.
- Sheard, N. F. und W. A. Walker. 1988. The Role of Breast Milk in the Development of the Gastrointestinal Tract. *Nutrition Reviews* 46: 1–8.
- Sheynkin, Y., R. Welliver, A. Winer, F. Hajimirzaee, H. Ahn und K. Lee. 2011. Protection from Scrotal Hyperthermia in Laptop Computer Users. *Fertility & Sterility* 95: 647–651.
- Short, R. V. 1976. The Evolution of Human Reproduction. *Proceedings of the Royal Society, London B Biological Sciences* 195: 3–24.
- . 1979. Sexual Selection and Its Component Parts, Somatic and Genital Selection, as Illustrated by Man and the Great Apes. *Advances in the Study of Behavior* 9: 131–158.
- . 1984. Breast Feeding. *Scientific American* 250(4): 35–41.
- . 1994. Human Reproduction in an Evolutionary Context. *Annals of the New York Academy of Sciences* 709: 416–425.
- Simmons, L. W., L. C. Firman, G. Rhodes und M. Peters. 2004. Human Sperm Competition: Testis Size, Sperm Production and Rates of Extrapair Copulations. *Animal Behaviour* 68: 297–302.
- Simpson, J. L., R. H. Gray, A. Perez, P. Mena, M. Barbato, E. E. Castilla, R. T. Kambic, F. Pardo, G. Tagliabue, W. S. Stephenson, A. Bitto, C. Li, V. H. Jennings, J. M. Spieler und J. T. Queenan. 1997. Pregnancy Outcome in Natural Family Planning Users: Cohort and Case-Control Studies Evaluating Safety. *Advances in Contraception* 13: 201–214.
- Slama, R., F. Eustache, B. Ducot, T. K. Jensen, N. Jørgensen, A. Horte, S. Irvine, J. Suominen, A. G. Andersen, J. Auger, M. Vierula, J. Toppari, J. N. Andersen, N. Keiding, N. E. Skakkebaek, A. Spira und P. Jouannet. 2002. Time to Pregnancy and Semen Parameters: A Cross-Sectional Study Among Fertile Couples from Four European Cities. *Human Reproduction* 17: 503–515.
- Small, M. 1992. The Evolution of Female Sexuality and Mate Selection in Humans. *Human Nature* 3: 133–156.
- . 1996. »Revealed« Ovulation in Humans? *Journal of Human Evolution* 30: 483–488.
- Smits, J. und C. Monden. 2011. Twinning Across the Developing World. *PLoS One* 6/9: e25239.
- Sokol, R. Z., P. Kraft, I. M. Fowler, R. Mamet, E. Kim und K. T. Berhane. 2006. Exposure to Environmental Ozone Alters Semen Quality. *Environmental Health Perspectives* 114: 360–365.
- Spira, A. 1984. Seasonal Variations of Sperm Characteristics. *Archives of Andrology* 12 (Suppl): 23–28.
- Stallmann, R. R. und A. H. Harcourt. 2006. Size Matters: The (Negative) Allometry of Copulatory Duration in Mammals. *Biological Journal of the Linnean Society* 87: 185–193.

- Stanislaw, H. und F. J. Rice. 1988. Correlation Between Sexual Desire and Menstrual Cycle Characteristics. *Archives of Sexual Behavior* 17: 499–508.
- Steklis, H. D. und C. H. Whiteman. 1989. Loss of Estrus in Human Evolution: Too Many Answers, Too Few Questions. *Ethology & Sociobiology* 10: 417–434.
- Stephens, W. N. 1961. A Cross-Cultural Study of Menstrual Taboos. *Genetic Psychology Monographs* 64: 385–416.
- Step toe, P. C. und R. G. Edwards. 1978. Birth After the Reimplantation of a Human Embryo. *Lancet* 312: 366.
- Storgaard, L., J. Bonde, E. Ernst, M. Spano, C. Y. Andersen, M. Frydenberg und J. Olsen. 2003. Does Smoking During Pregnancy Affect Sons' Sperm Counts? *Epidemiology* 14: 278–286.
- Strassmann, B. I. 1996a. Energy Economy in the Evolution of Menstruation. *Evolutionary Anthropology* 5: 157–164.
