

# Kapitel 1

## Einleitung

Während die Erde bis ins späte Pleistozän noch von diversen Großsäugetieren bevölkert war, teilen wir unseren Lebensraum heute mit nur noch wenigen rezenten Arten. Zu den charismatischsten und mit dem Menschen am engsten verbundenen Großsäugern zählen zweifelsfrei die Elefanten. Ursprünglich fünf Spezies umfassend, unterscheidet man heute noch zwischen dem Afrikanischen Steppenelefanten (*Loxodonta africana*), dem Afrikanischen Waldelefanten (*Loxodonta cyclotis*) und dem Asiatischen Elefanten (*Elephas maximus*) (Roca *et al.* , 2001). Die Elefanten gehören zur großen Gruppe der Proboscidea, deren Ursprünge sich auf wasserlebende Vorfahren im Eozän zurückverfolgen lassen (Shoshani, 1996). Viele einzigartige Merkmale, wie die intraabdominale Lage der Hoden und die fehlende Pleurahöhle werden heute als Anpassung an einen ehemals aquatischen Lebensraum verstanden (Gaeth *et al.* , 1999; West, 2001; West *et al.* , 2003).

Eine weitere aussergewöhnliche Charakteristik aber, nämlich die ungewöhnlich lange Trächtigkeit, die mit 22 Monaten (Meyer *et al.* , 2004) die längste im Tierreich überhaupt ist, und die damit verbundene pränatale Entwicklung, erregte erst in jüngster Zeit das wissenschaftliche Interesse. Die Gründe hierfür sind vielfältig und reichen von anatomischen Schwierigkeiten über Unwissenheit bezüglich der eigentlichen Trächtigkeitsdauer bis hin zur traditionell begründeten Ablehnung gegenüber der Zucht in Gefangenschaft. Weltweit schwindende Bestände haben jedoch dazu geführt, dass eine selbsterhaltende Population in

Menschenhand angestrebt wird. Das Verständnis der Reproduktionsbiologie des Elefanten im allgemeinen und seiner pränatale Entwicklung im besonderen sind somit von herausragender Bedeutung. Bisher stützte sich das Untersuchungsmaterial ausschliesslich auf post mortem Präparate von Elefantenföten unbestimmten Alters.

Mit der Etablierung der Ultraschalltechnik in der Reproduktionsmedizin des Elefanten durch Hildebrandt *et al.* (1998) können nun erstmals longitudinale Trächtigkeitserhebungen an lebenden Elefanten mit bekanntem Ovulationszeitpunkt durchgeführt werden. Im folgenden soll ein kurzer Abriss dieser Entwicklung gegeben werden.

## 1.1 Historische Nutzung und Verbreitung des Asiatischen Elefanten (*Elephas maximus*)

In Asien geht die Beziehung zwischen Mensch und Elefant auf eine lange Geschichte zurück. Der Elefant besitzt hier sowohl mythische als auch wirtschaftliche Bedeutung und wird vielfach künstlerisch abgebildet. Einige Stämme Indiens leiten ihre Herkunft von Elefanten ab und drücken ihre Verehrung darin aus, dass sie Opfergaben wie Bananenstauden an bekannte Elefantenwechselliegen legen (Kurt, 2001). Die Hindugottheit Ganesha, halb Mensch halb Elefant, weist ebenfalls auf eine religiöse Komponente hin.

Eine Haltung in Gefangenschaft wird schon durch 4000 Jahre alte Stempel der Hurappankultur im heutigen Pakistan belegt, welche angeseilte Elefanten zeigen (Lahiri-Choudhury, 1995). Ihre genaue Bedeutung und ihr Nutzen für den Menschen bleibt jedoch unklar. Nachfolgende Kulturen nutzten Elefanten zum Roden von Waldflächen und zum Lastentransport. Die Nachfrage an Tieren wurde nicht durch eigene Zucht, sondern durch Einfangen von wilden Elefanten gedeckt, wobei wiederum die bereits gezähmten Tiere zum Einsatz kamen. Alte Schriftstücke, wie beispielsweise die Gajasastra (6.-5. Jh. v. Chr.), beschreiben die Haltung und Pflege von Arbeitselefanten und geben detaillierte Anweisungen, wie wilde Elefanten eingefangen und gezähmt werden sollen. Aus der Gajasastra ist auch das ursprüngliche Verbreitungsgebiet wilder Elefanten in Indien bekannt (Sukumar, 1992). Im

Jahr 326 v. Chr. zog der Perserkönig Kyros gegen Alexander den Großen mit Kriegselefanten in die Schlacht. Dass er diese verlor, schien der Beliebtheit der Kriegselefanten jedoch keinen Abbruch zu tun. In den folgenden 20 Jahrhunderten wurden Elefanten immer wieder für Kriegszwecke eingesetzt. Manche Adlige der alten indischen Aristokratie besaßen bis zu 9000 Tiere. Ihre Pflege und Ausbildung wurde in der sogenannten Palasttradition von Generation zu Generation weitergegeben. Schon bald konnte die Nachfrage an Elefanten nicht mehr aus dem eigenen Wildbestand gedeckt werden, der durch Habitatszerstörung schon weitgehend verschwunden war. Es entwickelte sich ein komplexer Handel mit Elefanten, die unter anderem auch aus Sri Lanka eingeführt wurden (Sukumar, 1992).

Die Erfindung von Gewehren im 13. Jh. verdrängte die Elefanten von den Kriegsschauplätzen. Dennoch fanden sie weiter Einsatz als Lastenträger und leisteten wertvolle Dienste beim Bau von Strassen und Brücken. Mit der Kolonialisierung gingen die Palasttraditionen endgültig zu Grunde und an ihre Stelle traten die Forstbehörden, die die Elefanten als geschickte und starke Waldarbeiter einsetzten und dies in kleinerem Masstab noch immer tun. Weiterhin wurde der Bestand an Arbeitselefanten überwiegend durch Wildfänge aufrechterhalten. In einzelnen Fällen gab es zwar Geburten in Gefangenschaft, welche aber fast ausschliesslich von wilden Bullen gezeugt wurden (Deraniyagala, 1995). Teilweise lässt sich diese Situation auf volkstümlichen Aberglauben zurückführen, der beispielsweise besagt, dass züchtende Bullen ihre Stärke und Kontrollierbarkeit verlieren (Eisenberg, 1970). Die Phnong in Kambodscha hingegen glauben, dass der Besitzer einer trächtigen Elefantenkuh sterben wird (Lair, 1997). Traditionell sind auch alle in hinduistischen Tempel gehaltenen Elefanten von der Zucht ausgeschlossen. Der Hauptgrund für die fehlenden Zuchtbemühungen ist jedoch wohl in der Tatsache begründet, dass es einer großen Investition bedarf, ein Kalb bis zum arbeitstauglichen Elefanten heranzuziehen. Der Fang von wildlebenden Elefanten im Rahmen von sogenannten „kheddahs“ war im Gegensatz hierzu wesentlich zeit- und kostengünstiger (Jayewardene, 1994). Die abnehmende Beschäftigung von Elefanten in der Holzwirtschaft führte zu einem allgemeinen Rückgang der Arbeitselefantenbestände. Die „kheddahs“ welche noch bis in die 80er Jahre regelmäßig durchgeführt wurden, sind heute illegal und die demographische Struktur der in Menschenobhut

gehaltenen Elefanten hat sich zu Gunsten der älteren Tiere verschoben. Die meisten Elefantenkühe haben ihre reproduktive Phase schon überschritten und sind somit nicht mehr fortpflanzungsfähig. Insgesamt leben ca. 16 000 Elefanten in Menschenhand, von denen bis auf wenige Ausnahmen kein Bestand selbsterhaltend ist (Sukumar *et al.* , 1997).

Nach Schätzungen der Asian Elephant Specialist Group der IUCN gibt es weltweit noch ca. 37 000 wilde Asiatische Elefanten, welche weitgehend in verhältnismässig kleine, unzusammenhängende Reservate abgedrängt werden. Indien besitzt mit 23 000 bis 27 500 wilden Elefanten die weitaus größte Population, gefolgt von Myanmar mit 4000 bis 6000 Tieren (Lair, 1997). Der gezielte Abschuss von Elefantenbullen wegen ihres Elfenbeins oder wegen angerichteter Schäden in Reisfeldern und Plantagen verändert die Bestandsstruktur dahingehend, dass das Geschlechterverhältnis stark zugunsten der Weibchen verschoben ist (Kurt, 1999). Der niedrige Anteil männlicher Tiere wiederum bewirkt einen Abfall der Reproduktionsrate, da der Population nun nicht mehr ganzjährig fortpflanzungsfähige Bullen zur Verfügung stehen (Kurt, 2001). Ungebremstes Bevölkerungswachstum, andauernde politische Unruhen und Kriege führen zur Missachtung des Naturschutzes und gefährden die noch bestehenden wildlebenden Populationen (Kurt, 1999). Während das ursprüngliche Verbreitungsgebiet des Asiatischen Elefanten einst von Euphrat und Tigris in Westasien über Persien in den Indischen Subkontinent bis ins nördliche China reichte und auch Sri Lanka, Java, Sumatra und Borneo miteinschloss, ist sein Vorkommen heute auf unzugängliche Waldgebiete in Indien und Südost-Asien beschränkt. Aus Westasien, Persien, Java und dem größten Teil Chinas ist er vollständig verschwunden (Sukumar, 1992).

## 1.2 Historische Nutzung und Verbreitung des Afrikanischen Elefanten (*Loxodonta africana* und *Loxodonta cyclotis*)

Im Gegensatz zum Asiatischen Elefanten wurde der Afrikanische Elefant nie als Nutztier gehalten. Eine Ausnahme bildete der Einsatz von afrikanischen Kriegselefanten durch die Ptolomäer (3. Jh. v. Chr.) im heutigen Ägypten. Ptolomäus II genügten die mühselig im-

portierten asiatischen Elefanten nicht mehr und so sandte er eine Expedition nilabwärts, die Afrikanische Elefanten einfing und in Häfen des Roten Meeres nach Ägypten einschiffte. Indische Mahouts wurden eingestellt, um sowohl Griechen als auch Ägypter in den Umgang mit diesen großen Tieren einzuweisen. Das Projekt war erfolgreich und Ptolomäus II verfügte schliesslich über ein Elefantenheer mit 400 Führern (Denis-Huot & Denis-Huot, 2003). Seinem Beispiel folgend begannen nun auch die Karthager Elefanten, welche teils aus Indien importiert, teils im Atlasgebirge eingefangen wurden, in ihren Schlachten gegen die Römer einzusetzen. Das berühmteste Beispiel ist wohl Hannibals Zug über die Alpen im Jahre 218 v. Chr. während des zweiten Punischen Krieges. Von den 38 Kriegselefanten, die den Heereszug begleiteten, kamen jedoch nur zehn tatsächlich in Italien an.

