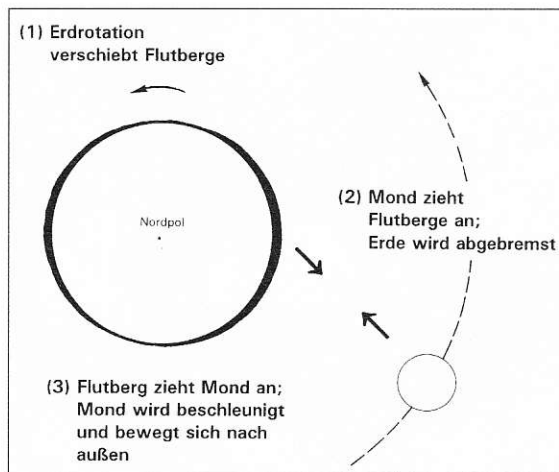


Abb. 3: Flutberge liegen nicht auf der Linie Erde – Mond. Dies führt mit der Zeit zu einer Abbremsung der Erde. Die Kräfte veranlassen den Mond, sich von der Erde zu entfernen.



auch hier wirft eine detailliertere Betrachtung neue Fragen auf.

Kollisionstheorie. Die von W.K. HARTMANN entworfene und unter Führung von A.G.W. CAMERON vom Center for Astrophysics in Cambridge, Massachusetts weitergeführte Hypothese besagt, daß der Mond durch den Zusammenstoß eines Körpers mit der Protoerde entstanden sein könnte. Seit Mitte der achtziger Jahre wird diese Theorie von den meisten Planetenforschern favorisiert. Demnach kollidierte ein Körper von der Größe des Mars mit der noch jungen Erde. In beiden Protoplaneten sollen die schweren Elemente bereits zum Zentrum abgesunken gewesen sein. Dies läßt eine Computersimulation (Abb.2) erkennen, die auch die Größenverhältnisse der Stoßpartner verdeutlicht. Die Bildfolge der Simulation zeigt die Ablösung von Mantelmateriale im Zuge eines streifenförmigen Aufpralls und läßt erkennen, wie das ausgeworfene Material sich später zum Mond geformt haben könnte. Dabei soll das schwere Kernmaterial – vorwiegend Eisen – zur Erde zurückgefallen sein, womit seine geringe Menge auf dem Mond zu erklären wäre. Diese Theorie ist in der Lage, die Befunde der Mondprobenuntersuchungen hinreichend einzuordnen, und steht zudem nicht im Kon-

flikt mit der Erdrotation. Die Rotation ist demnach durch den Zusammenprall wesentlich bestimmt worden, etwa vergleichbar mit einer angeschossenen Billardkugel. Die Ähnlichkeiten und Unterschiede des Materials von Erde und Mond lassen sich aus der Mischung von Erdmantelmateriale und Restmateriale des Eindringlings erklären. Das Fehlen volatiler Elemente auf dem Mond wäre das Ergebnis der Verdampfung beim Kollisionsprozeß.

Ergebnisse neuerer Untersuchungen. Allerdings wird dieses einigermaßen plausibel klingende Bild durch neue Forschungsergebnisse empfindlich gestört. So hat Robin CANUP, University of Colorado in Boulder, darauf hingewiesen, daß der erforderliche Stoßpartner bis zu dreimal so massiv wie Mars hätte sein müssen (HECHT 1997). Ein Marsgroßer Körper als Eindringling würde zur Bildung einer flachen Scheibe aus Trümmern des Auswurfmaterials um die Erde führen, die sich über mehrere Erdbahnradien hinaus ausdehnen würde. Darin käme es im Laufe der Zeit zur Ausbildung von kleinen Moonlets, die wiederum im Laufe von tausenden bis zehntausenden von Jahren in einer Entfernung von 3,5 Erdbahnradien zu einem einzelnen Mond koagulieren könnten. Allerdings steht wegen der weiten Streuung der Trümmer und wegen der langen Bildungsphase nur 20 – 50% der ursprünglichen Scheibenmasse für die Mondbildung zur Verfügung. Der Rest soll in der Zwischenzeit auf die Erde zurückgefallen sein.

