

Aus dem Charité Centrum 17 für Frauen-, Kinder- und Jugendmedizin mit

Perinatalmedizin und Humangenetik

Klinik für Geburtsmedizin

Campus Virchow Klinikum

Komm. Direktor: Prof. Dr. med. W. Henrich

Habilitationsschrift

Bildgebende Verfahren

in der modernen Geburtsmedizin

zur Erlangung der Lehrbefähigung

für das Fach Gynäkologie und Geburtshilfe

vorgelegt der Medizinischen Fakultät der Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Dr. med. Christian Bamberg

geboren 20.01.1973 in Berlin

Eingereicht: September 2012

Dekanin: Prof. Dr. A. Grütters-Kieslich

1. Gutachter: Hr. Prof. Dr. Hecher/Hamburg

2. Gutachter: Hr. Prof. Dr. Surbek/Bern

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | Einleitung | 3 |
| 1.1 | Stellenwert der Sonographie als bildgebendes Verfahren in der Geburtsmedizin | 3 |
| 1.2 | Einsatzmöglichkeiten der Dopplersonographie in der Geburtsmedizin | 4 |
| 1.3 | Fetale Neurosonographie | 7 |
| 1.4 | Grundlagen der Geburtsmechanik | 11 |
| 1.5 | Der Höhenstand des kindlichen Kopfes im maternalen Becken und seine Feststellung | 15 |
| 2. | Eigene Arbeiten | 19 |
| 2.1 | Value of Doppler sonography near term: can umbilical and uterine artery indices in low-risk pregnancies predict perinatal outcome? | 19 |
| 2.2 | Three-dimensional ultrasonographic reslicing of the fetal brain to assist prenatal diagnosis of central nervous system anomalies | 20 |
| 2.3 | Relationship between fetal head station established using an open magnetic resonance imaging scanner and the angle of progression determined by transperineal ultrasound | 21 |
| 2.4 | Angle of progression measurements of fetal head at term: a systematic comparison between open magnetic resonance imaging and transperineal ultrasound | 22 |
| 2.5 | Human birth observed in real-time open magnetic resonance imaging | 23 |
| 3. | Diskussion | 24 |
| 3.1 | Dopplersonographie am Termin | 24 |
| 3.2 | Vorteile der 3D-Sonographie bei der fetalen ZNS-Beurteilung | 26 |
| 3.3 | MRT und Ultraschall subpartu | 30 |
| 3.3.1 | Fetale Höhenstandsdiagnostik mittels transperinealen Ultraschall und MRT | 30 |
| 3.3.2 | Neue Erkenntnisse über die Geburtsmechanik nach Auswertung der Geburt im offenen MRT | 34 |
| 4. | Zusammenfassung | 36 |
| 5. | Literaturverzeichnis | 38 |
| 6. | Danksagung | 50 |
| 7. | Eidstattliche Erklärung | 51 |

1. Einleitung

1.1 Stellenwert der Sonographie als bildgebendes Verfahren in der Geburtsmedizin

Der Einsatz des diagnostischen Ultraschalls ist in der Medizin ubiquitär verbreitet. Seitdem Ian Donald 1958 die Sonographie in der Frauenheilkunde einführte (1), wird diese seit mehr als 50 Jahren praktiziert, um die pränatale Entwicklung des Feten und dessen Wohlbefinden zu evaluieren. Weiterhin ist die Ultraschalldiagnostik zu einem unverzichtbaren Bestandteil bei der Überwachung von Risikoschwangerschaften geworden. In den entwickelten Ländern werden nahezu alle Feten pränatal sonographisch untersucht. Die Bundesrepublik Deutschland führte 1985 als erstes Land die routinemäßige Sonographie im Rahmen der Mutterschaftsrichtlinien ein (2). Aktuell werden drei Ultraschalluntersuchungen während einer Schwangerschaft gefordert. Der Ultraschall ist das bildgebende Verfahren der Wahl in der Schwangerschaft (3). Bereits im frühen 1. Trimenon kann der intrauterine Sitz einer vitalen Einlings- oder Mehrlingsschwangerschaft sonographisch diagnostiziert werden. Die Messung der Scheitel-Steißlänge bestimmt das Gestationsalter und somit den Entbindungstermin exakter als die maternale Regelanamnese (4). Zwischen der 11+0 und 13+6 SSW erlaubt die Bestimmung der Nackentransparenz eine individuelle Risikoeinschätzung für fetale Chromosomenaberrationen (5). Weiterhin kann zu diesem Zeitpunkt eine verlässliche Aussage zur Chorionizität (6) und damit auch zum Risiko eines Zwillingsstransfusionssyndroms getroffen werden. Einerseits kann der klassische Fehlbildungsultraschall zwischen der 18. und 23. SSW beim Nachweis bestimmter fetaler Anomalien das perinatale Management durch den geeigneten Entbindungsort (z. B. bei fetalen Herzfehlern) optimieren. Andererseits werden auch komplexe Fehlbildungssyndrome mit einer infausten Prognose sonographisch erkannt und der Schwangeren wird ermöglicht, die Schwangerschaft nicht austragen zu müssen. In den letzten Jahren hat die Diagnostik im 1. Trimenon an Bedeutung gewonnen (7). Alle pränatalen invasiven Diagnostiken und Therapien werden unter sonographischer Sicht durchgeführt. Die seriell durchgeführte Biometrie erlaubt eine Aussage über das fetale Wachstum und somit indirekt über die Plazentafunktion (8). Die Plazentalokalisation (Plazenta prävia totalis) aber auch mögliche Implantationsstörungen (Plazenta accreta, increta, percreta) können mit einer

gewissen Sicherheit pränatal sonographisch diagnostiziert werden (9). Ein weiteres Einsatzgebiet des pränatalen Ultraschalls ist die Zervixlängenmessung zur Risikoeinschätzung einer drohenden Frühgeburt (10). Zahlreiche epidemiologische Studien kamen zu dem Schluss, dass die Anwendung von Ultraschall in der Schwangerschaft keinen negativen Einfluss auf die prä- und postnatale Entwicklung hat (11-13).

1.2. Einsatzmöglichkeiten der Dopplersonographie in der Geburtsmedizin

Die antenatale Dopplersonographie ist für den erfahrenen Untersucher ein wertvolles Hilfsmittel, um eine fetale oder maternale Gefährdung frühzeitig zu erkennen und dementsprechend zu reagieren (14). Sie ermöglicht eine nichtinvasive Beurteilung der Gefäßgebiete, die für die Schwangerschaft von entscheidender Bedeutung sind. Die ersten Untersuchungen zur dopplersonographischen Blutströmungsmessung in der A. umbilicalis wurden 1977 von FitzGerald und Drumm publiziert (15). Knapp zwei Jahrzehnte später zeigte eine Metaanalyse, dass die Dopplersonographie der A. umbilicalis bei Risikoschwangerschaften die vorzeitige stationäre Aufnahme (44 %), die Geburtseinleitungen (29 %), sekundäre Sectiones wegen fetalen Distress (52 %) und insgesamt die perinatale Mortalität (38 %) signifikant senken kann (16).

Die in den Mutterschaftsrichtlinien festgelegten Indikationen zur Dopplersonographie sind (17):

- Verdacht auf intrauterine Wachstumsrestriktion
- Schwangerschaftsinduzierte Hypertonie/Präeklampsie/(Eklampsie)
- Zustand nach Mangelgeburt/intrauterinem Fruchttod
- Auffälligkeiten der fetalen Herzfrequenz
- begründeter Verdacht auf Fehlbildungen/fetale Erkrankungen
- Mehrlingsschwangerschaften mit diskordantem Wachstum
- Verdacht auf Herzfehler/Herzerkrankungen

Als erweiterte Indikationen für eine dopplersonographische Untersuchung gelten monochoriale Geminischwangerschaften mit Verdacht auf ein Fetofetales Transfusionssyndrom, der Verdacht auf eine fetale Anämie sowie präexistente gefäßrelevante maternale Erkrankungen wie Hypertonie, Nephropathie, Diabetes mellitus, Autoimmunerkrankungen und Gerinnungsstörungen (18).

Das Strömungsprofil der A. umbilicalis weist ein sägezahnartiges Muster auf und spiegelt den Widerstand im nachgeschalteten fetoplazentaren Kreislauf wider. Mit steigendem Gestationsalter sinken der Pulsatilitäts Index (PI) (19) und der Resistance Index (RI) (20) in der Nabelschnurarterie signifikant ab.

Dies wird einerseits durch eine Reduktion des plazentaren Widerstandes infolge einer Ausreifung des Zottengefäßbaumes erklärt. Andererseits kommt es zu einer Zunahme der fetalen Gefäßkaliber, zu einer ansteigenden kardialen Auswurfleistung und zu einem Blutdruckanstieg des Feten (21). Bei pathologischen Prozessen in der Plazenta obliterieren und fibrosieren Zotten. Anfangs steigen die Widerstandsindices PI und RI noch nicht an. Erst wenn 60-70 % der Zotten nicht mehr perfundiert sind, kommt es zu einem Überschreiten der 95. Perzentile in der A. umbilicalis (22) und dann zu einem exponentiellen Anstieg.

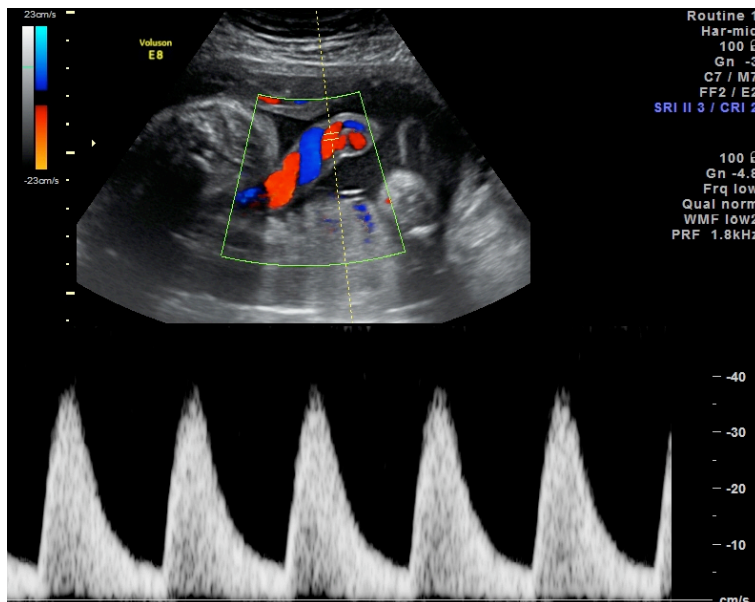


Abbildung 1: Erhöhte Widerstandsindices in der A. umbilicalis im 3. Trimenon.

Die Feten fallen durch eine intrauterine Wachstumsrestriktion auf. Bei einem weiteren Wegfall von plazentarer Austauschfläche aufgrund von Perfusionsstörungen zeigt sich in der A. umbilicalis ein enddiastolischer Nullfluss und dann später die enddiastolische Flussumkehr (ARED-Flow: absent and reverse enddiastolic flow). Diese Feten weisen eine perinatale Mortalität von über 50 % auf (23). Eine konsekutiv auftretende Hypoxämie führt zu einer Redistribution des Blutes zugunsten von Gehirn, Herz und Nebennieren. Eine fetale Kreislaufzentralisation stellt einen Adaptationsmechanismus dar, der den Organismus vor substanziellen Langzeitschäden schützen soll. Dopplersonographisch kann das „brain sparing“

durch eine Widerstandsabnahme in der A. cerebri media diagnostiziert werden (24). Wenn dann noch Veränderungen im venösen Gefäßsystem, wie z. B. des Ductus venosus als präkardiale Vene hinzukommen (25), ist die Grenze der fetalen Kompensationsmechanismen erreicht. Nach der 27. SSW sollte immer die Entbindung folgen (26-28).

Die Dopplersonographie der Aa. uterinae ist ein Maß für die uteroplazentare Perfusion und ein Gradmesser der Trophoblastinvasion. Im Verlauf der Schwangerschaft kommt es in zwei Phasen zu einer Trophoblastinvasion in die maternalen Spiralarterien. Dadurch werden die Gefäßdurchmesser der Spiralarterien deutlich erweitert mit kontinuierlicher Zunahme der diastolischen Flussgeschwindigkeiten; bis zur 24. SSW verschwindet in der Regel die postsystolische Inzisur (Notch) in der Dopplerhüllkurve der Aa. uterinae (29, 30).

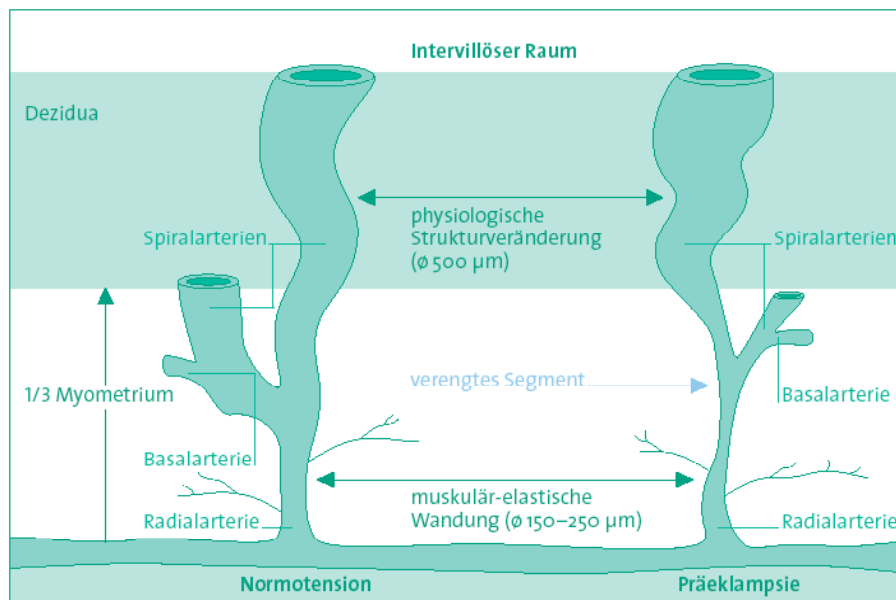


Abbildung 2: Physiologische (links) und pathologische (rechts) Trophoblastinvasion in die Spiralarterien (21).

Unauffällige uterine Widerstandswerte im 2. Trimenon haben einen hohen negativen prädiktiven Wert (etwa 95 %) hinsichtlich der Entwicklung einer Präeklampsie oder Wachstumsrestriktion (31).