Zum Verhängnis wurde dem Afrikanischen Elefanten jedoch nicht sein aussergewöhnlicher Einsatz im Krieg, sondern sein Elfenbein. Schon im 6. Jh v. Chr. wurde Elfenbein aus Äthiopien nach Indien exportiert (Warmintron, 1974). Nachdem die Elefantenpopulation im Atlasgebirge ausgerottet war, verlagerte sich die Jagd in die Sahara. Unter der Verwendung von Schusswaffen in der Mitte des 19. Jh. nahm der Elfenbeinhandel riesige Ausmaße an. Nach Schätzungen wurden in der Zeit zwischen 1790 und 1880 jährlich 6 500 Tiere getötet, wobei vor allem Herden in Nord- und Westafrika betroffen waren. Trotz der Einrichtung zahlreicher Nationalparks konnten die Elefanten nicht ausreichend geschützt werden. Viele Bestände wurden um 90% reduziert (Kahumbu, 2004) und das Verbreitungsgebiet des Afrikanischen Elefanten, das einst den gesamten Kontinent eingeschlossen hatte, wurde auf ein Fünftel dezimiert. Im Angesicht der drohenden Ausrottung beschloss die Mitgliedsstaaten des Washingtoner Artenschutzabkommens 1989, den Elefanten in den Anhang I der CITES-Bestimmungen aufzunehmen. Damit war auch der internationale Elfenbeinhandel verboten und die Bestände erholten sich langsam (Kahumbu, 2004).

Paradoxerweise kam es in Nationalparks in Südafrika sogar zu einer lokalen Überpopulation von Elefanten. Anders als beispielsweise in Kenya, waren die Bestände im südlichen Afrika nie in dem Mass von Wilderei betroffen. Im ältesten Nationalpark Afrikas, dem Krüger Nationalpark, gab es 1908 nach Schätzungen gerade einmal 10 Elefanten (Whyte, 2005).

Doch knapp 60 Jahre später stieg die Anzahl bereits auf über 6 500 Tiere (Whyte, 2005). Dieses Wachstum überschritt aus Sicht des South African National Parks Board (SUN-Park) die Kapazität des Parks. Elefanten sind keine Nahrungsspezialisten sondern können sich grundsätzlich alle pflanzliche Nahrung erschliessen. Mit ihren langen Rüsseln erreichen sie die oberen Baumäste und schälen Rinde vom Stamm, aber auch Sumpfpflanzen, Früchte und Gräser werden gefressen. Große Herden können bei ihrer Futtersuche so die verschiedensten Biohabitate in beträchtlichem Masse beeinflussen und anderen Spezies die Lebensgrundlage entziehen, ohne selbst davon betroffen zu sein (Botaha, 2005; Hofmeyr & Eckhardt, 2005).

Um die Population auf einem für den Park zuträglichen Niveau zu halten, wurde 1965 beschlossen, die Zahl der Elefanten auf etwa 7 000 Tiere zu beschränken. Von den drei grundsätzlichen Methoden zur Bestandsregulierung, Kontrazeption, Translokation und Abschuss („culling“), entschied sich das SUNPark für letztere. Um die Altersstruktur nicht zu verändern, wurden überzählige Tiere in den jährlich stattfindenden culls herdenweise eliminiert. In den folgenden 18 Jahren wurden auf diese Weise ca. 16 210 Elefanten getötet. Unter zunehmendem öffentlichen Druck wurden die culls 1994 wieder eingestellt. Seither ist die Elefantenpopulation des Krüger National Parks auf über 12 000 Tiere angewachsen (van Aarde *et al.*, 1999) und es finden erneut hitzige Debatten statt, wie der Bestand gemanagt werden soll. Bei einem wissenschaftlichen Workshop in Luiperdskooof, Südafrika, ausgerichtet von SUNPark, kamen im Jahr 2005 Elefantenexperten aus aller Welt zusammen, um über die weitere Vorgehensweise zu diskutieren. Bezüglich der langfristigen Auswirkungen der großen Elefantenpopulation auf das Ökosystem der Parks gab es hierbei große Kontroversen. Während einige befürchteten, dass die Elefanten den Lebensraum anderer Spezies nachhaltig negativ beeinflussen, plädierten andere dafür, der Natur ihren Lauf zu lassen und darauf zu warten, dass sich ein neues Gleichgewicht einstellt. Weitere culls wurden nicht geplant.

### 1.3 Elefanten in Nordamerika

Im Hinblick auf die Gefährdung des Elefanten in seinen Ursprungsländern, spielt die „ex situ“ Population in Menschenobhut eine immer wichtigere Rolle: während der Elefant früher in Zoo und Zirkus ein reines Ausstellungsstück war, werden heute vermehrt Zuchtprogramme zur Arterhaltung angeregt. Die Informationen über die „ex situ“ Elefantenpopulationen in Nordamerika beziehen sich überwiegend auf Angaben der European Elephant Group (EEG), die in ihren Dokumentationen den aktuellen Bestand von Elefanten in Zoologischen Gärten, Zirkussen und anderen Einrichtungen detailliert erfasst hat. Die historische Entwicklung der Elefantenhaltung in Menschenobhut in Nordamerika ist auch beispielhaft für eine ähnliche Entwicklung in Europa, auf die hier nicht gesondert eingegangen wird.

Im Jahre 1796 wurde erstmals ein Elefant nach Amerika eingeführt (Reynolds & Riddle, 2002). Es handelte sich um ein ca. 2-jähriges weibliches Jungtier aus Bengalen. Ihm folgte 1802 der erste Afrikanische Elefant und in den nächsten Jahren wurden immer wieder einzelne Tiere importiert, die in sogenannten Menagerien zusammen mit anderen exotischen Tieren zur Schau gestellt wurden. Nach dem Amerikanische Bürgerkrieg (1861 - 1865) etablierten sich größere Zirkusunternehmen, die ihre Tiere vor allem vom berühmten Tierhändler Carl Hagenbeck aus Hamburg bezogen. Allein in den Jahren 1875 - 1882 lieferte dieser rund 100 Elefanten, von denen ein Großteil an die Zirkusunternehmer Forepaugh und Barnum verkauft wurde. Anfangs genügte es dem Publikum, den unbekannt Tieren beim Fressen zuzuschauen, doch als einige Pfleger begannen, ihren Elefanten Kunststücke beizubringen, wurden diese noch beliebter. Besonderen Erfolg erzielten große Bullen mit schönen Stosszähnen. Von vielen Bullen war bekannt, dass sie zeitweise unkontrollierbar wurden und ihre Pfleger oftmals tödlich verletzten. Da ein teuer importierter Elefantebulle zu dieser Zeit jedoch mehr wert war als ein Menschenleben, blieben Konsequenzen aus. 1880 wurde im Winterquartier des Zirkus Cooper & Bailey das erste Kalb in Menschenhand ausserhalb des ursprünglichen Verbreitungsgebietes geboren. Leider sollten Elefantengeburt noch lange Zeit eher die Ausnahme bleiben. Geeignete Zuchttiere gab es zwar genug, doch da die Bullen überwiegend als gefährlich eingestuft wurden, durften sie

sich nicht frei bewegen und Paarungen fanden nur unter strenger menschlicher Kontrolle statt. Da über die Fortpflanzungsbiologie der Elefanten nur wenig bekannt war, blieben diese Bemühungen meist erfolglos. Auch in den in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts entstehenden Zoologischen Gärten waren Elefanten nurmehr publikumswirksame Ausstellungsstücke. Obwohl 1962 der Zoo in Portland eine Elefantengeburt verzeichnen konnte, hatte sich der Gedanke der Arterhaltung noch nicht durchgesetzt. Eine Ergänzung des Bestandes aus den vorwiegend asiatischen Ursprungsländern war noch problemlos möglich, was den Zuchtbemühungen nicht gerade förderlich war. Afrikanische Elefanten wurden nur selten im Zirkus gezeigt, da sie für die Dressur als ungeeigneter angesehen werden.

Nach dem Importstop für Asiatische Elefanten im Jahr 1976 änderte sich jedoch die Situation und notgedrungen wurden nun auch Afrikanische Elefanten vorgeführt. Ein Großteil davon waren verwaiste Jungtiere aus den culls in Südafrika (Wiese, 2000). Einige Zoos jedoch erkannten nach dem Importstop die Notwendigkeit, ein Zuchtprogramm ins Leben zu rufen. Die Bullen hierfür hatten meist eine Vergangenheit als Zirkuselefanten hinter sich, bevor sie wegen ihrer Unkontrollierbarkeit in Zoos abgegeben wurden. Doch auch in den Zoos kam es zu tödlichen Unfällen. Um diese zu vermeiden, bedarf es spezieller und kostspieliger Bullenanlagen mit Zwangsständen, in denen die Tiere ohne Gefahr für den Menschen gepflegt und medizinisch behandelt werden können. Nur wenige Zoos waren bereit, in solche Anlagen zu investieren. Stattdessen wurden potentiell zuchttaugliche Elefantenkühe auf sogenannte „Hochzeitsreisen“ in andere Institutionen mit Bullenhaltung verschickt. Diese Prozedur war sehr aufwendig und mit großem sozialen Stress für die Tiere verbunden, die aus ihrem vertrauten Verband herausgenommen wurden und sich anschliessend in ihrer neuen Herde behaupten mussten, bevor sie in ihren angestammten Zoo zurückkehren konnten. Auch kam es oft erst gar nicht zu einem Deckakt, da die Tiere kein Interesse aneinander zeigten (Schmidt, 1993).