Selbst wenn es diesen großen Planeten in Erdnähe gegeben haben sollte und damit ausreichend viel Scheibenmateriale erzeugt worden wäre, müßte das Erde-Mond-System als Ergebnis dieser Kollisionskatastrophe ein um mehr als Faktor zwei größeres Drehmoment haben. Einen Mechanismus zum Abführen des Drehmoments zu finden, ist sicher nicht einfach.

Auswirkung rotierender Stoßpartner. Simulationen zeigten, daß nur dann genügend Materiale über die Roche-Grenze (etwa 2,9 Erdradien = ca. 18.500 Kilometer) hinaus beschleunigt wird, wenn der Einschlag streifend und mit einem Drehimpulsübertrag erfolgt, der nahezu doppelt so groß ist, wie der Drehimpuls des heutigen Erde-Mond-Systems (bei frontalem Zusammenstoß ist der Drehimpulsübertrag null). Innerhalb der Roche-Grenze kann sich wegen der starken Gezeitenkräfte kein großer Körper bilden.

Shigeru IDA, Robin CANUP und Glen STEWART von der University of Colorado in Boulder (IDA et al. 1997) zeigten in Simulationsexperimenten, daß in unterschiedlichen Staubscheiben der Mond jeweils knapp jenseits der Roche-Grenze entstand. Da der Mond heute aber durchschnittlich mehr als 380.000 Kilometer von der Erde entfernt ist, muß er von ihr weggewandert sein. Dies erscheint zumindest nicht unmöglich, da die Gezeitenrei-

Tab. 1: Bewertungstabelle für die Mond-Entstehungstheorien nach Kriterien von John A. WOOD vom Smithsonian Astrophysical Observatory in Cambridge.
1 = beste Übereinstimmung
6 = Kriterium durchgefallen
– = keine Angabe möglich (unvollständige Arbeit)
() = Werte sind nach WOOD kein entscheidendes Kriterium

Bewertungsparameter	Abspaltung	Gekoppelte Akkretion	Einfang	Kollision
Masse des Mondes	4	2	2	–
Drehmoment Erde-Mond	6	6	3	2
Fehlen volatiler Elemente	2	3	3	2
Fehlen lunaren Eisens	1	4	6	–
Übereinstimmung mit Sauerstoffisotopen der Erde	1	1	2	2
Möglichkeit für Magma-Seen	1	3	4	1
Physikalische Plausibilität	6	3	4	1
Übereinstimmung für Spurenelemente für Mantel	(4)	(4)	(3)	(3)
Gesamtbewertung	3,1	3,2	3,2	1,9

bung dem Erde-Mond-System Energie entzieht, was dazu führt, daß sich unser Trabant um vier Zentimeter pro Jahr von der Erde entfernt. Dieses Prinzip ist in Abb. 3 skizziert. Schwieriger zu erklären ist ein weiteres Ergebnis der Simulationen: In fast allen Fällen sind die entstehenden Monde kleiner als der Erdmond. Nur in wenigen Fällen, wenn die Scheibe massereich genug ist, bildet sich ein genügend großer Mond aus. Allerdings kondensierte dabei zusätzlich ein zweiter, kleinerer Mond. Den besitzt die Erde aber ganz offensichtlich nicht. In Tab. 1 wird der Versuch einer Wertung der diskutierten Mond-Entstehungstheorien nach Kriterien von John A. WOOD vom Smithsonian Astrophysical Observatory in Cambridge gegeben.

Trotz diskutierter Probleme wird man nicht bereit sein, die Kollisionstheorie einfach zu verwerfen, da alle anderen Szenarien weitaus ernste-

re Probleme mit sich bringen. Deshalb gilt weiterhin die Erkenntnis: Die Entstehung unseres Erdtrabanten war in mancherlei Hinsicht eine „schwere Geburt“.