Bei insuffizienter Trophoblastinvasion kommt es zu einem Persistieren des Notching und zu hohen Widerstandsindices in den Aa. uterinae über das 2. Trimenon hinaus.

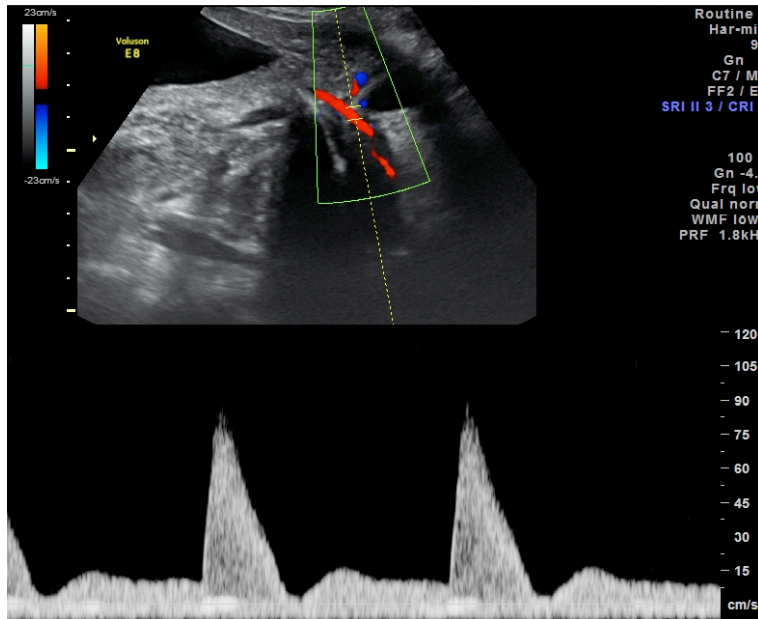


Abbildung 3: Pathologische Dopplerkurve der A. uterina mit Notching im 2. Trimenon.

Der positive Vorhersagewert für das Auftreten einer Präeklampsie beträgt bei dieser Konstellation jedoch nur ca. 30-40 %, sodass diese Schwangerschaften von einer intensiveren Überwachung profitieren (21). Studien zur Vorhersage der Präeklampsie haben mehrere sonographische Marker einer insuffizienten Plazentation (3D-Bestimmung des Plazentavolumens, Plazentamorphologie) und maternale Serummarker der fetoplazentaren Einheit untersucht (32-34). Dies stellt einen interessanten Ansatz dar, der zu einer individuellen Risikostratifizierung mit Erwägung einer medikamentösen Prophylaxe (z. B. Aspirin) führen könnte (35, 36). Neuere Untersuchungen schließen den Nutzen von Screeninguntersuchungen der Aa. uterinae im low-risk-Kollektiv nicht mehr aus (18).

1.3 Fetale Neurosonographie

Fehlbildungen des zentralen Nervensystems (ZNS) gehören mit zu den häufigsten angeborenen Anomalien. Eine qualifizierte und standardisierte Screening-Untersuchung des fetalen Gehirns ist am besten zwischen der 18. bis 22. SSW möglich und somit ein Hauptbestandteil der pränatalen Ultraschalldiagnostik. Das bisher umfassende Basisscreening im 2. Trimenon mit geforderter Beurteilung von Biometrie und Form des Schädels erfasst nur wenige Hinweise auf eine fetale zerebrale Anomalie und entspricht nicht mehr den diagnostischen Möglichkeiten mittels Ultraschall. In den aktuell beschlossenen Änderungen der

Mutterschaftsrichtlinien ist festgehalten, dass ein erweitertes Screening bezüglich des fetalen ZNS mit sonographischer Darstellung der Hirnventrikel, der Kopfform, des Kleinhirns sowie des Rückens durchgeführt werden soll (17, 37). Diese Anforderungen entsprechen in etwa den Kriterien, die die DEGUM (Deutsche Gesellschaft für Ultraschall in der Medizin) für die Stufe 1 zur ZNS-Beurteilung im Zeitraum 19. bis 22. SSW empfohlen hat (38). Bei Unregelmäßigkeiten sollte die Schwangere über die Möglichkeit einer Kontrolluntersuchung der DEGUM-Stufe II-III hingewiesen werden (Mehrstufenkonzept). Bei dieser weiterführenden differentialdiagnostischen Ultraschalluntersuchung durch qualifizierte Pränataldiagnostiker werden zusätzliche Strukturen des fetalen ZNS beurteilt (39). Die International Society of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology (ISUOG) hat 2007 und 2011 Empfehlungen zur systematischen Untersuchung des fetalen ZNS herausgegeben (40, 41).

Bei der sonographischen Basisuntersuchung des fetalen Gehirns werden drei axiale Schnittebenen als ausreichend angesehen; dadurch können 95 % aller ZNS-Anomalien diagnostiziert werden (42):

1. Die transventrikuläre Schnittebene:

Diese Ebene ist korrekt dargestellt, wenn die Falx cerebri als Mittelecho die beiden Gehirnhälften trennt. Im vorderen Drittel unterbricht das echoarme cavum septi pellucidi die Falx cerebri. Das Atrium der Seitenventrikel wird vom Plexus choroideus weitestgehend ausgefüllt.

2. Die transthalamische Schnittebene:

Durch eine Parallelverschiebung des Schallkopfes in Richtung Schädelbasis kommt man von der transventrikulären in die transthalamische Ebene. Sie ist gekennzeichnet durch die Visualisierung der beiden Thalamikerne lateral der Falx cerebri. In dieser Ebene sollte die Messung des biparietalen Durchmessers, des frontookzipitalen Durchmessers und des Kopfumfangs erfolgen. Die Hemisphären sollten symmetrisch dargestellt werden und das Kleinhirn nicht sichtbar sein.

3. Die transzerebelläre Schnittebene:

Durch Kippen des Schallkopfes nach okzipital bekommt der Untersucher Sicht in die hintere Schädelgrube; beide Kleinhirnhemisphären, der Kleinhirnwurm,

der 4. Ventrikel und die cisterna magna können in dieser Einstellung beurteilt werden.

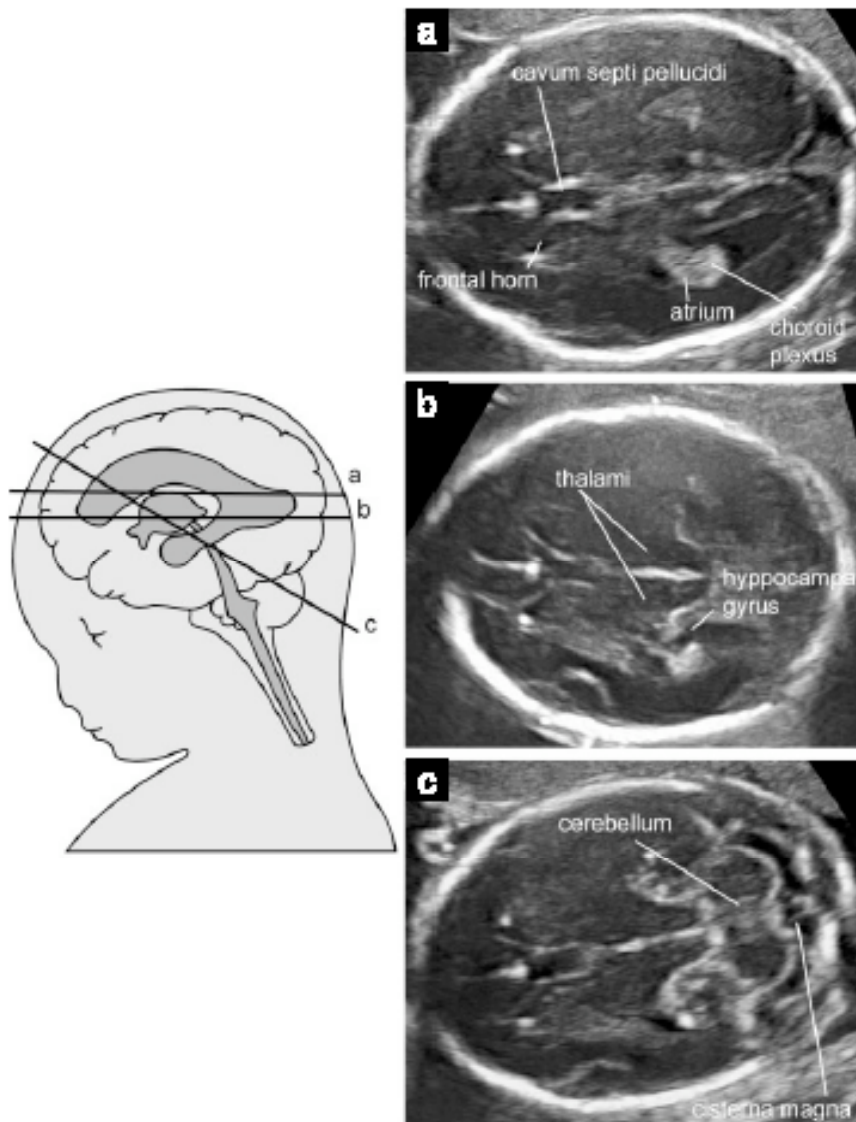


Abbildung 4: Sonographische Basisuntersuchung des fetalen Gehirns in den drei axialen Schnittebenen: a) transventrikulär, b) transthalamisch, c) tranzerebellär (40).

Durch die Schallauslöschung der Schädelknochen sind die Hirnstrukturen der schallkopffernen Hemisphäre meist deutlicher darstellbar. Die Transvaginalsonographie stellt bei der Darstellung des fetalen Kopfes eine Alternative dar, wenn eine frühe Abklärung im 1. Trimenon indiziert ist oder wenn der fetale Kopf tief im maternalen Becken liegt.

Die pränatale Darstellung der fetalen Wirbelsäule komplettiert die sonographische ZNS-Beurteilung im Zweit-Trimester-Screening. Sie ist von größter Wichtigkeit, da Neuralrohrdefekte (NRD) mit einer Inzidenz von 1-2 : 1.000 Geburten den Hauptanteil

an kongenitalen ZNS-Anomalien ausmachen (43). Auch wenn die spina bifida aperta meistens durch Kopf- bzw. Gehirnveränderungen auffällt, sollte durch eine dynamische Darstellung der Integrität der Wirbelsäule und der darüber liegenden Haut in Sagittal-, Frontal- und mehreren Transversalschnitten ein NRD ausgeschlossen werden.

Wird im Rahmen der Basisuntersuchung des fetalen ZNS eine Auffälligkeit vermutet oder besteht ein hohes Risiko für eine ZNS-Anomalie, sind zusätzliche Schnittebenen zur vollständigen und umfassenden Untersuchung des fetalen Gehirns indiziert (44). Die ISUOG-„Guidelines“ (40) beinhalten bei der erweiterten fetalen ZNS-Sonographie (Fetale Neurosonographie) auch vier koronare und drei sagittale Schnittebenen. Die vier parallelen koronaren Schnitte erfassen die transfrontale Ebene, die cavum septi pellucidi Ebene, die transthalamische und die transzerebelläre Ebene und erlauben Aussagen über den Interhemisphären Spalt, das cavum septi pellucidi, die Thalamikerne, die Frontal- und Occipitalhörner der Seitenventrikel und das Kleinhirn. Die sagittalen Schnittebenen beinhalten einen medianen und je einen schrägen, paramedianen Schnitt der beiden Hemisphären auf Höhe der Lateralventrikel. Das Corpus callosum, das cavum septi pellucidi, der Hirnstamm, die pons, der 3. und 4. Ventrikel sowie die fossa posterior können hierdurch beurteilt werden.

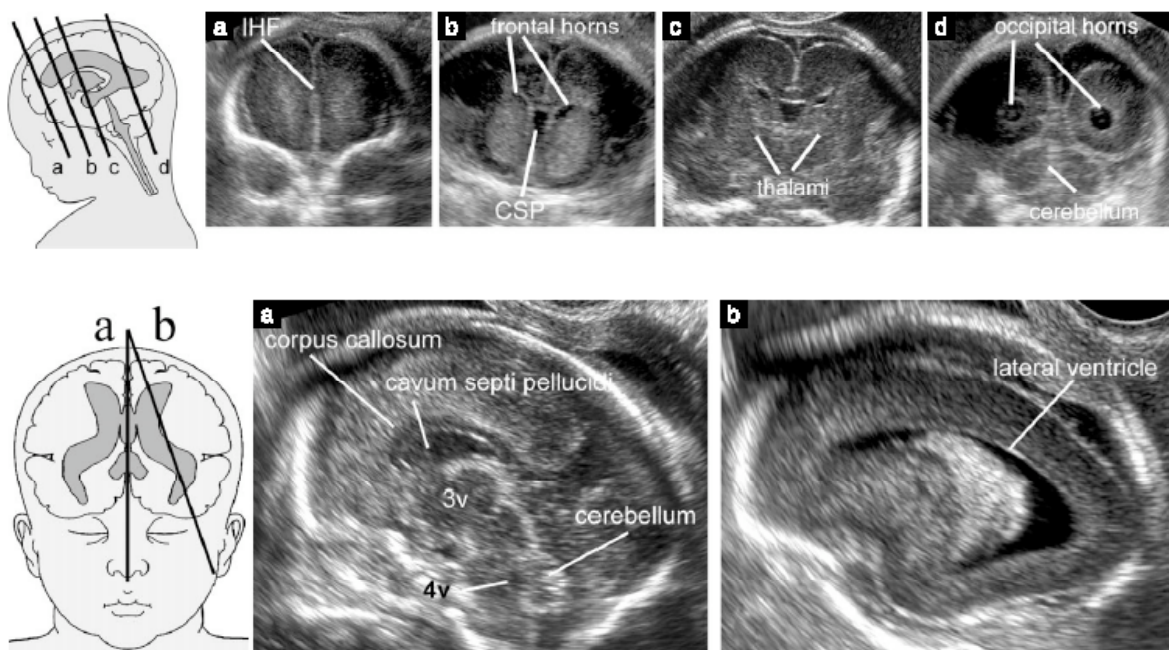


Abbildung 5: Bei der fetalen Neurosonographie werden zusätzlich auch vier frontale und drei sagittale Schnittebenen dargestellt (40).

Diese zusätzlichen Schnittebenen sind jedoch bei ungünstiger fetaler Lage häufig schwierig oder gar nicht zu akquirieren. Mit der Einführung der dreidimensionalen (3D) Volumensonographie ist es gelungen, die zusätzlichen Ebenen der erweiterten Sonographie des fetalen Gehirns aus dreidimensionalen Datensätzen entsprechend zu rekonstruieren (45, 46).