Ebenso negativ für den Zuchterfolg war die Unwissenheit über das geeignete Zuchalter. Viel zu lange wurde angenommen, dass Elefanten erst ab einem Alter von 20 Jahren reproduktionsfähig seien. Dieser Irrtum ist wohl auf Beobachtungen an asiatischen Arbeitse-

lefanten zurückzuführen, die erst in einem relativ fortgeschrittenen Alter ihr erstes Kalb gebären. Inzwischen geht man davon aus, dass die harte Arbeit ein reguläres Einsetzen des Zyklus verzögert. Bei erstgebärenden Elefantenkühen mit einem Alter von über 25 Jahren im Zoo sind jedoch wiederholt lebensbedrohliche Komplikationen im Geburtsverlauf aufgetreten (Schmidt, 1993).

Heutzutage setzt sich die Ansicht durch, dass die reproduktive Phase bereits mit 10 Jahren beginnt (Schaftenaar *et al.*, 2001). Ein großer Teil des nordamerikanischen Bestandes hat sein fortpflanzungsfähiges Alter bereits überschritten und spielt für die Zucht so keine Rolle mehr. Eine jüngere Elefantengeneration, die nachrücken könnte, fehlt jedoch (Wiese, 2000). Ein anderes Problem stellt die hohe Neugeborenensterblichkeit dar, die in den Einrichtungen der American Zoo and Aquarium Association (AZA) für Asiatische Elefanten 40% beträgt (Wiese, 2000). Obwohl auch private Einrichtungen wie das Zuchtzentrum des Zirkus Ringling Brothers, Barnum & Bailey in Florida, USA, die African Lion Safari in Cambridge, Kanada oder das „Riddle’s sanctuary“ in Greenbrier, USA, sich um eigene Nachzucht bemühen, ist das Ziel einer selbsterhaltenden Elefantenpopulation in Menschenhand noch in weiter Ferne. Jährlich werden ca. 4 asiatische Kälber in Gefangenschaft geboren (Olson & Wiese, 2000). Beim Afrikanischen Elefanten ist die Geburtenrate mit 25 Kälbern im Zeitraum von 1979 bis 2000 noch um einiges niedriger (Olson & Wiese, 2000). Ohne weitere Importe wird die Population in Nordamerika weiter abnehmen (Wiese, 2000). Die letzten Importe nach Nordamerika fanden im Jahr 2003 statt. 3 männliche und 8 weibliche Tiere aus Swasiland gelangten in die Zoos von San Diego, Kalifornien und Tampa, Florida. Ein weibliches Tier aus Malaysia wurde vom Zoo in Oregon, Portland importiert.

## 1.4 Reproduktionsbiologie des weiblichen Elefanten

### 1.4.1 Anatomie des weiblichen Reproduktionstrakts

Um die Reproduktionsbiologie des Elefanten zu verstehen, muss man sich zuerst der Anatomie seiner Reproduktionsorgane zuwenden. Ausführliche Beschreibungen des Reproduktionstrakts finden sich bei Balke *et al.* (1988a,b), welche auf der Untersuchung von drei bzw. 30 weiblichen Afrikanischen Elefanten beruhen, die im Rahmen eines culls im Gonarezhou Nationalpark im Jahre 1986 getötet wurden. Eine neuere Veröffentlichung von Hildebrandt *et al.* (2000) beruht auf sonographischen Untersuchungen von ungefähr 280 Afrikanischen und Asiatischen Elefanten, die sowohl wildlebende als auch in Menschenobhut gehaltene Tiere miteinbezieht.

Als größtes lebendes Landsäugetier besitzt der weibliche Elefant auch den längsten Reproduktionstrakt (Abb. 1.1): seine Länge beträgt vom Vestibulum bis zu den Ovarien ca. 1,8 m (Balke *et al.*, 1988a,b). Aussergewöhnlich ist hierbei die anatomische Lage des Vestibulums oder besser gesagt des Urogenitalkanals, welcher sich nicht wie bei anderen Säugetieren unterhalb des Afters nach aussen öffnet, sondern, analog der Beckenflexur des männlichen Penis, am kaudalen Rand des Schambeins nach kranioventral zieht. Die Vulva befindet sich somit kaudal des Nabels. Die Länge des Urogenitalkanals beträgt nach Balke *et al.* (1988a) ca. 90 cm, nach Hildebrandt *et al.* (2000) 100 bis 140 cm. In den sackförmig erweiterten Teil des Vestibulums, der innerhalb des knöchernen Beckens liegt mündet die Urethra (Hildebrandt *et al.*, 2000). Eine weitere Analogie zum männlichen Penis sind die großen, 60 - 80 cm langen Schwellkörper der Klitoris, die zunächst ventral, nach der kranioventralen Flexur aber schliesslich dorsal in der Muskelschicht des Vestibulums verlaufen. Die Schwellkörper reichen nicht ganz bis zur Glans clitoridis, welche 7 - 12 cm lang ist und sich unterhalb der externen Öffnung des Vestibulums befindet (Perry, 1963; Hildebrandt *et al.*, 2000). Rechts und links der ca. 0,4 cm weiten schlitzförmigen Öffnung der Vagina (Abb. 1.2) in das Vestibulum befindet sich je eine 1 bis 2 cm lange Blindtasche (Abb. 1.2) Ungefähr ein Jahr nach der ersten Geburt ist die vaginale Öffnung (Abb. 1.2) ca. einen cm

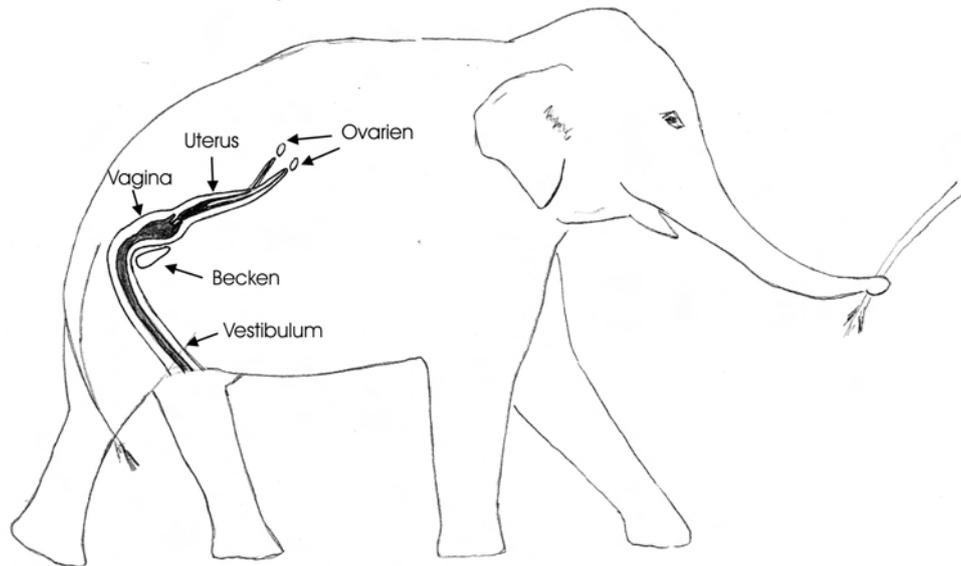


Abbildung 1.1: Weiblicher Reproduktionstrakt ex situ

weit und die Blindtaschen sind verschwunden (Hildebrandt *et al.*, 2000). Die Vagina misst ungefähr 30 x 15 x 10 cm (Hildebrandt *et al.*, 2000) und befindet sich innerhalb des Beckens. Ihre Schleimhaut ist in zahlreiche Längsfalten gelegt. Die kurze Zervix ragt mit ihrer prominenten Portio in die Vagina hinein und geht nach ca. 15 cm mit einer kleinen Öffnung in den Uteruskörper über (Perry, 1963; Hildebrandt *et al.*, 2000). Der Aufhängeapparat des Uterus ist das dicke, stark fibröse Ligamentum latum, welches sich an seinen freien Enden zusammenzieht und als fester Strang an der laterodorsalen Bauchwand zieht. Eingelagert in das Ligamentum latum befindet sich eine große Menge Fettgewebe (Allen *et al.*, 2003a). Der Uterus ist 80 - 150 cm lang, besitzt eine stark gefältete Schleimhaut und ist durch ein kurzes Corpus gekennzeichnet. Das einheitliche Uteruslumen trennt sich nach ca. 5 - 10 cm in zwei separate Lumina, die jedoch noch eine gemeinsame Uteruswand besitzen (Hildebrandt *et al.*, 2000). Nach weiteren 50 - 70 cm gehen aus dem Uteruskörper zwei Uterushörner hervor (Balke *et al.*, 1988a), welche über das Ligamentum intercornuale verbunden sind (Allen *et al.*, 2003a). Die Uterushörner haben eine Länge von ca. 50 cm und

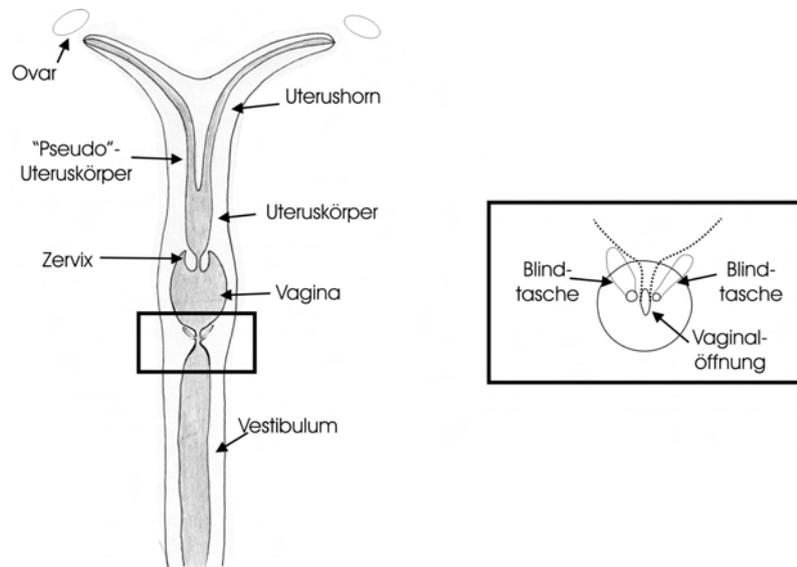


Abbildung 1.2: Weiblicher Reproduktionstrakt in situ

verjüngen sich in Richtung der Ovarien. Im Vergleich zum Uteruskörper ist die Schleimhaut der Uterushörner weniger stark gefaltet. An seinem Ende geht das Uterushorn in einen ca. 10 cm langen Eileiter über, der mit seinem weiten Infundibulum die Ovarien vollständig umhüllt und so den inneren Anteil der Bursa ovarica bildet. Der äussere Anteil der Bursa ovarica wird vom Mesovarium gebildet, in dessen Peripherie ebenfalls große Mengen Fettgewebe eingelagert sind (Perry, 1953; Allen *et al.*, 2003b). Die relativ kleinen Ovarien befinden sich kaudal der Nieren. Nach Short (1969) beträgt ihre Länge ca. 6,5 cm, ihre Höhe 3,5 cm und ihre Breite 5,5 cm. Hildebrandt *et al.* (2000) machen mit 7 cm Länge, 5 cm Breite und 3 cm Höhe ähnliche Angaben. In den Ovarien befinden sich verschiedene Funktionskörper wie Gelbkörper oder Follikel, welche eng mit dem Zyklusgeschehen verknüpft sind.