- . 1996b. The Evolution of Endometrial Cycles and Menstruation. *Quarterly Review of Biology* 71: 181–220.
- . 1997. The Biology of Menstruation in *Homo sapiens*: Total Lifetime Menses, Fecundity, and Nonsynchrony in a Natural-Fertility Population. *Current Anthropology* 38: 123–129.
- Suarez, S. S. und A. A. Pacey. 2006. Sperm Transport in the Female Reproductive Tract. *Hum Reprod Update* 12: 23–37.
- Sugarman, M. und K. A. Kendall-Tackett. 1995. Weaning Ages in a Sample of American Women Who Practice Extended Breastfeeding. *Clinical Pediatrics (Philadelphia)* 34: 642–647.
- Suomi, S. J. und C. Ripp. 1983. A History of Motherless Mothering at the University of Wisconsin Primate Laboratory. In *Child Abuse: The Nonhuman Primate Data*, ed. M. Reite and N. G. Caine, 49–78. New York: Alan Liss.
- Swan, S. H., E. P. Elkin und L. Fenster. 2000. The Question of Declining Sperm Density Revisited: An Analysis of 101 Studies Published 1934–1996. *Environmental Health Perspectives* 108: 961–966.
- Sydenham, A. 1946. Amenorrhoea at Stanley Camp, Hong Kong, During Internment. *British Medical Journal* 2: 159.
- Thiery, M. 2000. Intrauterine Contraception: From Silver Ring to Intrauterine Contraceptive Implant. *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology* 90: 145–52.
- Tiemessen, C. H. J., J. L. Evers und R. S. G. M. Bots. 1995. Tight Fitting Underwear and Sperm Quality. *Lancet* 347: 1844–1845.
- Tietze, C. 1965. History of Contraceptive Methods. *Journal of Sex Research* 1: 69–85.
- Topinard, P. 1882a. La Mensuration de la Capacité du Crâne. *Revue d'Anthropologie, série 2* 5: 385–411.
- . 1882b. Le Poids du Cerveau d'après les Registres de Paul Broca. *Revue d'Anthropologie, série 2* 5: 1–30.
- Treloar, N. E., R. E. Boynton, B. G. Behn und B. W. Brown. 1967. Variation of the Human Menstrual Cycle Through Reproductive Life. *International Journal of Fertility* 12: 77–126.

- Trevathan, W. R. 2007. Evolutionary Medicine. *Annual Review of Anthropology* 36: 139–154.
- Trinkaus, E. 1984. Neandertal Public Morphology and Gestation Length. *Current Anthropology* 25: 509–513.
- Trussell, J. 2011. Contraceptive Failure in the United States. *Contraception* 83: 397–404.
- Tummon, I. S. und D. Mortimer. 1992. Decreasing Quality of Semen. *British Medical Journal* 305: 1228–1229.
- Tycko, B. und A. Efstratiadis. 2002. Genomic Imprinting: Piece of Cake. *Nature* 417: 913–914.
- Tyler, E. T. 1953. Physiological and Clinical Aspects of Conception. *Journal of the American Medical Association* 153: 1351–1356.
- Udry, J. R. und N. M. Morris. 1967. Seasonality of Coitus and Seasonality of Birth. *Demography* 4: 673–679.
- . 1968. Distribution of Coitus in the Menstrual Cycle. *Nature* 220: 593–596.
- . 1977. The Distribution of Events in the Human Menstrual Cycle. *Journal of Reproduction & Fertility* 51: 419–425.
- Vandenberg, L. N., I. Chahoud, J. J. Heindel, V. Padmanabhan, F. J. R. Paumgartten und G. Schoenfelder. 2010. Urinary, Circulating, and Tissue Biomonitoring Studies Indicate Widespread Exposure to Bisphenol A. *Environmental Health Perspectives* 118: 1055–1070.
- van Os, J. L., M. J. de Vries, N. H. den Daas und L. M. K. Lansbergen. 1997. Longterm Trends in Sperm Counts in Dairy Bulls. *Journal of Andrology* 18: 725–731.
- Vennemann, M. M., T. Bajanowski, B. Brinkmann, G. Jorch, K. Yücesan, C. Sauerland, E. A. Mitchell und die GeSID Study Group. 2009. Does Breastfeeding Reduce the Risk of Sudden Infant Death Syndrome? *Pediatrics* 123: e406–e410.