1.4 Grundlagen der Geburtsmechanik

Eine Geburt wird durch das Geburtsobjekt (das Kind), die Geburtskräfte (die Wehen) und den Geburtsweg (knöcherner Geburtskanal und Weichteile) bestimmt (47). Die Kenntnis der Geburtsmechanik ist die Voraussetzung für das Verständnis von regelrechten und pathologischen Geburtsverläufen. Die menschliche Geburt ist ein komplexer dreidimensionaler Prozess, bei dem das Kind eine schraubenartige Bewegung durch das mütterliche Becken vollzieht. Dabei passt sich das Kind den jeweiligen anatomischen maternalen Beckenverhältnissen durch Haltungs- und Stellungsänderungen an (48).

Der Kopf ist der größte und härteste Teil des Kindes und in 94 % aller Geburten geht er voran. Das Verhältnis der Kopfgröße zum Becken ist geburtsmechanisch ausschlaggebend für den Ablauf einer Geburt. Schon bei normalen Größenverhältnissen füllt der kindliche Kopf den maternalen Beckenraum bis auf einen schmalen Spalt aus (49). Am kindlichen Kopf kann bei der vaginalen Palpation unter der Geburt die Pfeilnaht getastet werden. Sie verläuft zwischen den beiden Scheitelbeinen und erlaubt Aussagen über die Rotation des Kopfes im Geburtskanal. Weiterhin können die dreizipflige kleine Fontanelle und die vierzipflige große Fontanelle palpiert werden. Bei einer regelrechten Einstellung als vordere Hinterhauptslage übernimmt die kleine Fontanelle als knöcherner Leitstelle die Führung und dementsprechend hat die Flexion des Kopfes das kleinste Durchtrittsplanum suboccipito-bregmaticum mit 32 cm zur Folge (50).

Der Geburtsweg besteht aus dem Knochenkanal und dem inneren und äußeren Weichteilrohr. Der Knochenkanal des kleinen Beckens bestimmt die Form, die Weite und die Richtung des Geburtsweges. Man unterscheidet drei Etagen des kleinen Beckens. Der querovale Beckeneingangsraum wird durch die Linea terminalis, dem Promontorium und der Oberkante der Symphyse begrenzt. Die kreisförmige

Beckenmitte stellt einen großen, gekrümmten Raum mit unterschiedlich hoher Vorder- und Hinterwand dar (51). Sie ist etwa 8 cm hoch und beinhaltet die Interspinalenebene (auch Beckenenge genannt), die sich vom unteren Symphysenrand und seitlich durch die gut zu tastenden Spinae ischiadecae erstreckt. Der Beckenausgangsraum ist längsoval und wird vom Unterrand der Symphyse, den Sitzbeinhöckern und dem Steißbein begrenzt (50).

Die Beckenführungslinie ist die Verbindungslinie der Mittelpunkte der Beckenebenen. Sie verläuft vom Beckeneingang bis zur Interspinalenebene gerade, um dann nach vorne bogenförmig um die Symphyse abzuknicken (Knie des Geburtskanals oder Geburtsparabel (52).

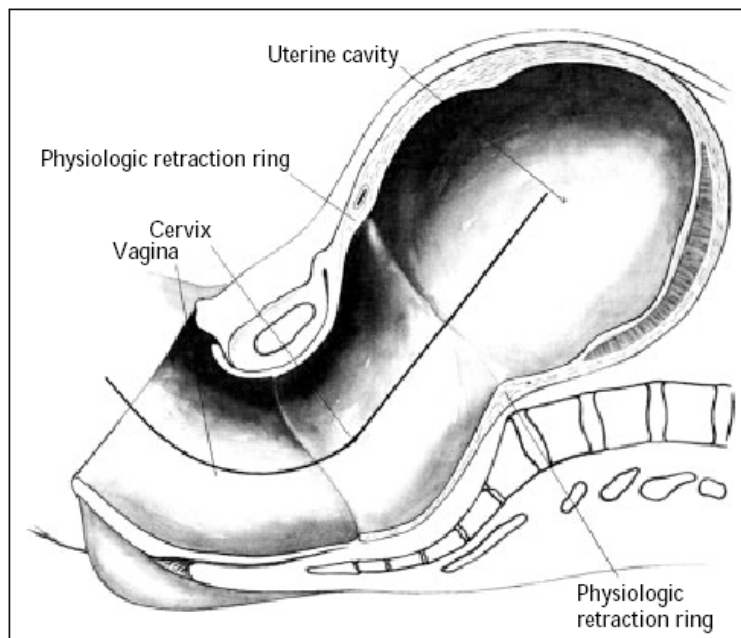


Abbildung 6: Darstellung des knöchernen Geburtskanals mit völlig ausgewaltem innerem Weichteilrohr. Die Beckenführungslinie ist bis zur Interspinalenebene gerade, dann nimmt sie einen bogenförmigen Verlauf um die Symphyse (52).

Das innere Weichteilrohr besteht aus dem unteren Uterinsegment, der Zervix, der Scheide und der Vulva. Am Ende der Austreibungsphase ist der Muttermund auf 10 cm vollständig eröffnet und das innere Weichteilrohr komplett ausgewalzt. Das äußere Weichteilrohr umfasst die Beckenbodenmuskulatur mit dem Diaphragma pelvis (M. levator ani) und dem Diaphragma urogenitale. Außerhalb der Geburt stellen die flachen, dachziegelartig übereinander geschobenen Muskelfasziensysteme der Beckenbodenmuskulatur die kaudale Begrenzung des Beckens dar. In der Austreibungsphase wird das äußere Rohr völlig entfaltet und verlängert sich von 4 cm auf 15 cm.

Wehen stellen die Geburtskräfte dar. Sie dilatieren die Cervix und treiben das Kind durch den Geburtskanal (53). Der Uterus unterteilt sich bei der Geburt funktionell in den oberen aktiven und den unteren passiven Abschnitt. Das corpus uteri ist ein muskelstarker, kontraktionsfähiger Hohlmuskel, der den oberen Abschnitt darstellt und die Wehenarbeit leistet. Dabei kommt es zur Kontraktion und Retraktion der uterinen Muskelfasern (54). Die Bandsche Furche stellt die Grenze zum passiven unteren Abschnitt dar, der das untere Uterinsegment und die cervix uteri umfasst. Unter den Wehen dehnt und erweitert sich der untere Abschnitt. Für den Geburtsprozess sind vor allem die Eröffnungs-, Austreibungs- und Presswehen wichtig. Die Presswehen erreichen mit etwa 200-250 Montevideo-Einheiten ein Mehrfaches des intrauterinen Drucks im Verhältnis zu den Austreibungswehen (55). Für einen Geburtsfortschritt sind die Wehenstärke, Wehendauer, Wehenpause und Wehenfrequenz ausschlaggebend.

Bei einer regelrechten Geburt aus Schädellage muss der kindliche Kopf beim Durchtritt durch den Geburtskanal die folgenden Stadien passieren:

- Eintritt in den Beckeneingang
- Durchtritt durch die Beckenmitte
- Austritt aus dem Geburtskanal
- Äußere Drehung des Kopfes

Im angloamerikanischen Raum werden die teilweise gleichzeitig ablaufenden kindlichen Bewegungen sub partu in die sieben „cardinal movements“ unterteilt (47):

1. Engagement:

Der größte Umfang des kindlichen Kopfes hat die Linea terminalis überschritten und die knöcherne Leitstelle ist in der Interspinalenebene zu tasten.

2. Descent:

Der kindliche Kopf tritt im Geburtskanal tiefer.

3. Flexion:

Der kindliche Kopf wird vor allem durch die Weichteile des Geburtskanals passiv flektiert. Er unterliegt dem „Gesetz des geringsten Zwanges“ und das kleinste Durchtrittsplanum suboccipito-bregmaticum stellt sich ein.

4. Internal rotation:

Ebenfalls durch die Weichteile und die Form des knöchernen Geburtskanals rotiert das kindliche Hinterhaupt in 95 % nach vorn symphysenwärts (56).

5. Extension:

Der kindliche Kopf steht maximal gebeugt auf dem Beckenboden. Um aus dem Geburtskanal austreten zu können, muss der Kopf sich bogenförmig um die Symphyse bewegen. Die Nackenhaargrenze des Kindes schiebt sich als Stempunkt (Hypomochlion) gegen den Unterrand der Symphyse. Durch eine Deflexion, also reine Haltungsänderung des Kopfes, werden nacheinander das Hinterhaupt, das Vorderhaupt, die Stirn, das Gesicht und das Kinn geboren.

6. External rotation:

Der bereits geborene Kopf vollzieht die äußere Drehung, das kindliche Gesicht schaut zur Seite. Die Schulterbreite stellt sich längs im Beckenausgang ein.

7. Expulsion:

Geburt des restlichen kindlichen Körpers, nachdem zuerst die vordere und anschließend die hintere Schulter geboren wurden.

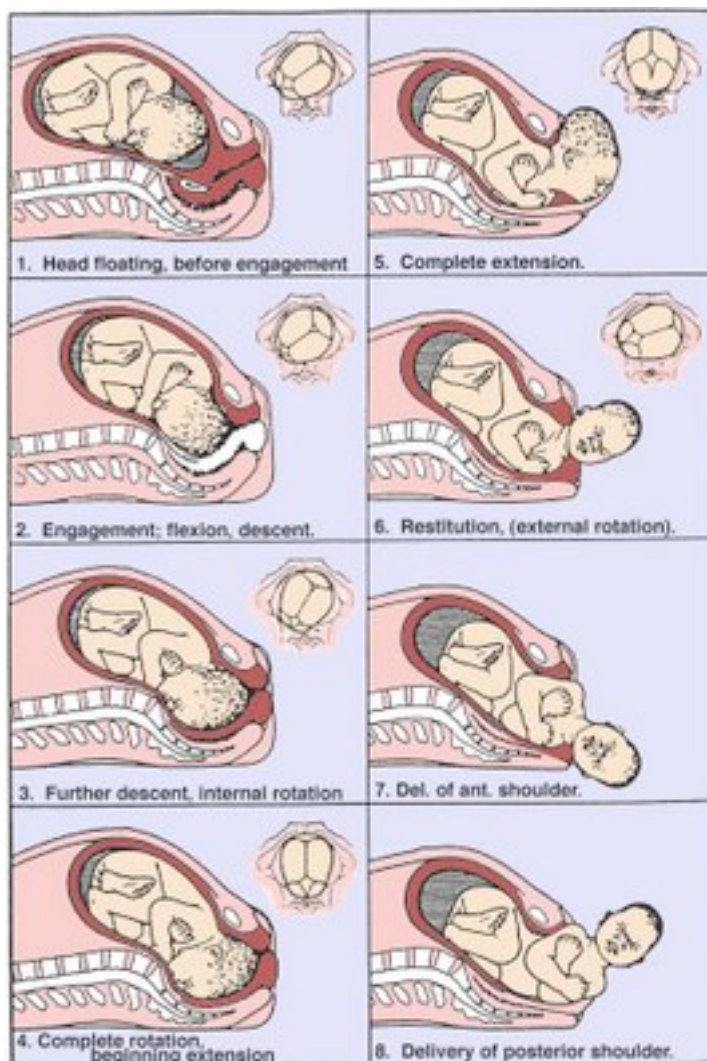


Abbildung 7: Kindliche Bewegungen beim Durchtritt durch den Geburtskanal (47).

Der aufrechte Gang des Menschen brachte die Lendenlordose mit sich, wodurch die Passage des kindlichen Kopfes durch das knöcherne Becken erschwert wurde. Die Zunahme des Gehirnvolumens – zweifelsohne ein entscheidender Schritt auf dem Weg zum Homo sapiens – als dessen Folge zwangsläufig die Kopfgröße wuchs, hat das Risiko eines Geburtsstillstandes bei zephalopelvinem Missverhältnis evolutionsgeschichtlich deutlich ansteigen lassen (57-60).

1.5 Der Höhenstand des kindlichen Kopfes im maternalen Becken und seine Feststellung

Bei der vaginalen Untersuchung können der geübte Geburtshelfer und die Hebamme das Tieftreten des Kopfes innerhalb des Geburtskanals Zentimeter für Zentimeter verfolgen (50).

Es ist hervorzuheben, dass bei der vaginalen Palpation unter der Geburt nur eine Aussage über den Höhenstand der knöchernen Leitstelle, also dem tiefsten Punkt des vorangehenden kindlichen Teils zu treffen ist. Während das Durchtrittsplanum als der größte Kopfdurchmesser mittels vaginaler Untersuchung nicht bestimmbar ist. Zum Vergleich der erhobenen Tastbefunde werden diese auf einen festen Knochenpunkt im maternalen Becken bezogen. Hierzu werden die gut zu tastenden Spinae ischiadicae verwendet und die gedachte Verbindungsebene der beiden Spinae, die sogenannte Interspinalenebene, definiert. Nach Hodge (61) ergeben sich bei der vaginalen Untersuchung folgende Höhenstände:

1. Der Kopf steht tief und fest im Beckeneingang, wenn die knöchernen Leitstelle in der Interspinalenebene zu tasten ist. Der kindliche Kopf hat mit seinem größten Umfang die Terminalebene überschritten. Dieser Höhenstand wird als „engagement“ bezeichnet.
2. Der Kopf steht mit seinem größten Kopfumfang in der Beckenmitte, wenn die Spinae ischiadicae nicht mehr zu tasten sind.
3. Wenn der Kopf den Beckenboden erreicht hat, füllt er die ganze Beckenhöhle aus und sitzt der Beckenbodenmuskulatur fest auf.

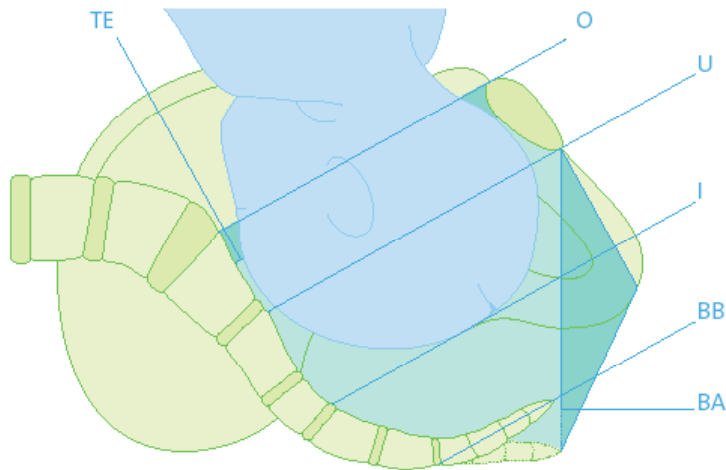


Abbildung 8: Höhenstand des kindlichen Kopfes in Beckenmitte. Darstellung im Parallelebenensystem nach Hodge. TE Terminalebene, O obere Schoßfugenrandebene, U untere Schoßfugenrandebene, I Interspinaebene, BB Beckenbodenebene, BA Beckenausgangsebene (62).