### 1.4.2 Eintritt in die Pubertät

Der Eintritt in die Pubertät markiert den Beginn der Geschlechtsreife, der durch das Einsetzen des ovariellen Zyklus gekennzeichnet ist. Zwischen der Elefantenpopulation in den Ursprungsländern Afrika und Asien und der in Zoos und ähnlichen Einrichtungen gehaltenen Population in Nordamerika und Europa scheint es diesbezüglich signifikante Unterschiede zu geben. Sukumar (1992) berichtet, dass Arbeitselefanten in Indien meist mit 18 bis 20 Jahren ihre erste Geburt haben, während wilde Elefanten bereits zwischen 10 und 12 Jahren ihr erstes Kalb zur Welt bringen. Nach Poole (1994) und Sikes (1971) werden wilde Afrikanische Elefanten ebenfalls bereits mit 10 - 12 Jahren trächtig. Die allgemeine Körperkondition und das relative Körpergewicht scheinen einen wesentlichen Einfluss auf den Eintritt der Geschlechtsreife zu haben (Kurt, 2001). So lässt sich erklären, dass in Zoos und ähnlichen Einrichtungen, in denen die Elefanten gut mit Futter versorgt werden und keine schwere Arbeit verrichten, der erste Zyklus früher durchlaufen wird als in den asiatischen Arbeitscamps. Auch Moss (2001) beobachtete in ihrer Langzeitstudie Afrikanischer Elefanten im Amboseli - Nationalpark, dass in Jahren mit geringem Nahrungsangebot die Geschlechtsreife erst mit 18 oder 19 Jahren eintritt. In Zoologischen Einrichtungen hingegen haben schon mehrfach Elefantenkühe mit unter 10 Jahren ihr erstes Kalb zur Welt gebracht (Haufellner *et al.*, 1999). Die aktuelle Empfehlung der Europäischen Erhaltungszuchtprogramms (EEP)(Schaftenaar, 1999) für den Zuchtbeginn in Zoos liegt bei 10 - 12 Jahren und entspricht damit den Beobachtungen, die an wilden Elefanten gemacht wurden.

### 1.4.3 Ovarieller Zyklus

Elefanten sind polyöstrisch und zeigen unter guten Umweltbedingungen kein saisonales Fortpflanzungsverhalten. Von einigen Populationen in Südafrika ist jedoch bekannt, dass diese nur während der Regenzeit züchten und in Phasen, in denen Dürre und Futterknappheit herrscht, lange anöstrische Phasen haben (Craig, 1984).

Wie bei anderen Säugetieren wird der Ovarzyklus des Elefanten in eine luteale Phase und

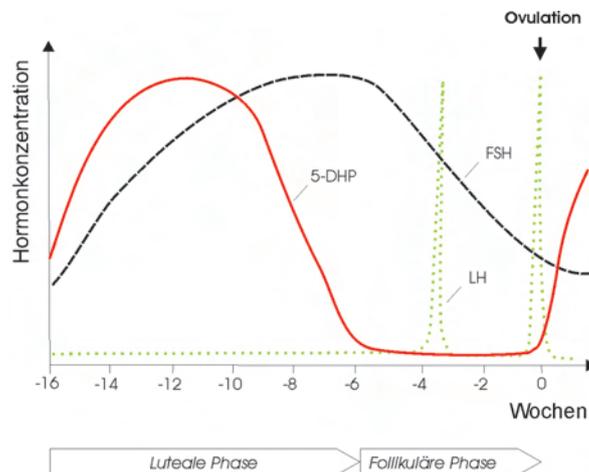


Abbildung 1.3: Schematische Darstellung des ovariellen Zyklus des Elefanten, modifiziert nach Brown (2000)

eine nicht - luteale oder follikuläre Phase eingeteilt. Mit einer lutealen Phase von 8 - 10 Wochen und einer follikulären Phase von 4 - 7 Wochen ergibt sich ein ungewöhnlich langer Zyklus von ca. 13 - 17 Wochen (Hess *et al.* , 1983; Plotka *et al.* , 1988), der längste im Tierreich überhaupt.

Das Hauptsteroid der lutealen Phase beim Elefanten ist der  $5\alpha$ -reduzierte Progesteronmetabolit  $5\alpha$ -Pregnan-3,20,-dione ( $5\alpha$ -DHP) (Heistermann *et al.* , 1997; Hodges *et al.* , 1997; Dehnhard *et al.* , 2001).  $5\alpha$ -DHP wird von Gelbkörpern ausgeschüttet, die unter LH - Einfluss aus luteinisierten Follikeln entstehen. Während der lutealen Phase wird die Schleimhaut des Eileiters und des Uterus auf die Implantation der befruchteten Eizelle vorbereitet. Bleibt die Implantation aus, gehen die Gelbkörper zu Grunde und die luteale Phase endet mit einem Abfall der  $5\alpha$ -DHP-Konzentration auf den Basiswert. Die  $5\alpha$ -DHP - Konzentration wird heute mit Schnelltests aus Blut oder Urin bestimmt und zur Zyklusüberwachung eingesetzt (Hodges, 1998; Brown, 2000). Nach einer Ultraschallstudie von Hermes *et al.* (2000) wachsen in der follikulären Phase unter dem Einfluss von Follikel stimulierendem Hormon (FSH) in einer ersten Wachstumswelle mehrere Follikel heran, welche aber nicht bis zur Ovulationsreife gelangen sondern vorher zu Grunde gehen. Erst die

zweite Follikelwachstumswelle führt zur Bildung eines Graaf'schen Follikels, der schliesslich ovuliert. Bei den meisten Säugern wird die Ovulation am Ende der folliculären Phase durch die einmalige Ausschüttung von luteinisierendem Hormon (LH) induziert. Beim Elefanten werden jedoch zwei LH - Ausschüttungen beobachtet, von denen erst die zweite zur Ovulation führt. Die erste, anovulatorische LH - Ausschüttung tritt 12 - 21 Tage nach dem Ende der lutealen Phase auf und beendet die erste Follikelwachstumswelle (Hermes *et al.*, 2000). 19 - 22 Tage nach der ersten LH - Ausschüttung tritt die zweite, ovulatorische LH - Ausschüttung auf (Kapustin *et al.*, 1996; Brown, 2000), welche die zweite Follikelwachstumswelle beendet und in der Ovulation resultiert. Die Funktion dieses hormonellen Musters ist nicht genau bekannt. Nach Hermes *et al.* (2000) könnte der anovulatorische LH - peak dafür sorgen, dass sich nur ein Follikel unter kontrollierten intraovariellen Bedingungen zum sprungreifen Graaf'schen Follikel entwickelt um Zwillingsträchtigkeiten zu vermeiden. Die mütterliche Investition in ihren Nachwuchs ist sehr groß und Zwillinge haben einen negativen Effekt auf den Geburtsablauf und den Aufzuchterfolg. Dafür spricht auch, dass Zwillingsträchtigkeiten mit weniger als 1% sowohl beim Asiatischen als auch beim Afrikanischen Elefanten sehr selten sind (Niemuller *et al.*, 1998).

Das klassische Steroid der folliculären Phase, Östradiol, besitzt mit weniger als 10 pg pro ml eine sehr niedrige Blutkonzentration. Nach Ramsay *et al.* (1981) zeigt das Östradiolprofil einen wellenförmigen Verlauf, der im drei Wochen Rhythmus ansteigt und wieder abfällt. Dieser Rhythmus wird von Chappel & Schmidt (1979), Hess *et al.* (1983) und Brown (1999) jedoch nicht bestätigt. Neuere Untersuchungen von Czkala *et al.* (2003) an Asiatischen Elefanten bekräftigen das zweiphasige Follikelwachstum (Hermes *et al.*, 2000). Jede Follikelwachstumswelle ist demnach mit einem Anstieg des Östradiolspiegels verknüpft.

Ist der ovarielle Zyklus erfolgreich, so kommt es zur Implantation der Blastozyste, die aus der befruchteten Eizelle entstanden ist. Die Gelbkörper gehen in diesem Falle nicht zu Grunde, sondern produzieren weiterhin das schwangerschaftserhaltende Hormon  $5\alpha$ -DHP. Die über dem Basiswert liegende  $5\alpha$ -DHP - Konzentration kann 12 Wochen nach der Ovulation zur Trächtigkeitsdiagnose herangezogen werden (McNeilly *et al.*, 1983; Olson

*et al.*, 1994).

## 1.5 Implantation, extraembryonale Organe und Plazentation

Die heute verfügbaren Informationen über die Implantation und Plazentation beim Elefanten beziehen sich, wie auch die Beschreibungen von Elefantenföten, zum größten Teil auf post mortem Untersuchungen Afrikanischer Elefanten. Eine der berühmtesten Veröffentlichungen wurde von Amoroso & Perry (1964) verfasst. Ihre detaillierten Beschreibungen, die auch die extraembryonalen Organe wie Allantois und Dottersack einbeziehen, beziehen sich auf Untersuchungen von sechs Afrikanischen Föten in unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Die Föten wurden aus Elefanten geborgen, die von den Jagdbehörden in Kenya und Uganda aufgrund von Beschwerden über Ernteschäden zum Abschuss freigegeben wurden (Short RV, persönl. Mitteilung). Eine Beschreibung früherer Entwicklungsstadien findet sich bei Perry (1974). Weitere Darstellungen der Plazentaentwicklung finden sich bei Allen *et al.* (2003a,b, 2005). Ihr Untersuchungsmaterial stammt aus den culls im Krüger Nationalpark während der Jahre 1993 - 1995. Die Veröffentlichungen von Cooper *et al.* (1964), Benirschke (1983) und Soma & Kawakami (1991) hingegen stützen sich auf die Untersuchung von Nachgeburten Asiatischer bzw. Afrikanischer Elefanten und beschreiben somit die geburtsreife Plazenta.

