

# 40 m lang und 100 t schwer Der Gigantismus der sauropoden Dinosaurier

*Die Größe ist eines der herausstechenden Merkmale der Dinosaurier. Insbesondere die Gruppe der Langhalsosaurier, der Sauropoden, hat in dieser Hinsicht absolute Superlative hervorgebracht. Allerdings sind die Gründe für dieses Riesenwachstum und die Frage, wie diese Giganten biomechanisch und physiologisch funktionierten, bisher nur unbefriedigend erforscht. Eine neue Forschergruppe der DFG, an der in einem interdisziplinären Ansatz Paläontologen, Physiologen, Biomechaniker, Materialwissenschaftler und Zoologen von sieben Universitäten in drei Ländern beteiligt sind, soll nun mehr Licht in diese Fragen bringen.*

## **Die größten Landwirbeltiere der Erdgeschichte**

Bei dem Namen „Dinosaurier“ denkt selbst der Laie unwillkürlich an riesige Geschöpfe – und wirklich lassen viele dieser Tiere selbst die größten heutigen Landbewohner, Elefanten und Giraffen, wie Zwerge aussehen. Körperlängen von über zehn Metern, Gewichte, bei denen fünf Tonnen und mehr keine Seltenheit sind, beflügeln die Fantasie und sprengen in vielerlei Hinsicht oft unsere Vorstellungskraft. Doch selbst unter den großen Dinosauriern gibt es noch gewaltige Unterschiede. Obwohl viele verschiedene Entwicklungslinien riesige Vertreter hervorgebracht haben, erreichen die größten Tiere höchstens bis zu zehn Tonnen Gewicht. Nur eine Gruppe sticht hier nochmals besonders hervor: Die Sauropoden scheinen bei zehn Metern Länge und etwa acht Tonnen Gewicht gerade erst anzufangen, und ihre größten Vertreter erreichten geradezu unvorstellbare Ausmaße von vermutlich über einhundert Tonnen Gewicht. Derartige Rekorde liegen tatsächlich schon nahe am Limit dessen, was für landlebende Wirbeltiere theo-

retisch überhaupt möglich erscheint; die Gewichtsgrenze dieser Tiere ist anhand von physiologischen und biomechanischen Untersuchungen bei etwa einhundertfünfzig Tonnen Gewicht anzunehmen (HOKKANEN 1986).

Die oft gestellte Frage, welcher Dinosaurier denn nun der größte war, ist übrigens schwer zu beantworten. Dies liegt zum einen daran, dass von den größten Tieren meist nur Fragmente gefunden werden, zum anderen aber auch daran, dass offenbar verschiedene Gruppen der Sauropoden unabhängig voneinander extreme Giganten von ähnlichen Ausmaßen hervorgebracht haben. So dürften die längsten Sauropoden vermutlich bei den Diplodociden zu suchen sein, so etwa *Seismosaurus*, der vermutlich 40 m oder mehr in Länge erreichte, während die höchsten Sauropoden eher bei den Brachiosauriden zu finden sind, bei denen einzelne Knochen darauf hindeuten, dass die größten Tiere ihren Kopf in Höhen von 17 m oder mehr trugen. Was den Rekord in Hinsicht auf das Körpergewicht angeht, so ist der Titanosaurier *Argentinosaurus* mit geschätzten 100-120 t



ein heißer Kandidat (Abb. 1), obwohl es gerade innerhalb der Titanosaurier mehrere gigantische Vertreter gibt.

### Das Problem des Gigantismus

Die Körpergröße beeinflusst die Biologie eines Lebewesens ganz gewaltig – vom Wachstum über die Biomechanik und die Physiologie bis hin zur Reproduktion. Warum das so ist, wird verständlich, wenn man sich eine einfache mathematische Relation vor Augen führt: Ein Volumen wächst im Kubik, während eine Fläche (also etwa ein Querschnitt einer dreidimensionalen Struktur) nur im Quadrat zunimmt. Somit wächst also bei zunehmender Größe eines Tieres das Gewicht rascher als etwa der Querschnitt der Knochen, die dieses Gewicht zu tragen haben, oder jener der Luftröhre und der Blutgefäße, die die Gewebe versorgen müssen. Auch die Kraft eines Muskels ergibt sich hauptsächlich aus seinem Querschnitt. Man kann also ein kleines Tier nicht einfach skaliert vergrößern, weil eine Größenzunahme in vielen Organsystemen Umbauten erfordert, um die Lebensfunktionen weiter zu garantieren.