Alternativ kann die Leitstelle durch Angabe von Zentimetern oberhalb (-) bzw. unterhalb der Interspinaebene (+) palpatorisch approximativ verfolgt werden.

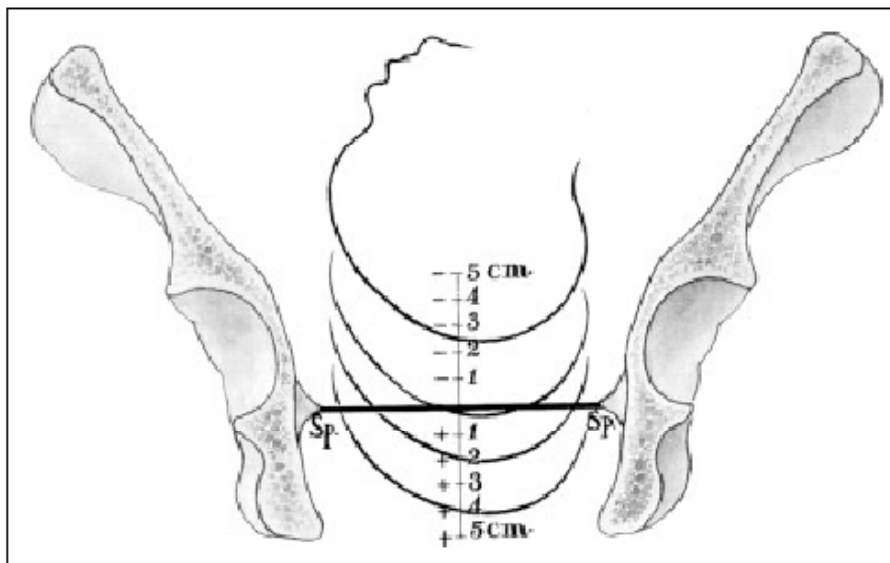


Abbildung 9: Höhenstandsbestimmung der knöchernen Leitstelle in Bezug auf die Interspinaebene nach De Lee (63). Die positiven und negativen Ziffern entsprechen Zentimetern über oder unter der Interspinaebene (± 0).

Diese Einteilung nach De Lee (63) ist möglich, weil bei einer Hinterhauptshaltung der Abstand von der kleinen Fontanelle bis zum geburtsmechanisch wirksamen Planum suboccipito-bregmaticum 4 cm beträgt (64).

Erschwert wird die palpatorische Diagnose des fetalen Höhenstandes durch folgende drei Umstände (65):

1. Ungeübte schätzen den Kopfstand regelmäßig zu tief ein, weil sie nicht genau in der Beckenführungslinie untersuchen.

2. Bei Geburten, die nach dem Blasensprung noch lange dauern, kann die Kopfgeschwulst (caput succedaneum) erheblich ausgeprägt sein. Der Bezugspunkt am Kopf ist aber die knöchernerne Leitstelle und die Kopfgeschwulst vermittelt dem Untersucher einen falsch zu tiefen Höhenstand.
3. Bei Deflexionshaltung ist zu berücksichtigen, dass sich das Durchtrittsplanum mehr als 4 cm über der knöchernen Leitstelle befindet.

Die Höhenstände sicher zu diagnostizieren, ist von allergrößter praktischer Bedeutung, andernfalls können schwerwiegende Folgen für Mutter und Kind beispielsweise bei vaginal-operativen Entbindungen entstehen (66).

Allerdings haben Studien zur Validität und Reliabilität von der vaginalen, palpatorischen Höhenstandsdiagnostik ernüchternde Ergebnisse gezeigt (67, 68). In einer französischen Untersuchung an einem geburtshilflichen Phantom betrug die Irrtumswahrscheinlichkeit 50-80 %.

Aus diesem Grund hat sich in den letzten Jahren der translabiale (transperineal im englischen Sprachraum) Ultraschall zur intrapartalen validen Höhenstandsdiagnostik etabliert (69-73). Dieser ergänzt die Einschätzung der Dynamik der Austreibungsphase und den möglichen Erfolg einer vaginal operativen Entbindung. Ein mit einem Handschuh überzogener konvexer Schallkopf wird in der Mediosagittalebene auf die Labia majora aufgesetzt.

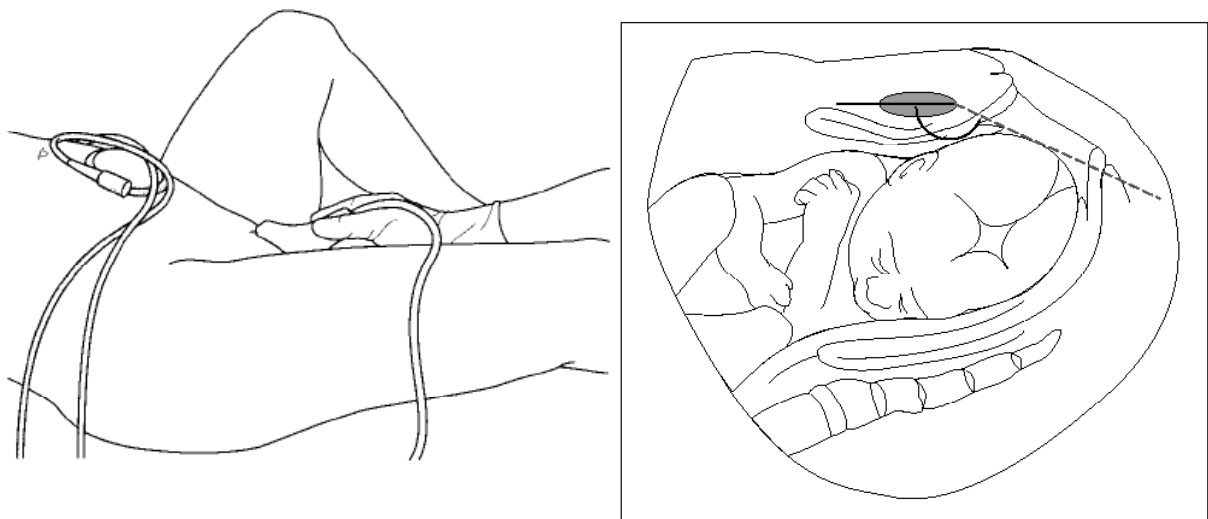


Abbildung 10: Links: Schema der translabialen/transperinealen Ultraschalluntersuchung zur Höhenstandsdiagnostik (65). Rechts: Darstellung des angle of progression: Eine Linie wird durch die Mitte der Symphyse gelegt. Eine zweite Linie verläuft von der Unterkante der Symphyse tangential an den kindlichen Kopf. Diese beiden Linien bilden den angle of progression (74).

Die maternale Symphyse kann dabei gut identifiziert werden und sollte möglichst horizontal im Ultraschallbild dargestellt werden. Der kindliche Kopf mit seiner knöchernen Schädelkalotte ist ein weiterer Referenzpunkt. Die Spinae ischiadicae können bei der translabialen Ultraschalluntersuchung nicht dargestellt werden.

Die MRT-Pelvimetrie wurde zur Prädiktion eines zephalopelvinen Missverhältnisses durchgeführt und erlaubt die exakte Bestimmung der Interspinalenebene (75-77). Weiterhin hat das fetale MRT in der modernen Geburtsmedizin einen wachsenden Stellenwert als additives bildgebendes Verfahren bei fetalen Fehlbildungen (78-80), bei der Beurteilung der Plazentamorphologie (81) und bei funktionell metabolischen Untersuchungen (82). Es gilt als sicheres Verfahren für Mutter und Fetus (83-87). Die Entwicklung von offenen MRT-Geräten ermöglicht erstmalig die Intervention bei laufendender Bildgebung und hat auch den Patientenkomfort erhöht (88). Wir verwendeten die MRT-Beckendarstellung bei Schwangeren um den Geburtstermin zur Höhenstandsbestimmung des kindlichen Kopfes in Bezug zur Interspinalenebene und verglichen die Resultate mit dem transperinealen Ultraschall.

Alle Publikationen der vorliegenden Habilitationsschrift sind in peer-reviewed Zeitschriften veröffentlicht oder in Druck befindlich. Die vorgestellten Ergebnisse waren Gegenstand von Postern und Vorträgen auf nationalen und internationalen Kongressen. Alle Arbeiten sind vollständig und der Reihe nach im Folgenden angefügt und werden im Anschluss ausführlich im Vergleich zur Literatur diskutiert.

2. Eigene Arbeiten

Bolz N, Kalache KD, Fotopoulou C, Proquitte H, Slowinski T, Hartung JP, Henrich W, Bamberg C. Value of Doppler sonography near term: can umbilical and uterine artery indices in low-risk pregnancies predict perinatal outcome? J Perinat Med, in press

Die Dopplersonographie kann im Hochrisikokollektiv die perinatale Mortalität signifikant senken. Ob ein Screening im low-risk-Kollektiv mittels Dopplersonographie gerechtfertigt ist, wird kontrovers diskutiert.

Das Ziel unserer Arbeit war es, in einem prospektiven Ansatz das perinatale outcome nach einer dopplersonographischen Untersuchung der A. umbilicalis und Aa. uterinae am Termin zu evaluieren. 514 Schwangere ohne ein geburtsmedizinisches Risiko wurden zwischen 37 und 41 SSW untersucht. Unsere Ergebnisse zeigten den Zusammenhang zwischen der utero- und fetoplazentaren Perfusion und dem Geburtsgewicht. Bei erhöhten Dopplerwerten wurden signifikant mehr hypotrophe Neonaten geboren. Der Geburtsmodus konnte mittels Dopplersonographie nicht vorhergesagt werden. Insbesondere gab es keinen Zusammenhang zwischen erhöhten Dopplerwerten und sekundären Sectiones wegen fetalen Distress. Der geringe positive Vorhersagewert (4 %) bei pränatal erhöhten Dopplerwerten in der A. umbilicalis für eine neonatale Azidose steht einem hohen negativen Vorhersagewert für normazide postpartale pH-Werte bei normalen Dopplerwerten gegenüber.

Kalache KD, Eder K, Esser T, Proquitte H, Stoltenburg-Didinger G, Hartung JP, Bamberg C. Three-dimensional ultrasonographic reslicing of the fetal brain to assist prenatal diagnosis of central nervous system anomalies. J Ultrasound Med 2006;25:509-514

Die korrekte vorgeburtliche Diagnosestellung von fetalen ZNS-Anomalien ist eine Herausforderung für den Pränataldiagnostiker. Die sonographische Basisuntersuchung des fetalen ZNS beinhaltet drei axiale Schnittebenen. Bei Auffälligkeiten werden zusätzlich frontale und sagittale Ebenen gefordert. Die Akquirierung dieser Schnittebenen mittels 2D-Sonographie ist mitunter kaum oder gar nicht möglich. Die 3D-Sonographie stellt eine der interessantesten und innovativsten Techniken der pränatalen Ultraschalldiagnostik dar.

Ziel unserer Studie war die Evaluation, ob eine 3D-Volumensonographie des fetalen ZNS bei der pränatalen Diagnosestellung hilfreich ist. Dazu wurde bei acht Feten mit ZNS-Anomalien zwischen 20 und 30 SSW eine neuartige Schnittbilddarstellung mittels Oblique View eingesetzt. Die pränatalen Diagnosen wurden entweder mit den MRT-Befunden oder pathologischen Resultaten verglichen. Wir konnten zeigen, dass die Rekonstruktion von frei wählbaren Schnittebenen durch die Technik des Oblique View in der 3D-ZNS-Volumensonographie eine exakte Methode zur pränatalen Diagnosestellung bei fetalen ZNS-Anomalien darstellt.

Bamberg C, Scheuermann S, Slowinski T, Dückelmann AM, Vogt M, Nguyen-Dobinski TN, Streitparth F, Teichgräber U, Henrich W, Dudenhausen JW, Kalache KD. Relationship between fetal head station established using an open magnetic resonance imaging scanner and the angle of progression determined by transperineal ultrasound. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2011;37:712-716

In den Kreißsälen weltweit wird die vaginale Palpation verwendet, um den fetalen Höhenstand sub partu zu evaluieren. Studien zeigten, dass diese Methode subjektiv, fehlerbehaftet und nicht reliabel ist; insbesondere dann, wenn bei einem Geburtsstillstand zwischen einer Geburtsbeendigung per sectionem oder einer vaginal operativen Geburt entschieden werden muss, kann mithilfe der vaginalen Palpation keine sichere Aussage zum wahrhaften Höhenstand getroffen werden. In der jüngeren Vergangenheit hat sich eine neue intrapartale sonographische Untersuchungsmethode zur Höhenstandsdiagnostik etabliert. Mittels transperinealen/translabialen Ultraschall wird der kindliche Kopf in Bezug zur maternalen Symphyse evaluiert. Bisher konnte einem angle of progression kein objektiver Höhenstand zugeordnet werden, da die Interspinalenebene als Referenzebene im transperinealen Ultraschall nicht dargestellt werden kann.

In unserer Studie verwendeten wir bei 31 Schwangeren am Termin ein offenes MRT und bestimmten in einer frontalen MRT-Pelvimetrie-Ebene den Abstand der Interspinalenebene zur knöchernen Leitstelle. Die Ergebnisse korrelierten wir mit dem im Anschluss mittels transperinealen Ultraschall bestimmten angle of progression. Wir konnten erstmals zeigen, dass ein angle of progression von 120° einem Höhenstand in der Interspinalenebene entspricht. Dieses Maß ist von praktischer Bedeutung, da vaginal-operative Entbindungen nur durchgeführt werden sollten, wenn die knöcherne Leitstelle die Beckenmitte erreicht hat.