An einem extrahierten Uterus ist eine frühe Trächtigkeit als rundliche Vorwölbung sichtbar, die sich entweder in dem Teil des Uterus befindet, der bereits getrennte Lumina besitzt, oder in einem Uterushorn (Amoroso & Perry, 1964; Allen *et al.*, 2003a). Nach Amoroso & Perry nistet sich der Konzeptus dabei in eine der tiefen Schleimhautfalten ein, die vom Endometrium des Uterus gebildet werden. Die Implantation des Elefanten wird als zentral superfiziell bezeichnet (Amoroso & Perry, 1964). Über den Zeitpunkt der Implantation sind in der Literatur keine Angaben zu finden.

Bei dem Versuch von Allen *et al.*, eine frühe Trächtigkeit freizulegen, zerplatzte die Frucht-

blase und setzte einige Milliliter Flüssigkeit frei. Zurück blieb eine mit dem umliegenden Endometrium verbundene, hauchdünne Membran, die Allen *et al.* als Choriovitellinmembran bezeichnen. Mit fortschreitendem Wachstum ändert sich die Form des Konzeptus von rund nach oval, wobei er das ganze Uterushorn einnimmt. Die Trächtigkeit weitet sich jedoch niemals in das nicht - trüchtige Uterushorn aus (Allen *et al.* , 2003a).

Über das Vorhandensein eines Dottersacks und dessen zeitliches Verschwinden herrscht bis heute Unklarheit. Ein Dottersack existiert nach Amoroso & Perry nur in der frühen Trächtigkeit, bis zu einer embryonalen Masse von ca. 2 g. Der Dottersack besitzt keine Verbindung zum Chorion. Seine Wand ist jedoch mit einem Gefäßnetz überzogen, was auf das Vorhandensein einer frühen Dottersackplazenta hinweisen könnte. Perry beschreibt 1974 eine zweiblättrige, präimplantative Blastozyste, bestehend aus Tropoblast und Entoderm. Die Embryonalscheibe ist hier noch nicht sichtbar. Das nächste Entwicklungsstadium besteht aus einer dreiblättrigen Blastozyste mit deutlich sichtbarer Embryonalscheibe. Der entodermale Dottersack wird teilweise von Mesoderm überzogen. Nach Perry (1974) hat der Dottersack in einer Blastozyste mit 37 mm Durchmesser seine maximale Ausdehnung erreicht. Ein Drittel seiner Oberfläche ist von Mesoderm überzogen. In einem älteren Entwicklungsstadium, das von Perry (1974) beschrieben wird, beträgt die Länge des Embryo 20 mm. Die Chorionhöhle wird von der Allantois ausgefüllt und der Dottersack ist weitgehend zurückgebildet.

Cooper *et al.* (1964) hingegen beschreiben noch in einer von zwei untersuchten Nachgeburten eines Asiatischen Elefanten (n=2) einen persistierenden, gestielten Dottersack von 70 mm Länge, der sich in der Nähe einer der vier Umbilikalarterien befindet. Benirschke (1983) findet in den von ihm untersuchten Nachgeburten Asiatischer Elefanten (n=9) keine Überreste eines Dottersacks.

Amoroso & Perry zufolge hüllt das Amnion den Fötus eng ein und ist durch die große Allantois vom Chorion vollständig getrennt. Die Allantois besteht aus vier Säcken, die einem gemeinsamen Antrum entspringen. Die Begrenzung des Antrums wird durch vier paarige Gefäßtränge gebildet, deren Ursprung nahe des Fötus in den beiden Umbilikalarterien und

-venen liegt. Nach ihrer Aufzweigung in vier Gefäßpaare, bestehend aus je einer Vene und Arterie, verlaufen diese zwischen den duplizierten Allantoismembranen in Richtung Chorion und bilden das Allantochorion. Andere Autoren wie Cooper *et al.* (1964); Benirschke (1983) finden in der geburtsreifen Plazenta eine andere Gefäßkonstellation vor: in ihrem Untersuchungsmaterial besteht der fötusnahe Nabel aus zwei Arterien und nur einer Vene. Nach der doppelten Aufzweigung der Vene und der einfachen Aufzweigung der beiden Arterien laufen jedoch auch hier vier Gefäßpaare in die Peripherie. Der Durchmesser eines solchen Gefäßpaares wird von Benirschke mit ca. einem cm angegeben. Nach Amoroso & Perry geben die Gefäße kurz vor Erreichen der Plazenta mehrere Gefäßbüschel ab und versorgen diese so mit Blut. Das ursprüngliche Arterien- und Venenpaar verzweigt sich erst innerhalb der Plazenta in ein dichtes Kapillarnetz. Nach dem gemeinsamen Antrum teilt sich die Allantois entsprechend der Gefäße in vier ungleiche Säcke. Die großen lateralen Aussackungen ragen seitlich über die Amnionhöhle hinaus und entsprechen in ihrer Ausdehnung der Plazenta zonaria. Die kleineren Allantoissäcke bedecken jeweils den kranialen und kaudalen Pol des Embryos und treffen über seinem Rücken mit den lateralen Säcken zusammen. Allantois und Amnion bilden ein Allantoamnion, das jedoch weniger gut vaskularisiert ist als das Allantochorion oder die freien, doppelten Allantoismembranen.

Sowohl Amnion als auch Allantois besitzen spezifische Erhebungen, die amniotischen Plaques bzw. die Allantoiskörperchen, die sich jeweils von ihrer mesodermalen Seite her in die Fruchthöhlen vorwölben (Owen, 1868; Chapman, 1880; Assheton & Stevens, 1905; Amoroso & Perry, 1964; Cooper *et al.*, 1964; Benirschke, 1983; Soma & Kawakami, 1991; Allen *et al.*, 2003a). Die amniotischen Plaques sind als perlweisse Vorwölbungen sichtbar und vergrößern sich auf einen Durchmesser von maximal 0,5 mm. Ihr Kern besteht aus lockerem Mesenchym und die Oberfläche wird von ektodermalem Epithel überzogen. Die amniotischen Plaques sind mehr oder weniger gleichmässig über das gesamte Amnion verteilt. Die Allantoiskörperchen stellen sich prinzipiell ähnlich dar, sind mit einem Durchmesser von bis zu einem cm jedoch wesentlich größer und teilweise lang gestielt. Die Allantoiskörperchen finden sich vor allem entlang der Gefäße. Ihr Kern besteht ebenfalls aus mesenchymalem Gewebe. Das überziehende Epithel ist hier endodermalen Ursprungs. An der Basis der

Allantoiskörperchen treten Blutgefäße ein, die jedoch nicht bis an die Oberfläche reichen. Über die Funktion der Allantoiskörperchen ist Amoroso & Perry nichts bekannt, ausser dass sie auch bei den nächsten Verwandten der Elefanten, den Sirenia und Hyracoidea beobachtet werden. Lönnberg (1904) vermutet, dass die Allantoiskörperchen eine gewisse Rolle bei der Absonderung der Allantoisflüssigkeit haben könnten. Eine weitere Funktion könnte nach Lönnberg auch in einer Abpolsterung der Gefäße bestehen, die so durch den schweren Fötus nicht zusammengedrückt werden können.

Die Plazenta beschreiben Amoroso & Perry als Gürtelplazenta, welche den Konzeptus äquatorial umschliesst. Das Plazentaband ist bei manchen Föten an zwei bis drei Stellen durch häutiges Allantochorion unterbrochen und besitzt nicht überall die gleiche Breite.

Histologisch lässt sich die Plazenta nach Amoroso & Perry in drei unterschiedliche Zonen einteilen. Die fötusnahe Zone I bildet das Plazentalabyrinth. Synzythische Trophoblastlamellen trennen endometriales und fötales Stroma, in welches mütterliche bzw. fötale Kapillaren ziehen. Die Lamellen verzweigen sich im weiteren Verlauf der Trächtigkeit mehr und mehr und bilden untereinander Anastomosen. Auch nimmt der Anteil des Stromagewebes ab, so dass die mütterlichen und fötalen Kapillaren nurmehr durch den Trophoblast getrennt sind. Da auf der mütterlichen Seite kein Epithel mehr vorhanden ist, wird der Plazentatyp nach Grosser (1927) als endotheliochorial bezeichnet und grenzt sich somit von der hämochorialen Plazenta von Procavia und Sirenia ab (Amoroso & Perry, 1964). Die darunterliegende Zone II erreicht nicht die laterale Ausdehnung von Zone I. Sie besteht ebenfalls aus Plazentalabyrinth, die Trophoblastzellen bilden hier jedoch kein Synzytium sondern sind zellulär und dringen aktiv in die endometriale Schleimhaut ein. Amoroso & Perry zufolge schliessen sie dabei nicht die uterinen Drüsen ein, wie dies beim Hund der Fall ist. Zone III schliesslich befindet sich unter den lateralen Anteilen von Zone I und setzt sich wie diese aus labyrinthartig angeordneten Trophoblastzellen und Kapillaren zusammen, welche an der mütterlichen Seite jedoch frei enden und Blutlakunen einschliessen.