Norbert Pailer

Literatur

- HARTMANN WK et al. (eds, 1986) Origin of the moon. Lunar and Planetary Institute.
 HECHT J (1997) The making of a Moon. New Scientist, Aug. 1997, p. 8.
 IDA S, CANUP RM & STEWART GR (1997) Lunar accretion from an impact-generated disk. Nature 389, 353-357.
 SPUDIS PD (1990) The Moon. In: BEATTY KJ & CHAIKIN A (eds) The New Solar System. Cambridge.

Neues über alte Vögel

Der Konfuzius-Vogel. 1995 wurde aus dem Nordosten Chinas der Fund eines fossilen Vogels bekannt, den man *Confuciusornis sanctus* nannte (HOU et al. 1995a,b; vgl. Studium Integrale Journal 3(1996), 42). Der Fund stammt aus Süßwasserablagerungen der unteren Kreide, ist also nur wenig jünger als die nur aus marinen Ablagerungen Deutschlands bekannten *Archaeopteryx*-Fossilien (von denen inzwischen ein achttes Exemplar gefunden wurde). Es handelt sich um den frühesten Nachweis eines Vogels mit zahnlosem Hornschnabel. Sein Körper ist von Konturfedern bedeckt, die bei *Archaeopteryx* nicht eindeutig nachzuweisen waren und zu Zweifeln an dessen Warmblütigkeit führten. Das Skelett von *Confuciusornis* ist eine mosaikartige Kombination aus „fortschrittlicher“ Schädelanatomie und *Archaeopteryx*-ähnlichen postcranialen Teilen (z.B. Becken und Finger).

Mittlerweile ist der Konfuziusvogel dabei, *Archaeopteryx* den Rang abzulaufen, was Anzahl und Erhaltungszustand der Funde betrifft. Von derselben Fundstelle in Beipiao (Liaoning, China) sind mittlerweile wohl an die hundert Exemplare gefunden worden, die mit den als *Confuciusornis* beschriebenen Exemplaren weitgehend übereinstimmen, aber auch einige Unterschiede aufweisen (PETERS 1996). Allein das Senckenbergmuseum in Frankfurt besitzt zur Zeit neun vollständige Exemplare (PETERS 1997a). Eines davon wurde bereits näher beschrieben (PETERS 1996; Abb. 1). Zwei weitere Platten lagern z.B. in Eichstätt. Die Verfügbarkeit so vieler vollständiger Funde ist geradezu als Glücksfall zu bezeichnen, da verschiedene Details auf den Platten unterschiedlich gut zu

erkennen sind. Zusätzliche, bei *Confuciusornis* nicht beschriebene Merkmale unterstreichen die Bedeutung der Funde.

Mosaikmerkmale bei *Confuciusornis* und ähnlichen Funden. Bei *Confuciusornis* liegt kein langer, reptilien-ähnlicher Schwanz vor. In der Rekonstruktionszeichnung von HOU et al. (1995b) ist der Schwanz wohl nur nach Vermutungen ergänzt worden. Die Senckenberger Exemplare haben miteinander verschmolzene Schwanzwirbel, die eine Art Pygostyl bilden, wie man es von heutigen Vögeln kennt. Es