Bamberg C, Scheuermann S, Fotopoulou C, Slowinski T, Dückelmann AM, Teichgräber U, Streitparth F, Henrich W, Dudenhausen JW, Kalache KD. Angle of progression measurements of fetal head at term: a systematic comparison between open magnetic resonance imaging and transperineal ultrasound. Am J Obstet Gynecol 2012;206:161.e1-5

Die transperineale sonographische Messung des angle of progression ist eine neue Technik zur objektiven Höhenstandsbestimmung. Der fetale Kopf und die maternale Symphyse sind die anatomischen Strukturen, die dafür abgebildet werden müssen. Ziel unserer Studie war der Vergleich der Messung des angle of progression mittels transperinealer Sonographie und MRT als Goldstandard. Schwangere am Termin mit einer Einlingsgravidität erhielten eine Pelvimetrie im offenen MRT zur Darstellung der Mediosagittalebene. Beide Methoden zur Bestimmung des angle of progression zeigten eine signifikante Korrelation. Der Intraclass-Koeffizient war mit 0,89 sehr hoch. Das Bland-Altman-Diagramm, bei dem die Differenz von 1.4° beider Methoden gegenüber deren Mittelwerten dargestellt wird, zeigte eine hohe Übereinstimmung. Daher kann die transperineale Sonographie sehr gut zur Bestimmung des angle of progression eingesetzt werden.

Bamberg C, Rademacher G, Güttler F, Teichgräber U, Cremer M, Bühner C, Spies C, Hinkson L, Henrich W, Kalache KD, Dudenhausen JW. Human birth observed in real-time open magnetic resonance imaging. Am J Obstet Gynecol 2012;206:505.e1-6

Seit jeher hat es Menschen interessiert und fasziniert, was bei einer Geburt passiert. Lange war die Palpation die einzige Methode, um den Höhenstand, die Muttermundweite und die Rotation des kindlichen Kopfes im maternalen Becken zu evaluieren. Zusätzliche Informationen zur Geburtsmechanik konnten durch Gefrierschnitte an Leichen, Röntgenuntersuchungen und Ultraschall sub partu gewonnen werden. Dennoch blieb vieles Vermutung.

Nachdem wir den Prototyp eines MRT-kompatiblen telemetrischen CTG-Gerätes entwickelt hatten, konnten wir erstmalig eine Geburt im offenen MRT abbilden. Das Ende der Austreibungsphase zeigt, wie der kindliche Kopf in der Wehe tiefer tritt. Wenn der Nacken die maternale Symphyse erreicht hat, kommt es simultan mit dem Descent zur Deflexion und der Kopf wird geboren. Die MRT-Sequenz zeigt die dynamischen dreidimensionalen Interaktionen zwischen Kind und maternalem Becken in hoher Detailgenauigkeit für knöchernen Strukturen und Weichteile. Wenn die physiologischen Vorgänge einer vaginalen Geburt vollständig verstanden werden, können diese Erkenntnisse Hinweise auf pathologische Geburtsverläufe geben.

3. Diskussion

3.1 Dopplersonographie am Termin

Die Dopplersonographie am Termin in einem low-risk-Kollektiv findet sich nicht in der Indikationsliste der aktuellen Mutterschaftsrichtlinien. Ob der Einsatz einen Benefit für Mutter und Kind bringt, wird kontrovers diskutiert (89). Die Cochrane-Analyse kommt zu dem Schluss, dass es für die Durchführung einer Routine-Doppleruntersuchung der A. umbilicalis und A. uterina derzeit keine Evidenz gibt (90). Sie berufen sich auf prospektiv randomisierte Studien, die gezeigt haben, dass sich die breit gefächerte Anwendung der Dopplersonographie in unselektierten oder Niedrig-Risiko-Kollektiven weder positiv auf die perinatale Mortalität noch auf die Morbidität auswirkt (91-96).

Auch wenn kein statistisch signifikantes Ergebnis erzielt wurde, konnte in der Doppler-French-Study dagegen eine 3fach geringere perinatale Mortalität (OR 0,33; 95 % CI 0,06-1,33) durch den Einsatz der Dopplersonographie im 2. und 3. Trimenon verzeichnet werden (91). Ein vergleichbares Ergebnis haben Whittle und Mitarbeiter publiziert (96). Die OR für einen intrauterinen Fruchttod war 0,34 bei dopplersonographischer Überwachung im Vergleich zum Kontrollkollektiv. Bei einem CI von 0,10-1,07 blieb es statistisch nicht signifikant. Auch eine niederländische prospektiv randomisierte Studie konnte durch den Einsatz der Dopplersonographie am unselektierten Kollektiv eine Halbierung der perinatalen Mortalität verzeichnen (OR 0,49; 95 % CI 0,17-1,43) (97).

Bei fehlender Evidenz wird die Dopplersonographie im 3. Trimenon und am Termin dennoch in der klinischen Routine häufig durchgeführt und scheint einen gewissen Stellenwert bei der Beurteilung des fetalen Wohlergehens zu haben.

Ziel unserer Untersuchung war es, die diagnostische Wertigkeit der Nabelarterien- und Uterina-Flowmessung am Termin in Bezug auf eine spätere fetale Gefährdung sub partu zu evaluieren. Diese Untersuchungen wurden prospektiv unselektiert an einem Niedrig-Risiko-Kollektiv durchgeführt.

Der Einfluss der Widerstandsindices in der A. umbilicalis im 3. Trimenon auf das Geburtsgewicht wurde von verschiedenen Autoren gezeigt. Goffinet und Mitarbeiter untersuchten in einer französischen Multizenterstudie 2.016 Schwangere eines low-risk-Kollektivs. Bei den Patientinnen wurde zwischen der 28. und 34. SSW einmalig eine Doppleruntersuchung einer Nabelschnurarterie durchgeführt. Es gab einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Nabelschnurperfusion und dem

Geburtsgewicht (98). Bei pathologisch erhöhten Dopplerwerten betrug die OR 2,3 für die Geburt eines hypotrophen Neugeborenen. Bonnin und Mitarbeiter beobachteten auch eine lineare Korrelation zwischen steigenden RI in der Nabelschnurarterie und abnehmenden Geburtsgewichten (99). Eine aktuellere irische Studie konnte bei pathologisch erhöhten Dopplerwerten in der A. umbilicalis und A. uterina eine signifikant erhöhte Inzidenz von untergewichtigen Neugeborenen finden (100). In unserem Kollektiv konnten wir den Zusammenhang zwischen den Dopplerwerten in der A. umbilicalis, dem Mittelwert aus beiden Aa. uterinae und dem Geburtsgewicht bestätigen. Bei einem pränatalen PI > 1,2 in der Nabelschnurarterie waren 30 % der Neugeborenen hypotroph.

Der Geburtsmodus in unserer Studie war unabhängig von der uteroplazentaren Perfusion. Wir fanden jedoch, dass bei Schwangeren mit erhöhten Widerstandsindices in der A. umbilicalis häufiger eine primäre und seltener eine sekundäre Sectio durchgeführt wurde. Wir interpretieren das Ergebnis durch einen zusätzlichen dopplerunabhängigen Selektionsbias. Die Rate an sekundären Kaiserschnitten aufgrund von pathologischen CTGs war unabhängig von der pränatal gemessenen Perfusion in der A. umbilicalis oder A. uterina. Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu den von Yoon und Mitarbeiter publizierten Daten (101). Sie beobachteten, dass ein erhöhter Widerstand in der A. umbilicalis zu signifikant häufigeren sekundären Sectiones wegen fetalen Distress führte (18 % vs. 2 %, $p < 0,005$). Weiterhin war bei diesen Neugeborenen in 48 % ein 5' Minuten APGAR < 7 zu verzeichnen. Bei pränatal normalen Dopplerindices in der A. umbilicalis waren es nur 3 %.

Das neonatale outcome bezüglich einer postpartalen Azidose oder einem APGAR-Wert < 7 nach fünf Lebensminuten kann in unserem Kollektiv nicht durch eine Doppleruntersuchung in der A. umbilicalis oder der A. uterina vorhergesagt werden. Es fand sich allerdings ein hoher negativer prädiktiver Wert für einen normalen postpartalen pH-Wert in der Nabelschnurarterie, wenn der PI pränatal < 1,2 war. Ähnliche Resultate wurden bereits von Arabin und Mitarbeiter in der „Safe“-Studie beschrieben (102).

Arduini und Mitarbeiter haben bei 1.000 Schwangeren aus einem Niedrig-Risiko-Kollektiv zwischen der 36. und 40. SSW eine Doppleruntersuchung der A. umbilicalis und A. uterina durchgeführt (103). Sie verglichen die Resultate mit dem antepartalen

CTG, um eine Kompromittierung der Neonaten vorherzusagen. Auch wenn die Dopplersonographie etwas besser als das CTG abschnitt, blieb die Sensitivität mit 20-30 % sehr gering. Sie fanden weiterhin heraus, dass ein erhöhter Widerstand in der A. umbilicalis zu einer signifikant erhöhten Rate an Sectiones wegen CTG-Auffälligkeiten und einem APGAR von <7 nach fünf Lebensminuten führte. Diese Ergebnisse konnten wir in unserem Kollektiv nicht bestätigen.

Nach aktueller Studienlage ist die grundsätzliche Anwendung der Dopplersonographie im unausgewählten Niedrig-Risiko-Kollektiv nicht zu rechtfertigen. Der zunehmende ökonomische Druck im Gesundheitswesen und eine Personalreduktion in den Kliniken sprechen zusätzlich gegen ein generelles Screening im 3. Trimenon hinsichtlich der utero- und fetoplazentaren Perfusion. Dies ist vor allem durch die geringe Inzidenz an Pathologie bei risikoarmen Schwangerschaften zu erklären. Es wurde ausgerechnet, dass 9.200 Studienteilnehmerinnen nötig wären, um zu zeigen, dass die Dopplersonographie der A. umbilicalis im low-risk-Kollektiv die perinatale Mortalität halbiert (91). Weiterhin ist das Management bei pathologisch erhöhten Dopplerwerten nicht standardisiert, und bei ärztlichen Interpretationsschwierigkeiten der Dopplerresultate kann es zu unnötigen Interventionen (Sectiones, Geburtseinleitungen, stat. Aufnahmen) und Verunsicherung der Schwangeren führen. Auf der anderen Seite bestätigen unauffällige Widerstandsindices in der A. umbilicalis am Termin bei einem hohen negativen Vorhersagewert $>90\%$ das kindliche Wohlergehen. Erhöhte Dopplerwerte in der A. umbilicalis am Termin sind aber insgesamt selten und zeigen ein leicht erhöhtes Risiko für fetalen Distress unter Wehen an (positiver prädiktiver Wert $<30\%$). Die Dopplersonographie kann vor allem bei unklaren Befunden (suspektes CTG) und gleichzeitigen Risikofaktoren (abnehmende Kindsbewegungen) (104), zeitliche Übertragung (105), Oligohydramnion (106) als additive Methode hilfreich eingesetzt werden.

3.2 Vorteile der 3D-Sonographie bei der fetalen ZNS-Beurteilung

Die 3D-Sonographie ist eine der interessantesten und innovativsten bildgebenden Verfahren der pränatalen Diagnostik. Sie wurde in den letzten 12 Jahren in zahlreichen Publikationen zur Beurteilung des fetalen ZNS behandelt (45, 46, 107-

110). Dabei war vor allem von Interesse, ob der Einsatz der 3D-Sonographie einen Zugewinn an Informationen brachte oder die pränatale Diagnose von fetalen ZNS-Anomalien zuverlässiger gestellt werden konnte. Der Vorteil der 3D-Sonographie gegenüber des konventionellen 2D-Ultraschalls wurde auch bei NRD untersucht. Lee und Mitarbeiter (111) verglichen bei acht Feten mit einer spina bifida die zwei- und dreidimensionale Darstellung des Defektes. Die pränatale Festlegung des Höhendefektes ist von größter Wichtigkeit für die Beratung der Eltern hinsichtlich der zu erwartenden Gehfähigkeit des Kindes. Mittels 3D-Sonographie konnten Lee und Mitarbeiter die Höhenlokalisierung des Defektes an der Wirbelsäule in acht von neun Feten korrekt diagnostizieren. Der 2D-Ultraschall konnte nur bei sechs von neun Feten die korrekten Wirbelkörper identifizieren. Auch wenn die konventionelle 2D-Sonographie die Standardmethode zur pränatalen Diagnose von fetalen ZNS-Anomalien ist, kann der gezielte Einsatz der 3D-Sonographie ergänzende Informationen bringen. Das sonographische 3D-Neuroimaging eignet sich bestens für multidisziplinäre Beratungsgespräche mit den werdenden Eltern, Neuropädiatern oder Neurochirurgen falls fetale ZNS-Läsionen vorliegen.

Die Vorteile der 3D-Sonographie im Gegensatz zur 2D-Sonographie bei der Beurteilung des fetalen ZNS sind vielfältig (112):

1. Surface Mode: Oberflächendarstellung des Rückens und Kopfes
2. Maximum Mode: Hervorheben von knöchernen Strukturen wie der Wirbelsäule und des Neurokranium
3. Multiplanarmodus: Darstellung intrakranieller Strukturen und der Wirbelsäule
4. Tomographic Ultrasound Imaging (TUI): Darstellung des Volumens in mehreren parallelen Bildebenen
5. Thick Slice Imaging: Darstellung der intrazerebralen Sonoanatomie
6. VOCAL: Volumenberechnung intrakranieller Läsionen
7. Inversion Mode: Hervorheben hypoechogener Strukturen im fetalen ZNS
8. Power Doppler zur 3D-Gefäßdarstellung des fetalen Gehirns

Der Multiplanarmodus nimmt bei der Darstellung der fetalen Neuroanatomie eine besondere Rolle ein. Dabei werden alle drei senkrecht (orthogonal) aufeinander stehenden Schnittebenen (axial, frontal, sagittal) gleichzeitig auf dem Bildschirm dargestellt.