Allen *et al.* (2003a) beschreiben die Entwicklung der Plazenta wie folgt: während der sehr frühen Trächtigkeit, in der noch kein Embryo nachgewiesen werden kann, legt sich der Tro-

phoblast eng an das Epithel des Endometriums an. Die Trophoblastzellen beginnen dann, sich fingerartig zwischen das endometriale Epithel und Stroma einzuschieben, so dass sich das Epithel schliesslich löst. Das endometriale Stroma, welches kleine Kapillaren mit sich führt, wächst nun seinerseits auf den Trophoblast zu und stülpt diesen lumenwärts. Bei etwas fortgeschrittenerer Trächtigkeiten, bei denen schon Föten mit einer Masse von 1,6 bzw. 2,0 g entwickelt sind, ist die Plazenta als 3 cm breiter Ring mit bloßem Auge zu erkennen. Hier sind die Trophoblast umkleideten Stromalamellen noch weiter lumenwärts gewachsen und beginnen, sich an ihren freien Enden zu verzweigen, ähnlich wie die Mikrocotyledonen des Pferdes. In diesem Stadium sind die mütterlichen Kapillaren noch durch Stroma von den Trophoblastzellen getrennt. In der weiteren Entwicklung jedoch, bei einer fötalen Masse von 189 g, werden die Lamellen zunehmend verzweigter dünner, bis der Trophoblast den Kapillaren direkt anliegt. An den lateralen Seiten der Plazenta biegen sich die Lamellen um und legen sich über den Teil des Endometriums, dessen Epithel noch intakt ist. Durch diesen Vorgang bilden sich geschlossenen Kavernen, in welche mütterliches Blut einfließt. Das Epithel in den Kavernen wird zylinderförmig und vergrößert seine Oberfläche durch Auffaltung. Die angrenzenden Trophoblastzellen werden größer und nehmen aktiv Blutzellen auf. Eine Syncytiotrophoblastbildung, wie von Amoroso & Perry beschrieben, wird von Allen *et al.* (2003a) nicht beobachtet.

Mit fortschreitender Trächtigkeit wachsen die Plazentalamellen weiter in die Länge und bilden sekundäre und tertiäre Aufzweigungen, so dass die Plazenta sowohl in ihrer Höhe als auch in ihrer Breite zunimmt. Die ursprüngliche fetomaternale Verbindung aber, die von (Allen *et al.* , 2003b) als Hilus bezeichnet wird, verändert sich kaum. Die Breite des Hilus beträgt bei einer fötalen Masse von 198 - 1900 g ca. 2 - 4 cm. Bei einer geburtsreifen Plazenta beträgt die Gesamtbreite der Plazenta über 12 cm und ihre Höhe 4 - 6 cm, während der Hilus in seinen Ausmassen praktisch unverändert ist.

## 1.6 Fötale Entwicklung und Altersbestimmung

Wie bereits beschrieben, nimmt der Elefant in seiner engen Beziehung zum Menschen eine Sonderstellung ein. Zwar wird er seit Jahrtausenden als Nutztier gehalten, doch hat eine gezielte Zucht in Menschenhand nie stattgefunden. Von einer Domestizierung im eigentlichen Sinne, die eine Selektion von Tieren mit gewünschten Merkmalen und Eigenschaften und deren Vermehrung in Menschenobhut beinhaltet, kann beim Elefanten also nicht die Rede sein. So lässt sich auch erklären, dass über die Reproduktionsbiologie und die pränatale Entwicklung dieser Spezies lange Zeit nichts bekannt war. Die wenigen Zeugnisse, die über den Elefanten berichten, sind oftmals mit Mythen durchsetzt. Selbst über die Trächtigkeitsdauer des Elefanten herrschte lange Unklarheit. Die früheste schriftliche Angabe findet sich in der 10 Bücher umfassenden „Geschichte der Tiere“ von Aristoteles (350 v. Chr.), der als der Begründer der Zoologie gilt. Aristoteles gab die Trächtigkeitsdauer des Elefanten hier mit 2 Jahren an. Über 20 Jahrhunderte später wurden in den Beschreibungen des Naturalienkabinetts von Seba (1734) noch andere Angaben über die Tragzeit des Elefanten aufgeführt, welche von 6 Monaten über 18 Monate bis zu besagten zwei Jahren reichten: „Nous ne savons pas jusqu'à présent avec exactitude combien de temps porte la Femelle de l'Eléphant. Quelques Ecrivains comme Pline disent six mois, d'autres comme Aristote deux ans, Strabon compte dis-huit mois (...).“

Zimmermann (1789) hingegen schrieb, dass „nach dem entscheidenden Zeugnisse des Herrn v. Bles das Elefantenweibchen nur eben wie der Mensch, neun Monate trüchtig geht“. Aufgrund dieser Annahme versuchte Zimmermann, das Alter des von ihm untersuchten Asiatischen Elefantenföten in Analogie zur menschlichen Entwicklung zu bestimmen. Hierzu bediente er sich der Scheitel-Steiß-Länge und setzte diese in Bezug zur Größe des adulten Individuums. Nach seinen Berechnungen besass sein Elefantenfötus mit 163 Linien (ca. 367 mm)  $1\frac{12}{58}$  seiner endgültigen Körpergröße. Da ein menschlicher Fötus mit einem ähnlichen Verhältnis nach den damaligen Kenntnissen 3 Monate alt war, wurde dieses Alter auch für den Elefantenfötus angenommen. Auch nachdem allgemein bekannt war, dass Elefanten eine ca. 22-monatige Trächtigkeit besitzen, setzten sich die Schwierigkeiten der Altersbe-

stimmung in den darauffolgenden Literaturbeschreibungen einzelner Elefantenföten fort. Die zum Teil sehr detaillierten Beobachtungen konnten nicht eindeutig in den zeitlichen Verlauf der pränatalen Entwicklung eingeordnet werden.

Lönnerberg beschrieb 1904 erstmals einen Fötus des Afrikanischen Waldelefanten von ca. 22,5 cm Länge. Da bei diesem Exemplar auch die fötalen Membranen nebst Plazenta erhalten waren, vergleicht Lönnerberg seine Beobachtungen mit denen, die Owen (1868) und Chapman (1880) schon bezüglich derselben gemacht hatten. Der von Lönnerberg untersuchte Fötus besass bereits eine ausgeprägte Plazenta und auf der Allantois befanden sich sogenannte Allantoiskörperchen. Weiterhin bemerkte Lönnerberg: "dass er [der Fötus] wenn er noch so klein ist, so vollständig elefantenähnlich aussieht."

In der Abhandlung Durrieuxs (1912) über einen Asiatischen Fötus mit 143 mm Länge fanden sich keine Angaben zum Alter. Durrieux stellte jedoch ebenfalls fest, dass der Fötus in seiner äusseren Form trotz der noch geringen Größe sehr dem adulten Tier ähnelt.

Ein anderer Ansatz zur pränatalen Altersbestimmung ist das Auffinden charakteristischer Merkmale, die zu bestimmten Zeitpunkten der Entwicklung auftreten. Toldt jun. (1914) beschrieb Anfang des 20. Jh. den Fetus einer Asiatischen Elefantenkuh, die in der kaiserlichen Menagerie zu Schönbrunn verendet war. Da 11 Monate vor dem Tod der Elefantenkuh mehrere Kopulationen mit dem ebenfalls dort gehaltenen Bullen beobachtet wurden, wurde das Alter des 56,5 cm langen Fötus auf 11 Monate geschätzt. Toldt stellte ausführlich die Topographie des ersten Erscheinens der Haare bei Säugetieren allgemein dar und spezifizierte seine Beobachtungen über die Entwicklung der Behaarung beim Elefantenfötus unter Einbeziehung der Beschreibungen von Seba, Lönnerberg und Turner. Während weder bei den Föten von Seba und Lönnerberg das Auftreten von Haaren erwähnt wurde, war der Fötus von Turner, der nur etwas kleiner war als das Exemplar von Toldt, an Unterlippe und Rüssel sowie an äusserem Gehörgang und Tragus bereits behaart. Der Toldt zu Verfügung stehende Fötus wies zusätzlich Haare an Kopf, seitlicher Bauchdecke, Extremitäten und Perineum auf. Die längsten Haare aber waren an Schwanz, Rüssel und Unterlippe zu finden.

Der von Friant (1937) vorgestellte Asiatische Fötus war mit ca. 61 mm das bisher kleinste Exemplar und wies keine Behaarung auf. Auf radiologischen Aufnahmen stellte Friant die Ossifikation der langen Röhrenknochen und die beginnende Verknöcherung des Schädels und des Unterkiefers fest. Aufgrund dieser Beobachtung wurde der Fötus mit einem zwei Monate alten menschlichen Fötus verglichen. Es wurde aber darauf hingewiesen, daß über das zeitliche Auftreten der verschiedenen Ossifikationsstadien beim Elefanten bisher nichts bekannt war.

Im Jahr 1933 fertigte Mookerjee ebenfalls radiologische Aufnahmen eines Asiatischen Elefantenfötus an. Mit einer maximalen Höhe von 17,8 mm und einer Masse von 1157 g stellte sich das Skelettsystem größtenteils verknöchert dar. Auch die Rippen und die Schwanzwirbel waren deutlich erkennbar. Mookerjee überließ mit seinem Hinweis, dass ein neugeborenes Kalb ungefähr eine Masse von 200 Pfund besitzt und dass seine größte Höhe ungefähr ein Yard (ca. 92 mm) beträgt, die Alterseinschätzung dem Leser selbst.

Waren die Föten, die bisher in der Literatur beschrieben wurden, jeweils kostbare Einzel-exemplare, so boten die „culls“ in den Jahren 1965 bis 1995 in Südafrika die Gelegenheit, viele Föten in verschiedenen Entwicklungsstadien zu untersuchen. Den Auftakt zu einer Reihe von Veröffentlichungen bildeten Amoroso & Perry (1964) mit ihrer detaillierten Beschreibung der Plazentation und der Entwicklung extraembryonaler Organe. Auf die Morphologie ihrer sechs untersuchten Afrikanischen Föten gingen Amoroso & Perry allerdings nur kurz ein. Die Alterseinschätzung erfolgte grob nach früher, mittlerer und später Trächtigkeit. 1951 konzipierten Huggett & Widdas (1951) eine allgemeine Formel zur fötalen Altersbestimmung von Säugetieren, welche auf einer linearen Beziehung zwischen der dritten Wurzel aus fötaler Masse ( $\omega$ ) und Gestationszeit ( $t$ ) beruht. Die Wachstumsgeschwindigkeit wird mit  $a$  bezeichnet:

$$t = \frac{\sqrt[3]{\omega}}{a} + t_0 \quad (1.1)$$

Mit einer angenommenen durchschnittlichen Trächtigkeitsdauer von 660 Tagen berechnete