Somit stellt sich in Bezug auf die extreme Größe vieler Sauropoden die Frage, wie diese Tiere überhaupt funktionieren konnten. Wie konnten sie sich fortbewegen? Wie schafften sie es, einen ausreichenden Blutdruck zu erzeugen, um den gewaltigen Körper mit Blut zu versorgen, ohne dass dabei die feinen Äderchen, etwa die Kapillaren im Gehirn, unter diesem Druck platzten? Wie überwandten die Riesen den gewaltigen Totraum ihrer teilweise zehn Meter langen Luftröhre, um dennoch frische Luft in die Lungen zu kriegen?

Obwohl die gigantischen Sauropoden seit mehr als hundert Jahren der Wissenschaft bekannt sind, sind viele dieser Fragen bisher immer noch nicht befriedigend beantwortet. Ein Problem dabei ist natürlich, dass es sich um eine nachkommenlos ausgestorbene Gruppe handelt, so dass wir nur auf ihre überlieferten Knochen und Vergleiche mit heutigen großen Tieren angewiesen sind. Darüber hinaus können uns aber natürlich auch ihre nächsten le-

benden Verwandten (Krokodile und Vögel) wichtige Daten liefern.

### Problemlösungen für Multitonnen-Giganten

In den siebziger Jahren setzte sich die Erkenntnis durch, dass unsere alten Vorstellungen von den Sauropoden als amphibische Lebewesen, die ihr Gewicht praktisch nur im Wasser stehend tragen konnten, falsch ist und es sich bei dieser Gruppe durchaus um Bewohner des festen Landes handelte. Biomechanische Untersuchungen unterstützen diese Erkenntnis: Die Beine der Giganten waren nicht nur durchaus in der Lage, das enorme Gewicht zu stützen und zu bewegen, sondern, in einigen Gruppen, sogar stark genug, eine kurzzeitige zweibeinige Position auszuhalten (ALEXANDER 1989). Weitere Unterstützung kam von der Untersuchung fossiler Fußspuren, die zeigen, dass Sauropoden sich zwar normalerweise langsam, aber doch effektiv auf dem trockenen Land fortbewegen konnten (siehe UPCHURCH et al 2004).

Eine Besonderheit der Sauropoden ist zudem die Leichtbauweise, in der insbesondere ihre Wirbelsäule verwirklicht ist (Abb. 2). Die Neuralbögen der Wirbel bestehen fast ausschließlich aus dünnen Knochenlamellen, die die hauptsächlich belasteten Regionen miteinander verbinden, und sowohl die Wirbelkörper als auch die Neuralbögen sind weitgehend ausgehöhlt und der eigentliche Knochen nur auf dünne Knochenwände beschränkt. Schon lange hatten Wissenschaftler vermutet, dass diese Hohlräume luftgefüllt gewesen sind, und diese Vermutung wurde in letzter Zeit von mehreren detaillierten Untersuchungen bestätigt (z. B. WEDEL 2003).

Dies hat natürlich eine Auswirkung auf unsere Gewichtsschätzungen von Sauropoden: Bei einer üblichen Methode wird das Körpervolumen der Tiere



Abb. 1: Vorderbeine und vorderer Rückenwirbel eines der größten Sauropoden, *Argentinosaurus*, aus der Kreide Patagoniens im Museo Paleontológico Egidio Feruglio in Trelew, Argentinien.

Foto: K. Remes.