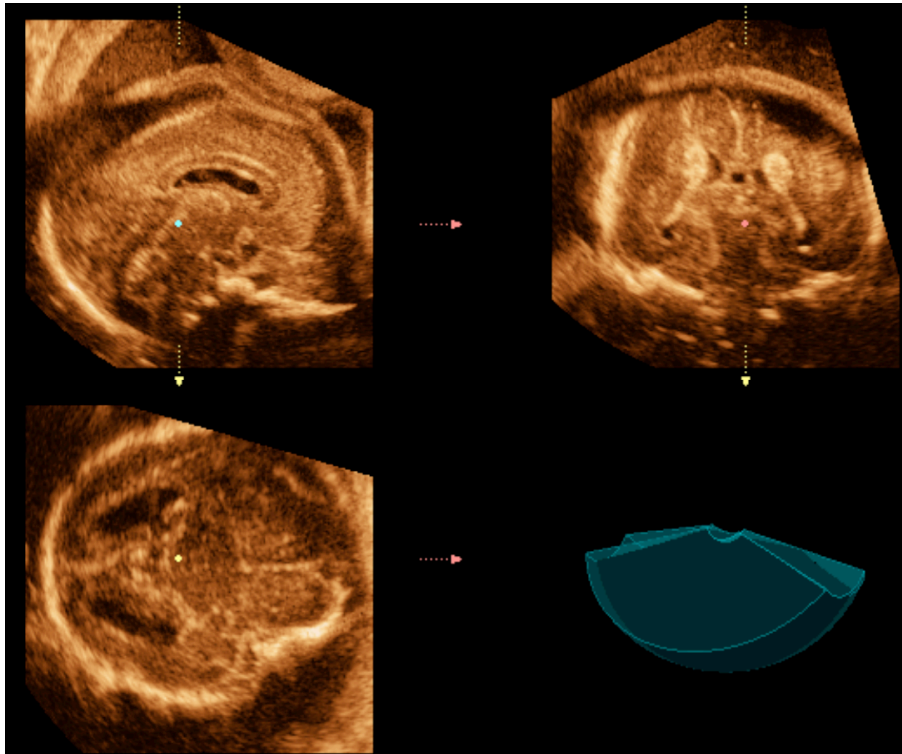


Abbildung 11: Volumendatensatz eines fetalen Gehirns im 2. Trimenon im Multiplanarmodus. Die drei orthogonalen Ebenen werden senkrecht zueinander dargestellt. Der Punkt stellt den Schnittpunkt aller drei Ebenen dar, und der Untersucher kann diesen Punkt im Volumen navigieren.

Auch wenn die sagittalen und frontalen Ebenen vollständig rekonstruiert sind und eine reduzierte Bildqualität aufweisen, ist ein großer Vorteil, diese Ebenen darstellen zu können. In der Regel kann die Frontalebene des kindlichen Kopfes in der B-Bild-Sonographie nicht oder nur sehr eingeschränkt visualisiert werden. Ein weiterer Vorteil der Multiplanardarstellung des fetalen Gehirns ist die Navigationsmöglichkeit im Volumen. Ein Punkt stellt den gemeinsamen Schnittpunkt aller drei orthogonalen Ebenen dar. Dadurch besteht die Kontrollmöglichkeit der exakten Darstellungsebene (109, 113). Vor allem für die Beurteilung von Mittellinien-Strukturen, wie dem Corpus Callosum oder der hinteren Schädelgrube mit dem Kleinhirnwurm in einer exakten Mediosagittalebene ist der Multiplanarmodus bestens geeignet. Im Laufe der vergangenen Jahre sind weitere Betrachtungsmöglichkeiten des Volumendatensatzes implementiert worden. Ähnlich einer Computer- oder Magnetresonanztomographie kann im Tomographic Ultrasound Imaging (TUI) oder Multislice Modus das Volumen in mehreren parallelen Bildebenen dargestellt werden. Hierbei kann sowohl die Anzahl der gezeigten Schnitte als auch der Abstand zwischen ihnen frei gewählt werden.

Die Fragestellung in unserer Studie war, ob der Einsatz einer neuartigen Betrachtungsmöglichkeit (Oblique View) bei der 3D-Sonographie bei fetalen ZNS-Anomalien einen Benefit darstellt (114). Bei acht Feten wurde zwischen der 20. und 30. SSW bei folgenden ZNS-Fehlbildungen der 3D-Ultraschall durchgeführt:

- Semilobäre Holoprosenzephalie
- Fehlendes cavum septi pellucidum
- Porenzephalie bei Zwillingstransfusionssyndrom
- Partielle Corpus Callosum Agenesie
- Dandy Walker Variante
- Schizenzephalie
- V. Galeni Aneurysma
- Dialtiertes Cavum vergae

Wir verwendeten mit dem Oblique View und dem Dynamic MR eine neuartige Technik, bei dem der Untersucher eine gezeichnete Linie oder Kurve durch die interessierenden Strukturen legt, die als Grundlage der Bildentstehung dienen. Dadurch wurden Ebenen darstellbar, die die Diagnosestellung erleichtern sollen.

Wir haben anhand von 3D-Volumina von Feten mit ZNS-Anomalien zeigen können, dass sich der Oblique View hervorragend für die Rekonstruktion von individuellen Schnittebenen einsetzen lässt.

Die verlustfreie Speicherung und Wiedergabemöglichkeit eines kompletten Volumensatzes ermöglicht die on- und off-line-Analyse, das Einholen einer Zweitmeinung und die Ausbildung an normalen und pathologischen Befunden. Der Aspekt der off-line-Analyse wurde erst kürzlich von Rizzo und Mitarbeiter anhand einer Multizenterstudie zur fetalen 3D-Sonographie bei ZNS-Anomalien belegt (115). Elf weltweit anerkannte Zentren für Pränataldiagnostik erhielten 217 anonymisierte 3D-Volumina von normalen und pathologischen ZNS-Befunden. Die Experten sollten off-line die Volumina auswerten. Die hohe Sensitivität (93,3 %), die Spezifität (96,5 %), der positive (96,5 %) und negative (93,3 %) prädiktive Wert sowie die niedrige Rate an falsch positiven (3,5 %) und falsch negativen (6,7 %) Befunden zeigte die Zuverlässigkeit der Diagnostik aus 3D-Volumina. Hervorzuheben ist auch die Übereinstimmungsrate der Diagnosen von 0,92 (95 % CI 0,88-0,97) zwischen den einzelnen Zentren. Schlussfolgernd stellt die 3D-Sonographie des fetalen ZNS eine weiterführende Untersuchungsmodalität dar, die vor allem bei Auffälligkeiten in

der Basisuntersuchung von erfahrenen Pränataldiagnostikern verwendet wird. In den letzten Jahren hat die pränatale Diagnostik im 1. Trimenon an Bedeutung gewonnen, sodass nach Kenntnis der normalen Neurosonoanatomie auch der 3D-Ultraschall verstärkt zur frühen Detektion einer Holoprosenzephalie oder Anenzephalie eingesetzt wird (112).

Bei allen genannten Vorteilen der 3D-Sonographie bei der Beurteilung des fetalen ZNS muss kritisch angemerkt werden, dass durch die Rekonstruktion von Schnittebenen auch Artefakte entstehen können, die eine Fehlbildung vortäuschen. Demnach müssen solche Befunde durch eine 2D-Sonographie bestätigt werden (116, 117).

Ein zunehmendes Forschungsgebiet in der Perinatalmedizin stellt die pränatale Evaluation von neurologischen Funktionen dar. Die Ätiologie der Zerebralparese ist nur ungenügend verstanden. Auch wenn 20 % der Zerebralparesen durch eine peripartale Asphyxie erklärbar sind, bleiben 80 % der Ursachen pränatal angesiedelt. Die Kombination aus 3D-Darstellung des sich entwickelnden fetalen Gehirns im Ultraschall mit funktionellen Analysen könnte eine Herausforderung der bildgebenden Diagnostik in der Geburtsmedizin bedeuten (118).

3.3 MRT und Ultraschall subpartu

3.3.1 Fetale Höhenstandsdiagnostik mittels transperinealen Ultraschall und MRT

Die Entscheidung ob eine Geburt bei Geburtsstillstand per sectionem oder vaginal-operativ beendet wird, hängt maßgeblich von der Muttermundsweite und dem Höhenstand der knöchernen Leitstelle im Geburtskanal ab. Vaginal-operative Entbindungen von Beckenmitte mit einem Höhenstand über +2 sollten nur bei hoher Erfolgsaussicht durch einen erfahrenen Geburtshelfer ausgeführt werden (119).

Eine Beendigung der Geburt durch eine Sectio nach fehlgeschlagener instrumenteller Entbindung erhöht das Risiko für ein neonatales Trauma und für die Aufnahme in eine neonatale Intensivstation erheblich. Die Rate an intrakraniellen Hämorrhagien beträgt dann 1 : 333 (120). Auch die maternale Morbidität ist bei sekundären Sectiones in der Austreibungsphase und tief eingestelltem Kopf im Geburtskanal deutlich erhöht. So war das Risiko von schweren Blutverlusten, Muttermundsverletzungen mit Einblutungen in das Ligamentum Latum und

Blasenverletzungen stark angestiegen (121). Trotz des erhöhten Verletzungsrisikos für Mutter und Kind gibt es jedoch geburtshilfliche Situationen, bei denen die vaginal-operative Entbindung schonender und sicherer ist als die sekundäre Sectio (62).

Bei der Bestimmung des Höhenstandes besteht eine große inter- sowie intraindividuelle Varianz. Dass die vaginale Palpation alleine nicht ausreicht, um den Höhenstand exakt und reliabel zu diagnostizieren, haben mehrere Studien belegen können. Erfahrene Geburtsmediziner haben an einem Geburtsphantom in 15,9 % den Höhenstand falsch zu niedrig in der Beckenmitte detektiert, und sie hätten eine vaginal-operative Entbindung vom Beckeneingang durchgeführt (68). Buchmann und Mitarbeiter verglichen die Interobserver-Variabilität des vaginalen Tastbefundes zur Feststellung der Höhenstände sub partu anhand von 446 Schwangeren (67). Nur in 47 % wurden die Höhenstände von zwei verschiedenen Untersuchern kongruent eingeschätzt. Dass der kindliche Kopf die Interspinalenebene erreicht hat, wurde etwa in einem Drittel übereinstimmend diagnostiziert. Aber in 29 % kamen die Untersucher zu einem divergenten Ergebnis, ob ein „engagement“ vorlag. Diese Ergebnisse implizieren, dass in ungefähr einem Drittel der Fälle Unsicherheit darüber besteht, ob bei einem Geburtsstillstand bei vollständig eröffnetem Muttermund die Geburt per Schnittentbindung oder vaginal-operativ beendet werden sollte. Auch Olah untersuchte die Validität und Reliabilität der vaginalen Höhenstandsbestimmung sub partu (122). Bei 32 Schwangeren kam es zu einem Geburtsstillstand in der Austreibungsphase. Direkt nacheinander wurde der Höhenstand von einem Facharzt und anschließend von einem Oberarzt ermittelt. In nur etwa 20 % waren die Ergebnisse identisch.

Die Erfolgsaussichten einer Vakuumextraktion in Abhängigkeit vom sonographisch ermittelten Höhenstand publizierten Henrich und Mitarbeiter als Erstbeschreiber in einem Peer-reviewed Artikel bereits 2006 (71). Dabei wurden verschiedene Parameter des intrapartalen translabialen Ultraschalls definiert. Bei einem exakten medianen Längsschnitt durch die Mitte der Symphyse wurde als infrapubische Ebene ein senkrechtes Lot vom kaudalen Ende der Symphyse gefällt. Die Kopfrichtung wurde als Ausrichtung der längsten Achse des kindlichen Kopfes im Geburtskanal definiert. Wenn der größte Durchmesser des kindlichen Kopfes die infrapubische Ebene überquert hatte, die Kopfrichtung $\geq 30^\circ$ betrug und es zu einem Tieferreten

des kindlichen Kopfes in der Wehe kam, waren die Erfolgsaussichten einer Vakuumentzug sehr gut.

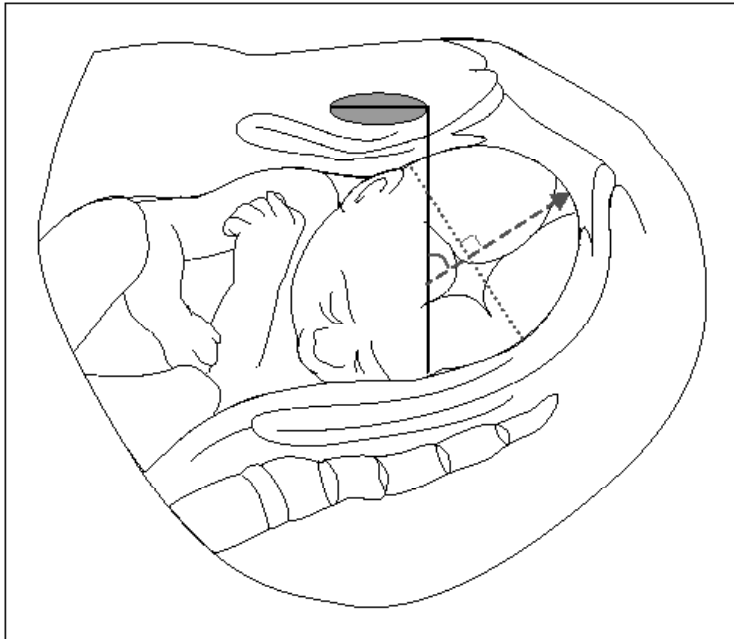


Abbildung 12: Parameter zur Beschreibung des Geburtsfortschritts im intrapartalen translabialen Ultraschall nach Henrich und Mitarbeiter (71). Beachte die infrapubische Linie (durchgezogen) und die Kopfrichtung (Ausrichtung der Längsachse des kindlichen Kopfes im Geburtskanal, gestrichelter Pfeil). Ein positives „head up“-Zeichen liegt vor, wenn der Winkel zwischen einer Horizontalen und der Kopfrichtung $\geq 30^\circ$ beträgt.

Die Methode des transperinealen Ultraschalls zur objektiven Höhenstandsbestimmung sub partu wurde 2003 von Barbera und Mitarbeiter in einer Lehr-DVD vom American College of Obstetricians and Gynecologists beschrieben („Assessment of fetal head descent in labor with transperineal ultrasound“) (123).

Ein angle of progression $\geq 120^\circ$ in der Austreibungsphase führte bei allen 88 untersuchten Patientinnen zu einer vaginalen Geburt. Barbera und Mitarbeiter verglichen weiterhin den mittels transperinealen Ultraschall objektiv bestimmten Höhenstand mit dem parallel erhobenen Palpationsbefund unter der Geburt. Aufgrund der geringen Reproduzierbarkeit der Tastuntersuchung gab es eine breite Streuung. Dennoch wurde anhand eines geometrischen Modells ermittelt, dass ein angle of progression von 100° einem Tastbefund von interspinal (± 0) entspricht (69). Die Methode vom angle of progression wurde ebenfalls von Kalache und Mitarbeiter untersucht. Sie bestimmten bei 26 Patientinnen mit einem Geburtsstillstand in der Austreibungsphase mittels eines transperinealen Ultraschalls den angle of progression (72). Ein Winkel $\geq 120^\circ$ hatte nach logistischer

Regressionsanalyse eine 90%ige Wahrscheinlichkeit einer vaginalen Geburt (spontan oder vaginal-operativ) zur Folge.