Perry 1953 die Formel für die Altersbestimmung beim Elefanten:

$$t = 120.5 * \sqrt[3]{\omega} + 66 \quad (1.2)$$

Aus  $t_0 = 66$  folgt, daß fötales Wachstum nicht vor einem Alter von 66 Tagen beginnt. Craig berichtete die Formel 1984 jedoch dahingehend, daß er eine größere Wachstumsgeschwindigkeit annahm. Seine Überlegungen beruhten auf einer Sammlung von Elefantenföten in unterschiedlichen Entwicklungsstadien, die während der culls in Simbabwe zwischen 1980 - 1982 gesammelt wurden. Die Föten konnten aufgrund ihrer Masse in zwei Gruppen eingeteilt werden, von denen die eine alle Föten unter vier Kilogramm und die andere alle über zwölf Kilogramm beinhaltete. Die Tatsache, dass keine Föten mit einer Masse zwischen vier und zwölf Kilogramm gefunden wurden, schien die Beobachtung einer auf die jährliche Regenzeit beschränkten Paarungsperiode in den betreffenden Populationen zu bestätigen. Der Vergleich des berechneten Alters nach Huggett & Widdas (1951) für die beiden Gruppen ergab jedoch, dass die größeren Föten über zwölf Kilogramm im Durchschnitt ein Jahr und 57 Tage älter erschienen als die kleineren Föten. Bei einer einzigen Paarungsperiode im Jahr dürfte der Altersunterschied zwischen den beiden Gruppen zwölf Monate jedoch nicht überschreiten. Craig zog daraus den Schluss, dass die bisher angenommene Wachstumsgeschwindigkeit zu klein war. Die neue Formel nach Craig lautet:

$$t = 105 * \sqrt[3]{\omega} + 138 \quad (1.3)$$

Auch hier folgt wieder aus  $t_0 = 138$ , dass die Formel nach Craig erst ab einem Alter von 138 Tagen angewendet werden kann. Craig nahm an, dass das Wachstum vor Tag 138 mit einer kleineren, jedoch unbekanntem Geschwindigkeit stattfindet. Um das fötale Wachstum vor Tag 138 zu beschreiben schlug er eine nichtlineare Formel vor, die jedoch rein fiktiv ist:

$$t = \sqrt[3]{\omega} * 105 - \sqrt[3]{\sqrt[3]{\omega} + 0,193} + 140 \quad (1.4)$$

Die Craig'sche Formel wurde seither zur Altersbestimmung toter Föten eingesetzt (Allen *et al.*, 2003b,a; Gaeth *et al.*, 1999) und fand auch bei morphologischen und histologischen Beschreibung sechs Afrikanischer Föten und eines Embryos Verwendung (Gaeth *et al.*,

1999). Die bei culls in Südafrika geborgenen Föten besaßen nach der Craig'schen Formel ein Alter zwischen 97 und 166 Tagen. Der Embryo wurde nach Craig auf 58 Tage geschätzt. Die histologischen Untersuchungen ergaben, dass der Elefantenfötus, ungleich anderen Spezies, noch funktionelle Nephrostome in der Vorniere (mesonephros) exprimierte. Diese waren in den älteren Föten (nach Craig berechnetes Alter von 139 - 166 Tagen) nicht mehr zu finden. Aus ihren Beobachtungen schlossen Gaeth *et al.* (1999), dass das Vorhandensein der funktionellen Nephrostome entweder auf ein langsames embryonales Wachstum zurückzuführen sei, oder auf wasserlebende Vorfahren hindeutete. Andere Aspekte der Elefantenanatomie, wie etwa das Fehlen des Gubernaculum testis oder des Plexus pampiniformis, beweisen, dass der Elefant, wie seine nächsten Verwandten, die Seekühe, ein primär testicondes Säugetier ist. Eine Erklärung für die intraabdominale Lage der Hoden wären ebenfalls wasserlebende Vorfahren, die ihre Hoden so vor dem schädlichen Einfluss des kalten Wassers schützten. Das frühe Auftreten des Rüssels während der Embryonalperiode und die Verschmelzung der viszeralen und parietalen Pleura mit dem Mediastium bzw. der Thoraxwand wurde ebenfalls als eine Anpassung an ein Leben im Wasser verstanden: während der Rüssel die Schnorchelatmung im Wasser ermöglicht, verhindert die fehlende Pleurahöhle ein Reißen der pleuralen Mikrogefäße durch den hohen Druck, der beim Schwimmen in beträchtlicher Tiefe entsteht (West, 2001; West *et al.*, 2003).

## 1.7 Einsatz der Ultraschalltechnik in der Reproduktionsmedizin beim Elefanten

Die ersten Versuche, Ultraschalltechnik zur Untersuchung des weiblichen Genitaltraktes beim Elefanten einzusetzen, wurden unternommen, um neue Möglichkeiten der künstlichen Besamung zu entwickeln. In den 80er Jahren leisteten Balke *et al.* erste Vorarbeiten, indem sie die Anatomie des weiblichen Genitaltraktes und dessen Ausmasse anhand von posmortem Präparaten beschrieben. Dabei wurde offensichtlich, dass der lange Urogenitalkanal und die winzige Öffnung der Vagina die Haupthindernisse für die Einführung eines Katheters zur künstlichen Besamung darstellten. Balke *et al.* simulierten eine künstliche

Besamung an toten Elefanten in Seitenlage. Dabei gelang es ihnen, mittels eines Katheters Farbstoff in den Urogenitalkanal abzusetzen. Die Öffnung zur Vagina jedoch konnte nicht passiert werden.

Hildebrandt & Schnorrenberg (1996) verfeinerten die vorgeschlagene Technik, indem sie sowohl endoskopische als auch sonographische Bildgebungsverfahren nutzten. Nach weiteren Vorversuchen an post mortem Präparaten gelang ihnen die weltweit erste nicht - chirurgische vaginale künstliche Besamung im National Zoological Park, Washington DC . Es folgten erfolgreiche künstliche Besamungen im Zoo von Indianapolis im Jahr 1988 (Hildebrandt *et al.* , 1999; Brown *et al.* , 2004). Die erste Geburt nach einer künstlichen Besamung, die von Schmitt *et al.* nach der von Hildebrandt *et al.* (1999) entwickelten Technik durchgeführt wurde, erfolgte schon zwei Monate früher im Beckerson Zoo, Missouri. Bei dem neuentwickelten Verfahren wurden die Optik des Endoskops sowie dessen Arbeitskanal mit einem massangefertigten Ballonkatheter bis vor die Öffnung der Vagina geschoben. Unter endoskopischer Sichtkontrolle wurde dann der Besamungskatheter in die Vagina eingeführt. Anschliessend wurde dessen richtige Positionierung mit transrektalem Ultraschall überprüft um sicherzugehen, dass sich der Besamungskatheter nicht in der Harnblase oder in einer der Blindtaschen befand. Erst dann wurde das Sperma in die Vagina injiziert. Inzwischen ist die beschriebene Methode zur künstlichen Besamung erfolgreich etabliert. Weltweit wurden auf diese Weise schon 24 Trächtigkeiten erzeugt (Hildebrandt TB, Schmitt DL, persönl. Mitteilung).

Die Ultraschalltechnik fand auch Verwendung beim letzten cull in Südafrika im Jahr 1996. Hier konnten Hildebrandt und Göritz schon vor der aufwendigen Schlachtverarbeitung eventuelle Trächtigkeiten diagnostizieren. In diesem Rahmen wurde auch der gesamte Urogenitaltrakt dargestellt. Diese Daten und Resultate aus Untersuchungen an lebenden Tieren wurden dazu verwendet, die Sonomorphologie des Urogenitaltrakts genaustens zu charakterisieren (Hildebrandt *et al.* , 2000). Die von 1996 bis 1998 im Krüger Nationalpark durchgeführten Kontrazeptionsprogramme als Alternative zum culling stützten sich vorrangig auf die Resultate der im Feld durchgeführten Ultraschalluntersuchungen. So konnten geeignete,

nicht - trächtige, gesunde Elefantenkühe zur Verlaufsuntersuchung nach Applikation der Kontrazeptiva selektiert werden.

Auf Grundlage der im Feld und in zoologischen Einrichtungen gewonnenen Ultraschalldaten gelang es Hermes *et al.* (2000), die sonomorphologischen Veränderungen des Reproduktionstrakts während des Zyklus zu beschreiben. Hierbei wurden insbesondere Vorgänge am Ovar im Hinblick die Wirkung von Progesteron und luteinisierendem Hormon erklärt.

Mittels Sonographie lassen sich auch erstmals Pathologien des Genitaltraktes, wie beispielsweise uterine Leiomyome bei Asiatischen Elefanten oder Ovarzysten diagnostizieren. Da solche Pathologien vor allem in älteren Elefantenkühen beobachtet werden, die noch nie gezüchtet haben, entwickelt sich die Theorie des „asymmetrischen Alterns“ der Reproduktionsorgane (Hildebrandt *et al.* , 2000; Hermes *et al.* , 2004). Wilde Elefanten durchlaufen während ihrer reproduktiven Phase nur ca. 30 Zyklen. Während der Trächtigkeit und Laktation hingegen dominieren azyklische Phasen. Elefanten in Menschenhand jedoch durchlaufen infolge ausbleibender Trächtigkeit bis zu 90 Zyklen, was die Reproduktionsorgane dem vermehrten Einfluss von Sexualsteroiden aussetzt und in der Ausbildung typischer Pathologien wie Leiomyomen und zystischen Hyperplasien resultiert. Die pathologischen Veränderungen wiederum stehen einer erfolgreichen Befruchtung im Wege und reduzieren die Zuchttauglichkeit der betroffenen Elefantenkühe schon in einem Alter, in welchem sie noch reproduktionsfähig wären (Hildebrandt *et al.* , 2000; Hermes *et al.* , 2004).

Aus dem erfolgreichen Einsatz der Sonographie auf dem Gebiet der Reproduktionsmedizin entwickelte sich die Idee zur vorliegenden Arbeit, die Trächtigkeit des Elefanten sonographisch zu beschreiben. Hierbei kamen sowohl die konventionelle 2D- als auch die neue 3D - Ultraschalltechnik zum Einsatz.

## 1.8 Physikalische Grundlagen des bildgebenden Ultraschall

Der Begriff Schall (von althochdeutsch *scal*) bezeichnet im allgemeinen Sprachgebrauch das Geräusch, den Klang oder den Ton so wie er vom Menschen wahrgenommen wird. Der Frequenzbereich des hörbaren Schalls liegt hierbei zwischen 16 - 20 000 Hz, was ungefähr 10 Oktaven umfasst. Darunterliegende Frequenzbereiche werden als Infraschall, darüberliegende als Ultraschall definiert. Betrachtet man jedoch die Hörbereiche anderer Spezies so wird deutlich, dass diese Einteilung nur im Hinblick auf den Menschen sinnvoll ist. Heuschrecken, Fledermäuse und Delphine sind beispielsweise durchaus in der Lage, Frequenzen im Ultraschallbereich zu erzeugen und zu empfangen. Von Elefanten ist bekannt, dass sie sich über lange Distanzen mittels Infraschall verständigen (Garstang, 2004).