- Viterbo, P. 2004. I Got Rhythm: Gershwin and Birth Control in the 1930s. *Endeavour* 28: 30–35.
- Vitzthum, V. J. 1994. Comparative Study of Breastfeeding Structure and Its Relation to Human Reproductive Ecology. *Yearbook of Physical Anthropology* 37: 307–349.
- von Holst, D. 1974. Social Stress in the Tree-Shrew: Its Causes and Physiological and Ethological Consequences. In *Prosimian Biology*, hrsg. von R. D. Martin, G. A. Doyle, and A. C. Walker, 389–411. London: Duckworth.
- Waldinger, M. D., P. Quinn, M. Dilleen, R. Mundayat, D. H. Schweitzer und M. Boolell. 2005. A Multinational Population Survey of Intravaginal Ejaculation Latency Time. *Journal of Sex Medicine* 2: 492–497.
- Wang, Y. S. und S. Y. Wu. 1996. The Effect of Exclusive Breastfeeding on Development and Incidence of Infection in Infants. *Journal of Human Lactation* 12: 27–30.
- Weaver, T. D. und J.-J. Hublin. 2009. Neandertal Birth Canal Shape and the Evolution of Human Childbirth. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 106: 8151–8156.
- Wehr, T. A. 1991. The Durations of Human Melatonin Secretion and Sleep Respond to Changes in Daylength (Photoperiod). *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 73: 1276–1280.
- . 2001. Photoperiodism in Humans and Other Primates: Evidence and Implications. *Journal of Biological Rhythms* 16: 348–364.
- Wehr, T. A., H. A. Giesen, D. E. Moul, E. H. Turner und P. J. Schwartz. 1995. Suppression

- of Men's Responses to Seasonal Changes in Day-Length by Modern Artificial Lighting. *American Journal of Physiology* 269: R173–R178.
- Weigel, R. M. und M. M. Weigel. 1989. Nausea and Vomiting of Early Pregnancy and Pregnancy Outcome: A Meta-analytical Review. *British Journal of Obstetrics & Gynaecology* 96: 1312–1318.
- Weiss, K. 2004. The Frog in Taffeta Pants. *Evolutionary Anthropology* 13: 5–10.
- Westoff, C. F. 1976. The Decline of Unplanned Births in the United States. *Science* 91: 38–41.
- Whitcome, K. und D. E. Lieberman. 2007. Fetal Load and the Evolution of Lumbar Lordosis in Bipedal Hominins. *Nature* 450: 1075–1078.
- White, D. R., E. M. Widdowson, H. Q. Woodard und J. W. T. Dickerson. 1991. The Composition of Body Tissues (II). Fetus to Young Adult. *British Journal of Radiology* 64: 149–159.
- Wickings, E. J. und E. Nieschlag. 1980. Seasonality in Endocrine and Exocrine Function of the Adult Rhesus Monkey (*Macaca mulatta*) Maintained in a Controlled Laboratory Environment. *International Journal of Andrology* 3: 87–104.
- Wilcox, A. J., D. D. Baird, D. B. Dunson, D. R. McConaughey, J. S. Kesner und C. R. Weinberg. 2004. On the Frequency of Intercourse Around Ovulation: Evidence for Biological Influences. *Human Reproduction* 19: 1539–1543.
- Wilcox, A. J., D. Dunson und D. D. Baird. 2000. The Timing of the »Fertile Window« in the Menstrual Cycle: Day Specific Estimates from a Prospective Study. *British Medical Journal* 321: 1259–1262.
- Wilcox, A. J., C. R. Weinberg, J. F. O'Connor, D. D. Baird, J. P. Schlatterer, R. E. Canfield, E. G. Armstrong und B. C. Nisula. 1988. Incidence of Early Loss of Pregnancy. *New England Journal of Medicine* 319: 189–194.
- Williams, G. C. und R. M. Nesse. 1991. The Dawn of Darwinian Medicine. *Quarterly Review of Biology* 66: 1–22.
- Williams, M., C. J. Hill, I. Scudamore, B. Dunphy, I. D. Cooke und C. L. R. Barratt. 1993. Sperm Numbers and Distribution Within the Human Fallopian Tube Around Ovulation. *Human Reproduction* 8: 2019–2026.