Aufgrund der Tatsache, dass die spinae ischiadecae und somit auch die Interspinalenebene als engste Stelle der Beckenmitte nicht im transperinealen Ultraschall darstellbar sind, haben wir die Korrelation vom angle of progression, gemessen mittels Transperinealsonographie mit dem Höhenstand im MRT verglichen. Dabei wurde bei 31 Schwangeren am Termin eine offene MRT-Untersuchung des maternalen Beckens durchgeführt und die Interspinalenebene ermittelt. Direkt im Anschluss ohne Veränderung der maternalen Position stellten wir mittels transperinealer Sonographie den angle of progression dar. Wir fanden eine signifikante Korrelation zwischen den beiden Maßen und ein Winkel von 120° würde nach statistischer Extrapolation einem Höhenstand von interspinal entsprechen (124). Dass der angle of progression signifikant linear mit dem im intrapartal translabilen Ultraschall gemessenen Höhenstand in cm über oder unter der Interspinalenebene korreliert, konnten Tutschek und Mitarbeiter zeigen (73). Ein angle of progression von 118° entsprach einem Höhenstand von ± 0 cm (Beckenmitte), was eine Bestätigung unserer MRT-Ergebnisse bedeutet. Ein Winkel von 137° entspricht demnach +2 cm.

| Höhenstand im translabilen Ultraschall | Angle of progression (°) |
|--|--------------------------|
| -2 | 99 |
| -1 | 108 |
| 0 (Interspinal) | 118 |
| +1 | 127 |
| +2 | 137 |
| +3 | 146 |
| +4 | 156 |

Tabelle 2: Umrechnung von Höhenstand im translabilen Ultraschall in den angle of progression als Maß für das Tiefertreten des kindlichen Kopfes unter der Geburt. Modifiziert von Tutschek und Mitarbeiter (73).

In einer weiteren Analyse interessierte uns die Übereinstimmung des angle of progression gemessen mittels transperinealer Sonographie und offenem MRT (125). Dabei machten wir uns die hohe Detaildarstellung von Knochen und

Weichteilen mittels MRT (Goldstandard) zu nutzen. Wir fanden eine hochsignifikante Korrelation zwischen dem angle of progression gemessen im MRT und mittels transperinealen Ultraschall. Der Intraclass-Korrelationskoeffizient zwischen den Methoden war mit 0,89 (95 % CI 0,78-0,94) sehr hoch. Die Bland-Altman-Analyse, bei der die Differenzen zweier Methoden gegenüber deren Mittelwerten verglichen wurden, zeigte eine sehr gute Übereinstimmung und die Differenz betrug im Mittel nur 1,4°. Demnach ist der transperineale Ultraschall zur Messung des angle of progression eine exakte und valide Methode. Die gute Interobserver-Variabilität der sonographischen Bestimmung des angle of progression wurde bereits von Dückelmann und Mitarbeiter mit einer sehr hohen Intraclass-Korrelation von 0,86 (95 % CI 0,7-0,93) gezeigt (126). Die verschiedenen Parameter (angle of progression, Kopfrichtung, angle of midline und progression distance) zur Bestimmung des Geburtsfortschritts im intrapartalen transperinealen Ultraschall wurden von Molina und Mitarbeiter untersucht (127). Der angle of progression war am besten reproduzierbar. Er hatte die höchste Intraclass-Korrelation für denselben Untersucher (0,94) bzw. für unterschiedliche Untersucher (0,84). Die Bland-Altman-Analyse zeigte die geringste Intra- und Interobserver-Variabilität.

Seit einigen Jahren wird der diagnostische Ultraschall auch im Kreißsaal eingesetzt. Der intrapartale transperineale/translabiale Ultraschall ist eine einfach zu erlernende Untersuchungsmethode, die dabei hilft, den Höhenstand objektiv und reliabel zu beurteilen und pathologische Geburtsverläufe richtig zu erkennen. Sie ermöglicht eine Bilddokumentation des Geburtsfortschritts und eine wissenschaftliche Auswertung der Geburtsmechanik (128).

3.3.2 Neue Erkenntnisse über die Geburtsmechanik nach Auswertung der Geburt im offenen MRT

Obwohl die wissenschaftliche Forschung auf dem Gebiet der Geburtsmechanik schon sehr weit zurückreicht, ist eine vollendete und befriedigende Erklärung dieses komplizierten biologischen Geschehens bis heute noch nicht gefunden worden (129). Das Wissen über die menschliche Geburtsmechanik beruht größtenteils auf Vermutungen anhand von anatomischen Gefrierschnitten, Röntgenuntersuchungen während der Geburt, der Palpation und rekonstruierten Computermodellen. Einige

Quellen sind annähernd ein Jahrhundert alt. Bereits 1913 hat Hugo Sellheim, ein Leipziger Gynäkologe, den Austrittsmechanismus des kindlichen Kopfes detailliert beschrieben (48). Er war der Ansicht, dass sich das kindliche Hinterhaupt am Unterrand der maternalen Symphyse anstemmt und durch eine Deflexion der kindliche Kopf geboren wird. 1957 widerlegten Borell und Fernström durch intrapartale Röntgenuntersuchungen diesen vermuteten Geburtsmechanismus teilweise (130, 131). Sie hatten beobachtet, dass beim Tiefertreten der kindliche Kopf lange flektiert bleibt, erst spät kommt es zu einer Streckung in der Hals- und Brustwirbelsäule. Weiterhin sahen sie einen größeren Abstand zwischen kindlichem Hinterhaupt und maternaler Symphyse. Murray (1890) und Jones (1906) vertraten die Ansicht, dass der kindliche Kopf gleichzeitig mit dem Tiefertreten auch eine Deflexion in der Halswirbelsäule durchführt (132, 133).

Die Auswertung der MRT-Sequenzen, die bei der Geburt im offenen MRT gewonnen werden konnten (134), haben die Hypothese von Murray und Jones bestätigt. Nachdem das Hinterhaupt mit flektiertem kindlichen Kopf den Hinterrand der maternalen Symphyse erreicht, kommt es simultan mit dem Tiefertreten zu einer Streckbewegung in der Halswirbelsäule. An diesem Punkt macht der Geburtskanal eine Kurve um 90°, und durch Rotation um die Symphyse wird der kindliche Kopf geboren. Wir konnten zeigen, dass es zu einem engen Kontakt des kindlichen Nackens mit dem maternalen Schambein kommt.

Die erstmalige Darstellung einer menschlichen Geburt im offenen MRT hat eine neue Möglichkeit zur Untersuchung der Geburtsmechanik eröffnet. Die detaillierte Visualisierung von knöchernen Strukturen und Weichteilen sowie der dynamische Prozess fördern das Verständnis für die komplexen Bewegungen und Interaktionen des Feten im mütterlichen Becken. Erst wenn Geburtsmediziner Kenntnisse vom physiologischen Ablauf einer Geburt haben, kann die Abgrenzung zu pathologischen Geburtsverläufen erfolgen. Bisher ist ungeklärt, warum es in etwa 20 % der Geburten zu einem Geburtsstillstand kommt (135), der einen Kaiserschnitt notwendig macht. Eine frühzeitige individuelle Intervention sub partu mit Reduktion der sekundären Sectionrate würde die maternale Mortalität und Morbidität deutlich sinken lassen (136, 137). Weiterhin ist ein Basiswissen der kindlichen Haltungsänderungen bei der Austrittsbewegung des Kopfes bei einer vaginal-operativen Entbindung von praktischer Relevanz.

4. Zusammenfassung

In kaum einer anderen medizinischen Fachrichtung wie in der Geburtshilfe wird der Ultraschall so verbreitet eingesetzt. Die Einführung der Dopplersonographie in die Geburtsmedizin führte dazu, dass die utero- und fetomaternalen Perfusion ebenfalls in den Blickpunkt der Diagnostik rückte. So stellt die Überwachung von Risikoschwangerschaften, besonders hinsichtlich Präeklampsie und Wachstumsrestriktion, einen essentiellen Teil der pränatalen Betreuung von Schwangeren dar. Der gezielte Einsatz der Dopplersonographie ermöglicht eine signifikante Verringerung der perinatalen Morbidität und Mortalität. Bei Feten mit einer intrauterinen Wachstumsrestriktion ist die Dopplersonographie ein wichtiger Mosaikstein zur Diagnose der fetalen Dekompensation und Festlegung des Entbindungszeitpunktes. Als Screeninginstrument bekommt die Dopplersonographie in jüngster Zeit einen immer wichtigeren Stellenwert. Am Geburtstermin bedeutet ein normaler Widerstand in der Nabelschnurarterie ein geringes perinatales Risiko (hoher negativer Vorhersagewert) und dient als Rückversicherung des fetalen Wohlbefindens. Bei erhöhten Werten kann von einem leicht erhöhten Risiko für fetalen Distress unter Wehen ausgegangen werden, der positive Vorhersagewert ist allerdings nicht hoch.

Die Neurosonographie zum Ausschluss von fetalen Hirnfehlbildungen ist ein wichtiger Bestandteil der pränatalen Ultraschalldiagnostik. Die Entwicklung der 3D-Sonographie ermöglicht die Darstellung von rekonstruierten und frei wählbaren Ebenen, die nicht mittels 2D-Sonographie zu akquirieren sind. Eine Speicherung der digitalen Volumendatensätze macht die interdisziplinäre off-line-Analyse sowie Rekonstruktion und Navigation im Multiplanarmodus möglich. Tomographische Darstellungen der Schnittebenen bieten zudem eine gute Vergleichbarkeit mit der bereits etablierten fetalen MRT-Diagnostik.

Der erste Schritt zur Menschwerdung war die Entwicklung des aufrechten Ganges vor über 4 Millionen Jahren. Das Abkippen des Beckens hatte zur Folge, dass der Geburtskanal einen bogenförmigen Verlauf nahm. Dieser Aspekt und die unproportionale Volumenzunahme des fetalen Gehirns zur Geburt haben die Geburtsmechanik des Menschen maßgeblich komplizierter werden lassen. Mit dem intrapartalen Ultraschall und MRT-Untersuchungen sub partu haben wir nun moderne bildgebende Verfahren an der Hand, um die komplexen dreidimensionalen Prozesse

bei einer Geburt besser abzubilden und verstehen zu können. Die Visualisierung einer Geburt im offenen MRT hat erstmals das Ende der Austreibungsphase mit hoher Detailgenauigkeit von Knochen und Weichteilen dynamisch darstellen können. Diese Erkenntnisse sind bei vaginal-operativen Entbindungen, wo der Austrittsmechanismus des kindlichen Kopfes so gut wie möglich iatrogen imitiert werden muss, von praktischer Bedeutung.

Der additive Einsatz des transperinealen Ultraschalls zur Höhenstandsdiagnostik objektiviert die Entscheidung, ob eine Geburt vaginal-operativ oder per Schnittentbindung sicher beendet werden sollte. Die Kombination aus transperinealem Ultraschall und der offenen MRT-Untersuchung am Termin konnte erstmals der knöchernen Leitstelle in der Interspinalenebene einem angle of progression von 120° zuordnen. Die Methode des transperinealen Ultraschalls ist objektiv und reliabel, einfach zu erlernen, dient der Dokumentation des Höhenstandes und erhöht die Sicherheit für Mutter und Kind im Kreißaal.

5. Literaturverzeichnis

1. Donald I, Macvicar J, Brown TG. Investigation of abdominal masses by pulsed ultrasound. *Lancet*. 1958 Jun 7;1(7032):1188-95.
2. Richtlinie des Bundesausschusses der Ärzte und Krankenkassen über die Betreuung während der Schwangerschaft und nach der Entbindung ("Mutterschafts-Richtlinien") in der Fassung vom 10. Dezember 1985 (veröffentlicht im Bundesanzeiger Nr. 60a vom 27. März 1986) (1985).
3. Levine D. Obstetric MRI. *J Magn Reson Imaging*. 2006 Jul;24(1):1-15.
4. Daya S. Accuracy of gestational age estimation by means of fetal crown-rump length measurement. *Am J Obstet Gynecol*. 1993 Mar;168(3 Pt 1):903-8.
5. Nicolaides KH. Nuchal translucency and other first-trimester sonographic markers of chromosomal abnormalities. *Am J Obstet Gynecol*. 2004 Jul;191(1):45-67.
6. Sepulveda W, Sebire NJ, Nicolaides KH. The lambda sign in twin pregnancies. *Ultrasound Obstet Gynecol*. 1996 Dec;8(6):429.
7. Blaas HG, Eik-Nes SH. Sonoembryology and early prenatal diagnosis of neural anomalies. *Prenat Diagn*. 2009 Apr;29(4):312-25.
8. Bamberg C, Kalache KD. Prenatal diagnosis of fetal growth restriction. *Semin Fetal Neonatal Med*. 2004 Oct;9(5):387-94.
9. Comstock CH. The antenatal diagnosis of placental attachment disorders. *Curr Opin Obstet Gynecol*. 2011 Apr;23(2):117-22.
10. Hassan SS, Romero R, Berry SM, Dang K, Blackwell SC, Treadwell MC, et al. Patients with an ultrasonographic cervical length ≤ 15 mm have nearly a 50% risk of early spontaneous preterm delivery. *Am J Obstet Gynecol*. 2000 Jun;182(6):1458-67.
11. Maulik D. Biologic effects of ultrasound. *Clin Obstet Gynecol*. 1989 Dec;32(4):645-59.
12. Newnham JP, Doherty DA, Kendall GE, Zubrick SR, Landau LL, Stanley FJ. Effects of repeated prenatal ultrasound examinations on childhood outcome up to 8 years of age: follow-up of a randomised controlled trial. *Lancet*. 2004 Dec 4-10;364(9450):2038-44.