Physikalisch betrachtet ist Schall eine longitudinale Materiewelle, die sich in Form von Dichte- und Druckschwankungen in elastischen Medien fortpflanzt. Einzelne Moleküle werden hierbei ausgelenkt und geben die erfahrenen Impulse an ihre Nachbarmoleküle weiter bevor sie in ihre Ruhelage zurückschwingen. Im Vergleich zu anderen Wellen, wie beispielsweise elektromagnetischen Wellen, ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen relativ langsam, so dass sich Laufzeiten sehr präzise bestimmen lassen. Diese Eigenschaft macht den Einsatz von Ultraschall in der bildgebenden Diagnostik möglich. Zwar variiert die Schallgeschwindigkeit zwischen verschiedenen Gewebearten, wird aber mit einem Mittelwert von 1540 m/s in Weichteilgewebe und Flüssigkeit als konstant angenommen. Ein Teil der ausgesendeten Ultraschallwellen wird bereits an oberflächlichen Grenzflächen reflektiert während ein anderer Teil erst in tieferen Gewebeschichten ein Echo erzeugt. Aus den unterschiedlichen Rücklaufzeiten können bei konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit so die Entfernungen zwischen schallreflektierenden Strukturen berechnet werden.

Die Erzeugung von Ultraschallwellen beruht auf dem von Pierre Curie und Jaques Curie erstmals beschriebenen piezoelektrischen Effekt. Bei Anlegen einer Wechselspannung verformen sich Piezoelektrische Kristalle mechanisch unter Aussendung von Ultraschallwellen. Umgekehrt bewirken zurückkehrende Schallwellen durch mechanische Verformung

eine Ladungsverschiebung, welche in elektrische Signale umgesetzt werden. Piezoelektrische Kristalle verhalten sich also als Ultraschallwandler oder Transducer. Das Prinzip der Bildgebung basiert auf dem sogenannten Echo-Impuls-Verfahren: Schallwellen werden ins Gewebe ausgesendet und dort je nach Gewebedichte unterschiedlich stark reflektiert. Die reflektierten Schallwellen werden wieder von den piezoelektrischen Elementen empfangen und in elektrische Signale umgewandelt, welche auf dem Monitor erscheinen.

Die einfachste Form der Signaldarstellung auf dem Bildschirm ist der Amplituden - oder A - Mode. Die Stärke des eingehenden Ultraschallsignals wird hier je nach Intensität in unterschiedlich hohen Amplituden dargestellt. Im Brightness - Mode (B - Mode) wird die unterschiedliche Signalstärke in entsprechende Grauwerte umgesetzt, wobei gilt dass je heller der Grauwert desto stärker das zugrundeliegende Signal. Die Aneinanderreihung mehrerer B-Mode-Linien führt zu einem zweidimensionalen Schnittbild. Im Echtzeitverfahren werden durchschnittlich 20 - 30 solcher Bilder pro Sekunde aufgebaut und ähnlich wie in einem Videofilm abgespielt. Durch das Schwenken der handgehaltenen Sonde durch den Untersucher kann so ein bestimmter Bereich abgetastet werden.

Die Bildqualität wird von zwei gegensätzlichen Schallwelleneigenschaften beeinflusst. So ist das Bildauflösungsvermögen umso höher, je kurzwelliger der ausgesandte Ultraschall ist. Gleichzeitig nimmt bei Verwendung höherer Frequenzen die Eindringtiefe der Schallwellen in das Gewebe ab. Je nach Ultraschallanwendung muss ein Kompromiss zwischen hohem Auflösungsvermögen und notwendiger Eindringtiefe getroffen werden.

### 1.8.1 3D - Ultraschalltechnik

Auch bei Verwendung der 3D - Technik wird zu Anfang eine zweidimensionale Ultraschalluntersuchung durchgeführt, um das zu scannende Volumen zu definieren. Nachdem sich der Schallkopf über der gewünschten Region befindet, wird vom 2D - Modus in den Volumen - Modus gewechselt. Während des Volumenaufnahme werden die Piezoelemente innerhalb des Schallkopfes mittels eines eingebauten Schrittmotors automatisch geschwenkt und generieren aufeinanderfolgende zweidimensionale Ultraschallbilder (Abb. 1.4(a)).

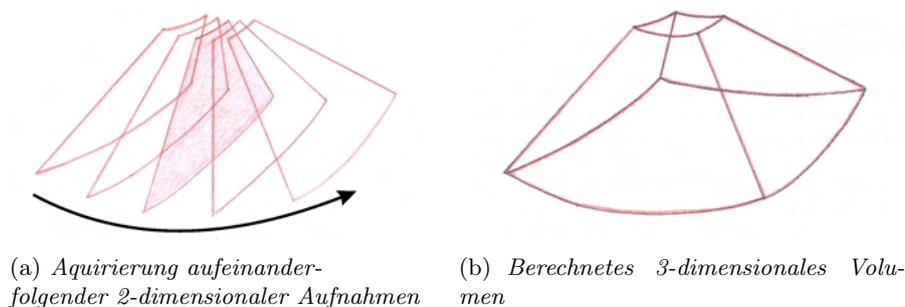


Abbildung 1.4: Volumen-Gewinnung

Die Hand des Untersuchers muss dabei ruhig gehalten werden, um keine Bewegungsartefakte zu erzeugen. Die automatische Auslenkung der Piezoelemente gewährleistet einen konstanten Abstand zwischen den Bildebenen, der je nach Dauer des Volumen-scans größer oder kleiner ist: eine schnelle Volumenaquirierung (2 Sekunden) führt zu größeren Abständen zwischen den einzelnen Bildebenen während ein langsamer Schwenk des Schallkopfes (10 Sekunden) kleinere Abstände ermöglicht. In longitudinaler Richtung können je nach Bildwechselfrequenz und Volumengröße bis zu 360 verschiedene Bildebenen erfasst werden. Anhand der Lage und Orientierung der Bildebenen zueinander kann nun ein pyramidenförmiger Volumendatensatz berechnet werden, wobei die einzelnen Pixel zu Volumeneinheiten, den Voxel interpoliert werden (Abb. 1.4(b)).

Um aus den dreidimensionalen Datensätzen im Render Modus 3D - Ansichten zu erzeugen,

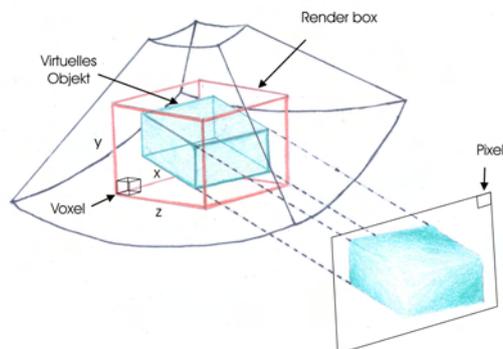


Abbildung 1.5: Prinzip des Volumen Renderings

werden die numerischen Werte der Voxel in Farbwerte eines Bildes unter Berücksichtigung einer 3D - Ansicht umgesetzt. Dazu wird ein virtueller Strahl in das Volumen projiziert. An gleichmäßig verteilten Punkten dieses Strahles werden aus Voxel entsprechende Pixel durch das Volumen berechnet (Abb. 1.5). Die verwendeten Algorithmen bestimmen hierbei, wie die 3D - Strukturen dargestellt werden. Für eine Oberflächendarstellung wird mit Hilfe eines Klassifikationsoperators für jedes Voxel am virtuellen Strahl die Oberflächenwahrscheinlichkeit bzw. Undurchsichtigkeit berechnet. Dabei wird der Grauwert an der aktuellen Position am Strahl gewichtet und zu einem Gesamtvektor addiert. Dieser bildet den Normalenvektor des Oberflächenstücks und wird mit einer virtuellen Lichtquelle in einen Helligkeitswert umgesetzt (Abb. 1.5).

Unabhängig von der 3D - Darstellung können aber auch einzelne Bildebenen des gescannten Volumens in der Schnittbildanalyse dargestellt werden. Der Bildschirm stellt dabei jene Raumebene dar, die den Volumenkörper in einer bestimmten Lage durchschneidet. Die Lage des Volumenkörpers zur Bildebene wird durch ein Koordinatensystem definiert, welches aus drei zueinander senkrecht stehenden Achsen besteht. Durch Rotieren des Volumenkörpers um diese Achsen oder durch Verschieben des Drehzentrums entlang dieser Achsen kann jeder beliebige Schnitt durch den Volumenkörper erzeugt werden.

Die Standardeinstellung der Schnittbildanalyse ist der Multiplanar Modus. Im Multiplanar Modus werden gleichzeitig drei zueinander senkrecht stehenden Bildebenen A, B und C

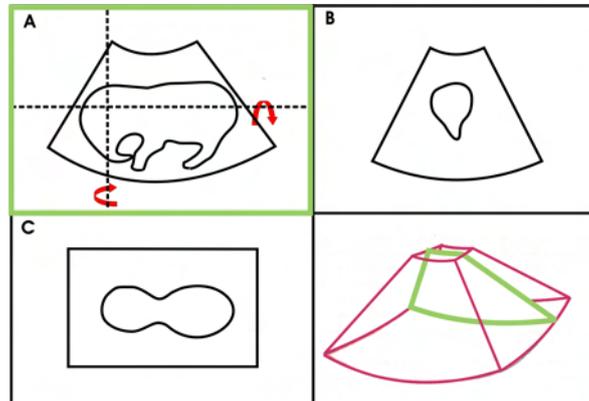


Abbildung 1.6: Darstellung des Volumendatensatzes im Multiplanar Modus. Ebene A ist hier als Referenzebene definiert.

dargestellt (Abb. 1.6). Eine der drei Bildebenen dient als Referenzebene, anhand derer die anderen beiden Bildebenen beliebig verschoben und rotiert werden können. Zur Orientierung wird die Lage der Referenzebene innerhalb des Volumenkörpers auf dem Bildschirm unten rechts schematisch angezeigt.