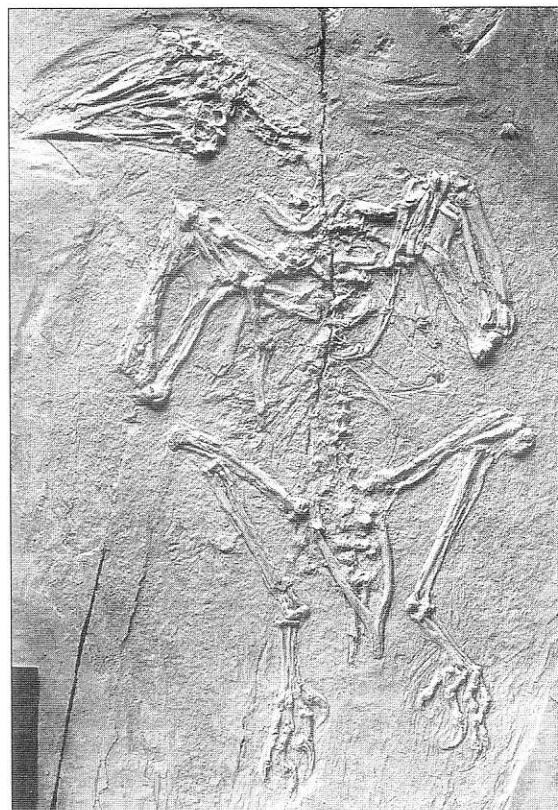
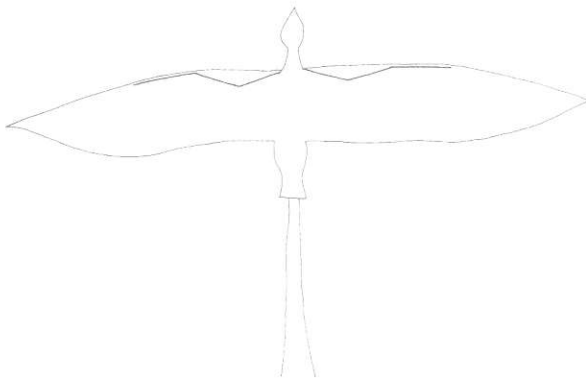


Abb. 1: Eine Platte mit dem Skelett eines Vogels aus der Unterkreide Chinas. Um die Einzelheiten besser hervortreten zu lassen, wurde sie mit Ammoniumchlorid beschichtet. Dabei werden allerdings die Federreste verdeckt. Maßstab: 4 cm. (Aus PETERS 1996, Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Autors und des Verlags)

Abb. 2: Mögliches Flugbild der Senckenberg-Fossilien (nach einer Folie von Prof. D. S. PETERS). Die ungefähre Lage der Arm- und Fingerknochen ist als Zickzack-Linie angedeutet.



ist aufgrund seines Baus nicht aus dem *Archaeopteryx*-Schwanz ableitbar.

Bei den Beinen handelt es sich offenbar um Lauf-, nicht um Kletterbeine. Man bedenke, daß viele Hypothesen zur Entstehung des Fliegens davon ausgehen, daß Vögel zunächst auf Bäume kletterten und dann eine Art Gleitflug ausführten. Bei etwa einem Viertel der untersuchten Exemplare ist ein Brustbein mit einem niedrigen Kiel in der hinteren Hälfte zu erkennen. Das Brustbein ist sehr dünn. Es könnte bei jüngeren Tieren aus Knorpel bestanden haben und nur bei sehr alten Tieren verknöchert gewesen sein. Das würde erklären, warum man es nicht bei allen Exemplaren findet. Auch bei heutigen Vögeln verknöchert das Brustbein relativ spät in der Entwicklung. Brustbein und Brustbeinkiel spielen als Ansatzstellen für die Flugmuskulatur eine wesentliche Rolle für die Flugfähigkeit der Vögel.

Am Flügel findet man zwei getrennte Gelenkachsen, die eine Verschiebung der Knochen gegeneinander bewirken, wodurch sich wie bei heutigen

Vögeln eine mechanische Kopplung von Ellbogen- und Handwurzelgelenk ergeben mußte; eine Einrichtung, die nach PETERS (1997a, b) nur Sinn ergibt, wenn der Vogel flugfähig war. Drei recht lange, getrennte Finger waren vermutlich wesentlich beweglicher als die von *Archaeopteryx*. Die ebenso langen, aber wenig gebogenen Krallen sind keine typischen Kletterkrallen (PETERS 1997a, b). Ihre Funktion ist bis-

lang unklar. Kürzlich konnten bei zahlreichen rezenten Vogelgruppen Restkrallen nachgewiesen werden, und zwar bei so unterschiedlichen Arten wie Strauß und Mauersegler (STEPHAN 1992).