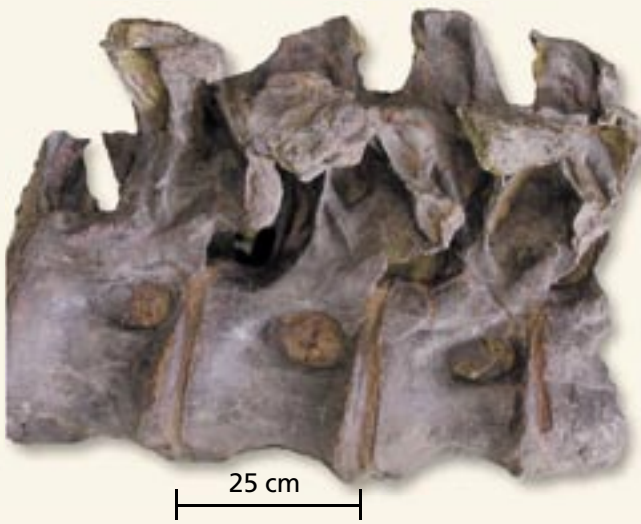


Abb. 2: Leichtbauweise der Wirbel der Sauropoden, am Beispiel von Rückenwirbeln von *Tehuelchesaurus*. Deutlich erkennbar sind die großen Öffnungen in den Wirbelkörpern, die in große Hohlräume im Inneren des Wirbels führen, sowie das Leistensystem des Neuralbogens.

oder Reptilienlunge. Sollten die Hohlräume in den Knochen der Sauropoden auch auf eine solche Durchstromlung hinweisen, wie es einige Forscher vermuten (z. B. PERRY & REUTER 1999), so würde dies gleich mehrere Probleme lösen, so z.B. die Frage nach einer effektiven Versorgung des Körpers mit Sauerstoff oder das Problem des zu überwindenden Totraumes in der Luftröhre beim Atmen. Zudem würde ein solches

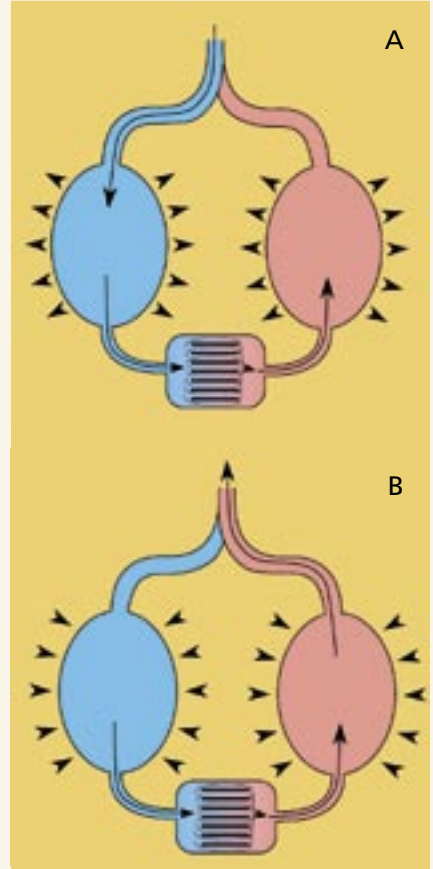


Abb. 3: Prinzip der Durchstromlung der Vögel beim ein- (A) und ausatmen (B). Die Luftsäcke (Ovale) werden ventilert, der Luftstrom passiert die Lunge nur in eine Richtung und führt immer frische Luft (hellblau).

ermittelt und dann mit der angenommenen durchschnittlichen Dichte des Gewebes multipliziert, um das Gewicht zu erlangen (z. B. ALEXANDER 1989). Früher wurde dabei normalerweise die Dichte von Krokodilgewebe (etwa  $1\text{g/cm}^3$ ) zu Grunde gelegt. Das ermittelte Gewicht sinkt jedoch deutlich, wenn man, aufgrund eines hohen Anteiles luftgefüllter Knochen, wie er etwa bei heutigen Vögeln vorkommt, eine niedrigere Dichte annimmt, wie etwa  $0,8\text{-}0,9\text{g/cm}^3$ , was der durchschnittlichen Dichte des Gewebes vieler Vögel entspricht. Somit waren viele der Giganten vermutlich deutlich leichter, als man früher angenommen hat.