- Wittmann, M., J. Dinich, M. Meroow und T. Roenneberg. 2006. Social Jetlag: Misalignment of Biological and Social Time. *Chronobiology International* 23: 497–509.
- Wolf, D. P., W. Byrd, P. Dandekar und M. M. Quigley. 1984. Sperm Concentration and the Fertilization of Human Eggs In Vitro. *Biology of Reproduction* 31: 837–848.
- Wolff, P. H. 1968a. The Serial Organization of Sucking in the Young Infant. *Pediatrics* 42: 943–956.
- . 1968b. Sucking Patterns of Infant Mammals. *Brain Behavior & Evolution* 1: 354–367.
- Wood, J. W. 1989. Sperm Longevity. *Oxford Reviews of Reproductive Biology* 11: 61–109.
- Wood, S., A. Quinn, S. Troupe, C. Kingsland und I. Lewis-Jones. 2006. Seasonal Variation in Assisted Conception Cycles and the Influence of Photoperiodism on Outcome in In Vitro Fertilization Cycles. *Human Fertility* 9: 223–229.
- Work Group on Breastfeeding. 1997. Breastfeeding and the Use of Human Milk. *Pediatrics* 100: 1035–1039.

- World Health Organisation. 1985. Appropriate Technology for Birth. *Lancet* 326: 436–437.
- Wright, L. E. und H. P. Schwarcz. 1998. Stable Carbon and Oxygen Isotopes in Human Tooth Enamel: Identifying Breastfeeding and Weaning in Prehistory. *American Journal of Physical Anthropology* 106: 1–18.
- Yang, C. P. 1993. History of Lactation and Breast Cancer Risk. *American Journal of Epidemiology* 138: 1050–1056.
- Yoshida, Y. 1960. Studies on Single Insemination with Donor's Semen. *Journal of the Japanese Obstetrics & Gynecology Society* 7: 19–34.
- Young, S. M., D. C. Benyshek und P. Lienard. 2012. The Conspicuous Absence of Placenta Consumption in Human Postpartum Females: The Fire Hypothesis. *Ecology of Food & Nutrition* 51: 198–217.
- Zalko, D., C. Jacques, H. Duplan, S. Bruel und P. Perdu. 2011. Viable Skin Efficiently Absorbs and Metabolizes Bisphenol A. *Chemosphere* 82: 424–430.
- Zeilmaker, G. H., A. T. Alberda, I. Vangent, C. M. P. M. Rijkmans und A. C. Drogendijk. 1984. 2 Pregnancies Following Transfer of Intact Frozen-Thawed Embryos. *Fertility & Sterility* 42: 293–296.
- Zhang, X., C. Zhu, H. Lin, Q. Yang, Q. Ou, Y. Li, Z. Chen, P. Racey, S. Zhang und H. Wang. 2007. Wild Fulvous Fruit Bats (*Rousettus leschenaulti*) Exhibit Human-like Menstrual Cycle. *Biology of Reproduction* 77: 358–364.
- Ziegler, E. E., A. M. O'Donnell, S. E. Nelson und S. J. Fomon. 1976. Body Composition of the Reference Fetus. *Growth* 40: 329–341.
- Zimmer, C. 2009. On the Origin of Sexual Reproduction. *Science* 324: 1254–1256.
- Zinaman, M., E. Z. Drobnis, P. Morales, C. Brazil, M. Kiel, N. L. Cross, F. W. Hanson und J. W. Overstreet. 1989. The Physiology of Sperm Recovered from the Human Cervix: Acrosomal Status and Response to Inducers of the Acrosome Reaction. *Biology of Reproduction* 41: 790–797.
- Zorn, B., J. Auger, V. Velikonja, M. Kolbezen und H. Meden-Vrtovec. 2008. Psychological Factors in Male Partners of Infertile Couples: Relationship with Semen Quality and Early Miscarriage. *International Journal of Andrology* 31: 557–564.
- Zukerman, Z., L. J. Rodriguez-Rigau, K. D. Smith und E. Steinberger. 1977. Frequency Distribution of Sperm Counts in Fertile and Infertile Males. *Fertility & Sterility* 28: 1310–1313.