Besonders interessant ist die Befiederung von *Confuciusornis* und der ähnlichen Funde: Sie besteht aus gewaltigen Schwingen, einem eher kurzen Schwanz und zwei riesigen, schmalen Schwanzfedern, die sich am ehesten als Schmuckfedern interpretieren lassen. Diese Befiederung macht eine Haltung des Vogels wie in der Rekon-

struktion von Hou et al. (1995b) unwahrscheinlich. Naheliegender wäre, einen ausdauernden Segler anzunehmen (PETERS 1997a,b; Abb. 2).

Der Daumen ist, anders als bei heutigen Vögeln, nicht befiedert. Allerdings trägt der dritte Finger möglicherweise eine eigene Serie von Schwungfedern. Man kann spekulieren, ob dadurch ein Doppeldeckereffekt entstand, der eine ähnliche Funktion erfüllte wie die Daumenschwinge. Diese dient bei heutigen Vögeln als Landeklappe und verhindert, daß der Luftstrom um den Flügel bei langsamen Geschwindigkeiten abreißt.

Die Mittelfußknochen, die den Lauf bilden, sind wie bei *Archaeopteryx* nur am oberen Ende miteinander verschmolzen. In der Ontogenese der heutigen Vögel erfolgt die Verknöcherung von unten her. Daraus folgt, daß es mindestens zwei verschiedene Entwicklungswege gegeben haben muß, die zum einen zu *Confuciusornis* und zum anderen zu den heutigen Vögeln führten (vgl. Abb. 4).

Ob alle Exemplare zur gleichen Art gehören, ist nicht klar. Sie wurden jedenfalls in großen Mengen gefunden, öfter z.B. 2-3 vollständige Exemplare auf derselben Platte. Einige Merkmale sind bei den Senckenberg-Exemplaren (und *Confuciusornis*?) einzigartig; sie kommen weder bei *Archaeopteryx* noch bei heutigen Vögeln vor. Daneben wurden auch Vögel gefunden, die einen vollständig verschmolzenen Lauf und ein Brustbein mit einem über die Gesamtlänge verlaufenden Kiel aufweisen.

Liaoningornis. Ein Jahr nach *Confuciusornis* wurde ein weiterer Fund aus denselben Schichten in China beschrieben, der nach dem Fundort *Liaoningornis* benannt wurde (Hou et al. 1996). Er unterscheidet sich deutlich von seinem „Zeitgenossen“ *Confuciusornis*. Er ist ebenfalls befiedert und seine Füße sind wie bei *Confuciusornis* für das Umgreifen von Ästen angepaßt, doch besaß *Liaoningornis* einen bezahnten Kiefer wie Reptilien, während *Confuciusornis* einen Hornschnabel hatte. Die Anpassungen an den Flug waren dagegen wiederum „moderner“ als bei *Confuciusornis*. Das Brustbein ist gut entwickelt und hat einen Brustbeinkiel als Ansatzstelle für die Flugmuskeln. Zusammen mit einem weiten und verstärkten Brustkorb spricht dies dafür, daß *Liaoningornis* Luftsäcke und ein gut ausgebildetes Atmungssystem wie heutige Vögel besaß.

Ein Nestling aus der Unterkreide Spaniens. Als besonders aufschlußreich erwies sich auch ein 1997 veröffentlichter Fund eines fossilen Jungvogels. Es handelt sich dabei um die Überreste eines Nestlings aus Schichten der Unterkreide Nord-Spaniens (Pyrenäen, Abb. 3), welche mit 135 Millionen Jahren nur um 10 Millionen Jahre jünger als *Archaeopteryx* datiert wurden. Erste Untersuchungen ergaben, daß das Wachstum nestjunger Vögel damals nach dem gleichen Schema ablief wie es bei heuti-



Abb. 3: Fossile Überreste eines Nestlings aus der Unterkreide Spaniens zeigen u. a. „moderne“ Merkmale. (Aus SANZ et al. 1997, Abdruck mit freundlicher Genehmigung)