Die luftgefüllten Knochen könnten auch noch einen Hinweis für die Lösung eines anderen Rätsels geben – das der Atmung der Sauropoden. Bei den Vögeln sind diese Hohlräume direkt mit der Lunge verbunden, von der noch weitere, große Luftsäcke ausgehen, die eine wichtige Rolle bei der Atmung spielen. Vögel haben nämlich eine im heutigen Tierreich einmalige Durchstromlung: Durch ein ausgeklügeltes Luftsacksystem strömt die Luft immer nur in eine Richtung und ist immer frisch, egal ob das Tier ein- oder ausatmet (Abb. 3). Dadurch ist die Vogelung in Hinsicht auf den Gasaustausch deutlich effektiver als etwa eine Säugetier-

Luftsacksystem natürlich auch bei anderen physiologischen Vorgängen eine große Rolle spielen, etwa beim Abführen von überschüssiger Körperwärme. Die Frage des Blutdrucks ist deutlich schwerer zu beantworten, da hier praktisch das gesamte Organsystem

aus Muskel- und Bindegewebe besteht, das nicht fossil erhaltungsfähig ist. Um überhaupt die nötige Blutmenge mit dem nötigen Druck in den Körper zu pumpen, muss das Herz dieser Titanen riesig gewesen sein. Nach einer Berechnung von GUNGA et al. (1999) muss das Herz des Berliner *Brachiosaurus* mindestens 386 kg schwer gewesen sein und in etwa 14-15 Schlägen pro Minute jeweils 17,4 l Blut in die Arterien gepumpt haben. Das gesamte Blutvolumen dieses Riesen muss demnach bei über 3600 l gelegen haben. Um zu erklären, warum insbesondere die zarten Hirnädern nicht durch den gewaltigen Blutdruck platzten, mag die heutige Giraffe als Modell dienen. Bei ihr sorgt ein so genanntes „Wundernetz“ (rete mirabile) dafür, dass sich das Blut vor dem Eindringen in die Kapillaren auf zahlreiche Blutgefäße aufteilt und dadurch abgebremst wird. Eine ähnliche Anpassung kann man somit auch für Sauropoden annehmen.

### Wie konnte es dazu kommen

Neben der Frage, wie diese Riesen biomechanisch und physiologisch funktionierten, sind natürlich auch der Ursprung und die evolutive Geschichte dieses Gigantismus von großem Interesse. Wir wissen inzwischen, dass die Dinosaurier nicht als Riesen begonnen haben; die ältesten bekannten Vertreter ihrer Stammlinie waren kleine und schlanke Tiere, wie etwa *Marasuchus* aus der mittleren Trias Argentiniens, der nur etwa 40 cm lang war und vermutlich weniger als 1 kg wog. Zudem waren diese Tiere biped, so dass die Quadrupedie bei den Sauropoden offenbar sekundär ist. Wie und warum wurden nun aus diesen kleinen, schnellen, bipeden Fleischfressern die gigantischen, quadrupeden, pflanzenfressenden Sauropoden?

Der Fossilbericht und neue Methoden der Rekonstruktion der Phylogenie der Dinosaurier haben in den letzten Jahren geholfen, einige Muster in der Evolution zu den Sauropoden zu erkennen. Auf der Entwicklungslinie der Sauropoden, bei den früher gemeinhin als „Prosauropoden“ zusammengefassten Formen, ist zunächst eine offenbar gra-

duelle Größenzunahme festzustellen, die mit der Spezialisierung auf eine herbivore Ernährungsweise einhergeht.

Dies ist an sich nichts Ungewöhnliches; generell tendieren Pflanzenfresser dazu, größer zu werden als die Fleischfresser (auch heute sind die größten landlebenden Säugetiere ausnahmslos Pflanzenfresser). Neben der Erklärung, dass Pflanzen, trotz ihres niedrigeren Energiewertes, einfacher zu erlangen sind und in größeren Mengen zur Verfügung stehen als Beutetiere und somit einfacher ein Größenwachstum erlauben, hat die Größe für Pflanzenfresser zahlreiche Vorteile: Sie bietet Schutz vor kleineren Raubtieren, ermöglicht die Erschließung von mehr Nahrungsquellen (insbesondere bei Tieren mit langen Hälsen, wie etwa den Sauropoden) und schafft Platz für große Verdauungstrakte, die zum Aufschluss der harten Pflanzennahrung von Vorteil sind.

Bei den basalen Sauropodomorphen kam es nun also zu einer Umstellung von ursprünglichen Fleischfressern, über Allesfresser, zu spezialisierten Pflanzenfressern. Mit zunehmender Größe ließen sich die ursprünglich bipeden Tiere dann auch wieder auf alle Viere nieder, bei großen basalen Formen, wie etwa dem „schwäbischen Lindwurm“ *Plateosaurus*, zunächst wohl nur zum langsamen Schreiten und Äsen, bei fortschrittlicheren Gruppen, wie den Sauropoden, dann permanent.

Damit wandelten sich natürlich auch die Extremitäten deutlich um; die Langknochen wurden massiger, streckten sich und verloren ihre ursprüngliche Krümmung. Die zunächst als Greiforgan ausgebildete Hand wurde vereinfacht und zu einer gewichtstragenden, säulenförmigen Struktur umgewandelt (Abb. 4). Schließlich kam es dann an der Basis der Sauropoden zu einer raschen Größenzunahme; schon aus dem unteren Jura sind Tiere von mehr als zehn Metern Länge und mehreren Tonnen Gewicht bekannt (Abb. 5).

Während wir bei dem „wie“ also schon einige Vorstellungen haben, ist das „warum“ natürlich ungleich schwerer zu beantworten. Viele verschiedene Erklä-



Abb. 4: Vorderbein eines basalen Sauropodomorphen und eines Sauropoden im Vergleich. Links Arm mit Greifhand von Plateosaurus (im Institut und Museum für Geologie und Paläontologie der Universität Tübingen). Rechts Säulenbein von Diplodocus (im Museum of Natural History in Denver, USA).

rungsversuche sind hier schon gemacht worden, darunter einige, die den Gigantismus auf äußere Einflüsse zurückführen (z. B. höherer Sauerstoffgehalt der Luft im Mesozoikum; besonders nährstoffreiche Pflanzen) und andere, die Besonderheiten der Dinosaurier aufzuführen (z. B. Schlüsselanpassungen wie etwa die Durchstromlung oder pathologische Überfunktion der Schilddrüse). Die Erklärungen durch äußere Einflüsse haben alle einen Schwachpunkt: Sie erklären nicht, warum nur die Sauropoden so erheblich größer waren als jegliche andere Tiere des Mesozoikums und warum ein solch extremer Gigantismus bei keiner anderen Gruppe vor-

kommt, während er bei Sauropoden offenbar eher die Regel war und sogar in verschiedenen Gruppen unabhängig voneinander zu ähnlichen Extremen führte. Somit müssen neben eventuellen äußeren Einflüssen auf jeden Fall auch innere Mechanismen bei diesem Größenwachstum eine Rolle gespielt haben.

#### Wie geht es weiter?

Obwohl somit unser Wissen und unser Verständnis der Sauropoden als lebende Organismen in den letzten Jahren und Jahrzehnten rasch zugenommen hat, bleiben viele unbeantwortete Fragen. Auf Initiative von Dr. Martin San-



Abb. 5: Ein früher Riese: Kotasaurus aus der unterjurassischen Kota Formation Indiens im Birla Science Center in Hyderabad, Indien.

Fotos, soweit nicht anders angegeben: O. Rauhut.

der vom Paläontologischen Institut der Universität Bonn ist letztes Jahr eine von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierte Forschergruppe zustande gekommen, in der zum ersten Mal das gesamte Phänomen des Gigantismus der Sauropoden und seine Evolution durch eine Integration von Daten aus der Paläontologie, der Biomechanik und der Physiologie untersucht werden wird.

Die Ansätze der insgesamt zwölf Arbeitsgruppen sind vielfältig. So untersucht z. B. Martin Sander mit seiner Gruppe an der Universität Bonn das Wachstum der Sauropoden anhand ihrer Knochenhistologie, während die Forscher um Marcus Clauss von der LMU München den Energiegehalt und die Verwertbarkeit mesozoischer Pflanzen genauer unter die Lupe nehmen, Thomas Tütken an der Universität Tübingen, der Biologie der Sauropoden mit Hilfe von Isotopenuntersuchungen der Knochen auf die Spuren zu kommen versucht, mehrere Projekte, z. B. das von Andreas Christian in Flensburg, sich mit der Biomechanik des Skeletts der Sauropoden beschäftigen und Anke Pyzalla von der Technischen Universität Wien die Knochen der Giganten aus Sicht der Materialforschung betrachtet (für eine Übersicht über alle Projekte siehe <http://www.sauropod-dinosaurs.uni-bonn.de>). Meine Arbeitsgruppe an der Bayerischen Staatssammlung für

Paläontologie und Geologie beschäftigt sich mit der detaillierten Evolution des Bauplanes der Sauropoden, von den kleinen, bipeden Formen zu den Multitonnen-Giganten. Die gerade richtig in Fahrt kommende Forschung liefert sicher interessante neue Erkenntnisse, und wir können sicher sein, dass das letzte Wort über den Gigantismus der Sauropoden noch lange nicht gesprochen ist...

### Literatur

- ALEXANDER, R. M. (1989): Dynamics of dinosaurs and other extinct giants. Columbia University Press, New York.
- GUNGA, H.-C., K. KIRSCH, J. RITTWEGER, L. RÖCKER, A. CLARKE, J. ALBERTZ, A. WIEDEMANN, S. MOKRY, T. SUTHAU, L. WEHR, W. HEINRICH & H.-P. SCHULTZE (1999): Body size and body volume distribution in two sauropods from the Upper Jurassic of Tendaguru (Tanzania). Mitteilungen aus dem Museum für Naturkunde zu Berlin, Geowissenschaftliche Reihe 2: 91-102.
- HOKKANEN, J. E. I. (1986): The size of the largest land animal. *Journal of theoretical Biology* 118: 491-499.
- PERRY, S. F. & C. REUTER (1999): Hypothetical lung structure of *Brachiosaurus* (Dinosauria, Sauropoda) based on functional constraints. Mitteilungen aus dem Museum für Naturkunde zu Berlin, Geowissenschaftliche Reihe 2: 75-79.
- UPCHURCH, P., P. M. BARRETT & P. DODSON (2004): Sauropoda. In: WEISHAMPEL, D. B., P. DODSON & H. OSMÓLSKA (eds.): *The Dinosauria*. Second Edition. S. 259-322. University of California Press, Berkeley.
- WEDEL, M. J. (2003): Vertebral pneumaticity, air sacs, and the physiology of sauropod dinosaurs. *Paleobiology* 29: 243-255.

### Rauhut, O. : 40 meters long and 100 tons weight – gigantism in sauropod dinosaurs

The large size is one of the hallmarks of dinosaurs. Within this group, it is especially the long-necked dinosaurs, the sauropods, which reached sizes unrivalled by any other terrestrial vertebrate. However, although great progress has been made in recent years, the reasons for this gigantism and the question, how these animals functioned biomechanically and physiologically are still not fully understood. The old image of overweight, clumsy, and rather dim amphibious beasts has been replaced by the modern view of highly successful terrestrial animals that combine a remarkable light but strong anatomical construction with interesting physiological adaptations, but many aspects of sauropod biology need further elucidation. A new DFG (German Research Foundation) research unit, in which palaeontologists, zoologists, physiologists, biomechanists, and material scientists from seven universities in three different countries are united in an interdisciplinary approach, will now shed new light on these issues.



### Mitglieder der Paläontologischen Gesellschaft berichten Maus Forschung und Wissenschaft.

Der 1912 in Greifswald gegründeten Paläontologischen Gesellschaft gehören heute annähernd 1000 Paläontologen, Geologen, Biologen, Ur- und Frühgeschichtler, aber auch zahlreiche Hobbypaläontologen an. Seit 1984 wurde bereits 17-mal die Karl-Alfred-von-Zittel-Medaille der Gesellschaft an verdiente Hobbypaläontologen verliehen. Zu unserer Jahrestagung in Graz siehe auch S. 194.