13. Salvesen KA, Bakketeig LS, Eik-nes SH, Undheim JO, Okland O. Routine ultrasonography in utero and school performance at age 8-9 years. *Lancet*. 1992 Jan 11;339(8785):85-9.
14. Steiner H, Haberlehner I, Jaeger T. [Doppler ultrasound in obstetrics]. *Ultraschall Med*. 2012 Apr;33(2):122-31; quiz 32-4.
15. FitzGerald DE, Drumm JE. Non-invasive measurement of human fetal circulation using ultrasound: a new method. *Br Med J*. 1977 Dec 3;2(6100):1450-1.
16. Alfirevic Z, Neilson JP. Doppler ultrasonography in high-risk pregnancies: systematic review with meta-analysis. *Am J Obstet Gynecol*. 1995 May;172(5):1379-87.
17. Richtlinie des Bundesausschusses der Ärzte und Krankenkassen über die Betreuung während der Schwangerschaft und nach der Entbindung ("Mutterschafts-Richtlinien") in der Fassung vom 10. Dezember 1985 (veröffentlicht im Bundesanzeiger Nr. 60a vom 27. März 1986) zuletzt geändert am 15. Dezember 2011, veröffentlicht im Bundesanzeiger 2011, Nr. 36, in Kraft getreten am 3. März 2012, (2011).
18. Standards in der Perinatalmedizin-Dopplersonographie in der Schwangerschaft, (2012).
19. Gosling RG, King DH. Arterial assessment by Doppler-shift ultrasound. *Proc R Soc Med*. 1974 Jun;67(6 Pt 1):447-9.
20. Pourcelot L. Application cliniques de l'examen Doppler transcutane. In: Peronneau P, editor. *Velocimetrie ultrasonore Doppler*. Paris INSERM1974. p. 213-40.
21. Axt-Fliedner A. Dopplersonographie in der Geburtsmedizin. CME Praktische Fortbildung Gynäkologie, Geburtsmedizin und Gynäkologische Endokrinologie. 2007.
22. Thompson RS, Trudinger BJ. Doppler waveform pulsatility index and resistance, pressure and flow in the umbilical placental circulation: an investigation using a mathematical model. *Ultrasound Med Biol*. 1990;16(5):449-58.
23. Baschat AA, Hecher K. Fetal growth restriction due to placental disease. *Semin Perinatol*. 2004 Feb;28(1):67-80.
24. Wladimiroff JW, Tonge HM, Stewart PA. Doppler ultrasound assessment of cerebral blood flow in the human fetus. *Br J Obstet Gynaecol*. 1986 May;93(5):471-5.

25. Kiserud T, Eik-Nes SH, Blaas HG, Hellevik LR. Ultrasonographic velocimetry of the fetal ductus venosus. *Lancet*. 1991 Dec 7;338(8780):1412-4.
26. Baschat AA, Gembruch U, Harman CR. The sequence of changes in Doppler and biophysical parameters as severe fetal growth restriction worsens. *Ultrasound Obstet Gynecol*. 2001 Dec;18(6):571-7.
27. Ferrazzi E, Bozzo M, Rigano S, Bellotti M, Morabito A, Pardi G, et al. Temporal sequence of abnormal Doppler changes in the peripheral and central circulatory systems of the severely growth-restricted fetus. *Ultrasound Obstet Gynecol*. 2002 Feb;19(2):140-6.
28. Hecher K, Bilardo CM, Stigter RH, Ville Y, Hackeloer BJ, Kok HJ, et al. Monitoring of fetuses with intrauterine growth restriction: a longitudinal study. *Ultrasound Obstet Gynecol*. 2001 Dec;18(6):564-70.
29. Campbell S, Black RS, Lees CC, Armstrong V, Peacock JL. Doppler ultrasound of the maternal uterine arteries: disappearance of abnormal waveforms and relation to birthweight and pregnancy outcome. *Acta Obstet Gynecol Scand*. 2000 Aug;79(8):631-4.
30. Harrington K, Cooper D, Lees C, Hecher K, Campbell S. Doppler ultrasound of the uterine arteries: the importance of bilateral notching in the prediction of pre-eclampsia, placental abruption or delivery of a small-for-gestational-age baby. *Ultrasound Obstet Gynecol*. 1996 Mar;7(3):182-8.
31. Fayyad AM, Harrington KF. Prediction and prevention of preeclampsia and IUGR. *Early Hum Dev*. 2005 Nov;81(11):865-76.
32. Alkazaleh F, Chaddha V, Viero S, Malik A, Anastasiades C, Sroka H, et al. Second-trimester prediction of severe placental complications in women with combined elevations in alpha-fetoprotein and human chorionic gonadotrophin. *Am J Obstet Gynecol*. 2006 Mar;194(3):821-7.
33. Hafner E, Metzenbauer M, Hofinger D, Munkel M, Gassner R, Schuchter K, et al. Placental growth from the first to the second trimester of pregnancy in SGA-foetuses and pre-eclamptic pregnancies compared to normal foetuses. *Placenta*. 2003 Apr;24(4):336-42.
34. Papageorghiou AT, Campbell S. First trimester screening for preeclampsia. *Curr Opin Obstet Gynecol*. 2006 Dec;18(6):594-600.

35. Askie LM, Duley L, Henderson-Smart DJ, Stewart LA. Antiplatelet agents for prevention of pre-eclampsia: a meta-analysis of individual patient data. *Lancet*. 2007 May 26;369(9575):1791-8.
36. Roberge S, Giguere Y, Villa P, Nicolaides K, Vainio M, Forest JC, et al. Early administration of low-dose aspirin for the prevention of severe and mild preeclampsia: a systematic review and meta-analysis. *Am J Perinatol*. 2012 Aug;29(7):551-6.
37. Zollner U, Rehn M, Girschick G, Dietl J. [Sonographic abnormalities of the fetal CNS in the second trimester screening--clarifications according to the new maternity directives]. *Z Geburtshilfe Neonatol*. 2012 Feb;216(1):1-10.
38. Eichhorn KH, Schramm T, Bald R, Hansmann M, Gembruch U. [DEGUM grade I quality standards in obstetric ultrasound diagnosis during the 19th-22nd week of pregnancy]. *Ultraschall Med*. 2006 Apr;27(2):185-7.
39. Merz E, Eichhorn KH, Hansmann M, Meinel K. [Quality demands on continuing differential diagnostic sonography in prenatal diagnostics (DEGUM stage II) during the 18th to 22nd weeks of gestation]. *Ultraschall Med*. 2002 Feb;23(1):11-2.
40. Sonographic examination of the fetal central nervous system: guidelines for performing the 'basic examination' and the 'fetal neurosonogram'. *Ultrasound Obstet Gynecol*. 2007 Jan;29(1):109-16.
41. Salomon LJ, Alfirevic Z, Berghella V, Bilardo C, Hernandez-Andrade E, Johnsen SL, et al. Practice guidelines for performance of the routine mid-trimester fetal ultrasound scan. *Ultrasound Obstet Gynecol*. 2011 Jan;37(1):116-26.
42. Filly RA. Level 1, level 2, level 3 obstetric sonography: I'll see your level and raise you one. *Radiology*. 1989 Aug;172(2):312.
43. Kainer F. Fehlbildungen des Zentralen Nervensystems. In: Kainer F, editor. *Facharzt Geburtsmedizin*. München, Jena: Urban&Fischer; 2006.
44. Karl K, Kainer F, Heling KS, Chaoui R. Fetal neurosonography: extended examination of the CNS in the fetus. *Ultraschall Med*. 2011 Aug;32(4):342-61.
45. Monteagudo A, Timor-Tritsch IE. Normal sonographic development of the central nervous system from the second trimester onwards using 2D, 3D and transvaginal sonography. *Prenat Diagn*. 2009 Apr;29(4):326-39.

46. Pilu G, Ghi T, Carletti A, Segata M, Perolo A, Rizzo N. Three-dimensional ultrasound examination of the fetal central nervous system. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2007 Aug;30(2):233-45.
47. Liao JB, Buhimschi CS, Norwitz ER. Normal labor: mechanism and duration. *Obstet Gynecol Clin North Am.* 2005 Jun;32(2):145-64, vii.
48. Sellheim H. Die Geburt des Menschen nach anatomischen, vergleichend-anatomischen, physiologischen, physikalischen, entwicklungsmechanischen, biologischen und sozialen Gesichtspunkten. . Gießen: E. Opitz; 1913.
49. Rosenberg K, Trevethan W. Bipedalism and human birth. the obstetrical dilemma revisited. *Evolutionary Anthropology.* 1994;4:161-8.
50. Pschyrembel W, Dudenhausen JW. *Praktische Geburtshilfe.* 18 ed. Berlin, New York: De Gruyter; 1994.
51. Weitzel H, Hopp H. Wann steht der Kopf zangengerecht-vakuumgerecht? *Gynäkologe.* 1998;31:742-50.
52. Greenhill JP, Friedman EA. Biological principles and modern practice of obstetrics. Saunders WB, editor. Philadelphia 1974.
53. Buhimschi C, Buhimschi IA, Malinow AW. The forces of labour. *Fetal and Maternal Medicine Review.* 2003;14(4):273-307.
54. Nathanielsz PW, Giussani DA, Wu WX. Stimulation of the switch in myometrial activity from contractures to contractions in the pregnant sheep and nonhuman primate. *Equine Vet J Suppl.* 1997 Jun(24):83-8.
55. Caldeyro-Barcia RPJ. Physiology of the uterine contraction. *Clin Obstet Gynecol.* 1960;3:386-408.
56. Cunningham FG, Gant NF, Leveno KJ, Gilstrap LC, Hauth JC, Wenstrom KD. *Williams Obstetrics: McGraw-Hill; 2001.*
57. Chalubinski KM, Husslein P. Normale Geburt. In: Schneider H, Husslein P, Schneider KTM, editors. *Geburtshilfe.* 1 ed: Springer; 2000.
58. Stewart DB. The pelvis as a passageway. I. Evolution and adaptations. *Br J Obstet Gynaecol.* 1984 Jul;91(7):611-7.
59. Stewart DB. The pelvis as a passageway. II. The modern human pelvis. *Br J Obstet Gynaecol.* 1984 Jul;91(7):618-23.

60. Wittman AB, Wall LL. The evolutionary origins of obstructed labor: bipedalism, encephalization, and the human obstetric dilemma. *Obstet Gynecol Surv.* 2007 Nov;62(11):739-48.
61. Hodge HL. *The principle and practice of obstetrics.* Philadelphia: Blanchard and Lea; 1864.
62. Hopp H. *Vaginal-operative Entbindungen.* CME Praktische Fortbildung Gynäkologie, Geburtsmedizin und Gynäkologische Endokrinologie. 2006.
63. De Lee JB. *Principles and practice of obstetrics.* 2 ed. Philadelphia, London: Saunders, W.B.; 1915.
64. *Vaginal-operative Entbindungen,* (2007).
65. Dudenhausen JW. *Praktische Geburtshilfe.* 21 ed. Berlin, New York: De Gruyter; 2011.
66. Williams MC, Knuppel RA, O'Brien WF, Weiss A, Kanarek KS. A randomized comparison of assisted vaginal delivery by obstetric forceps and polyethylene vacuum cup. *Obstet Gynecol.* 1991 Nov;78(5 Pt 1):789-94.
67. Buchmann E, Libhaber E. Interobserver agreement in intrapartum estimation of fetal head station. *Int J Gynaecol Obstet.* 2008 Jun;101(3):285-9.
68. Dupuis O, Silveira R, Zentner A, Dittmar A, Gaucherand P, Cucherat M, et al. Birth simulator: reliability of transvaginal assessment of fetal head station as defined by the American College of Obstetricians and Gynecologists classification. *Am J Obstet Gynecol.* 2005 Mar;192(3):868-74.
69. Barbera AF, Pombar X, Perugino G, Lezotte DC, Hobbins JC. A new method to assess fetal head descent in labor with transperineal ultrasound. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2009 Mar;33(3):313-9.
70. Ghi T, Farina A, Pedrazzi A, Rizzo N, Pelusi G, Pilu G. Diagnosis of station and rotation of the fetal head in the second stage of labor with intrapartum translabial ultrasound. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2009 Mar;33(3):331-6.
71. Henrich W, Dudenhausen J, Fuchs I, Kamena A, Tutschek B. Intrapartum translabial ultrasound (ITU): sonographic landmarks and correlation with successful vacuum extraction. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2006 Nov;28(6):753-60.
72. Kalache KD, Duckelmann AM, Michaelis SA, Lange J, Cichon G, Dudenhausen JW. Transperineal ultrasound imaging in prolonged second stage of labor with occipitoanterior presenting fetuses: how well does the 'angle of

progression' predict the mode of delivery? *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2009 Mar;33(3):326-30.

73. Tutschek B, Braun T, Chantraine F, Henrich W. A study of progress of labour using intrapartum translabial ultrasound, assessing head station, direction, and angle of descent. *BJOG.* 2011 Jan;118(1):62-9.

74. Yeo L, Romero R. Sonographic evaluation in the second stage of labor to improve the assessment of labor progress and its outcome. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2009 Mar;33(3):253-8.

75. Fox LK, Huerta-Enochian GS, Hamlin JA, Katz VL. The magnetic resonance imaging-based fetal-pelvic index: a pilot study in the community hospital. *Am J Obstet Gynecol.* 2004 Jun;190(6):1679-85; discussion 85-8.

76. Huerta-Enochian GS, Katz VL, Fox LK, Hamlin JA, Kollath JP. Magnetic resonance-based serial pelvimetry: do maternal pelvic dimensions change during pregnancy? *Am J Obstet Gynecol.* 2006 Jun;194(6):1689-94; discussion 94-5.

77. Zaretsky MV, Alexander JM, McIntire DD, Hatab MR, Twickler DM, Leveno KJ. Magnetic resonance imaging pelvimetry and the prediction of labor dystocia. *Obstet Gynecol.* 2005 Nov;106(5 Pt 1):919-26.

78. Estroff JA. The growing role of MR imaging in the fetus. *Pediatr Radiol.* 2009 Apr;39 Suppl 2:S209-10.

79. Garden AS, Griffiths RD, Weindling AM, Martin PA. Fast-scan magnetic resonance imaging in fetal visualization. *Am J Obstet Gynecol.* 1991 May;164(5 Pt 1):1190-6.

80. Timor-Tritsch IE, Monteagudo A. Magnetic resonance imaging versus ultrasound for fetal central nervous system abnormalities. *Am J Obstet Gynecol.* 2003 Oct;189(4):1210-1; author reply 1-2.

81. Warshak CR, Eskander R, Hull AD, Scioscia AL, Mattrey RF, Benirschke K, et al. Accuracy of ultrasonography and magnetic resonance imaging in the diagnosis of placenta accreta. *Obstet Gynecol.* 2006 Sep;108(3 Pt 1):573-81.

82. Kok RD, van den Bergh AJ, Heerschap A, Nijland R, van den Bergh PP. Metabolic information from the human fetal brain obtained with proton magnetic resonance spectroscopy. *Am J Obstet Gynecol.* 2001;185:1011-5.

83. Baker PN, Johnson IR, Harvey PR, Gowland PA, Mansfield P. A three-year follow-up of children imaged in utero with echoplanar magnetic resonance. *Am J Obstet Gynecol.* 1994;170:32-3.
84. Chen MM, Coakley FV, Kaimal A, Laros RK, Jr. Guidelines for computed tomography and magnetic resonance imaging use during pregnancy and lactation. *Obstet Gynecol.* 2008 Aug;112(2 Pt 1):333-40.
85. Clements H, Duncan KR, Fielding K, Gowland PA, Johnson IR, Baker PN. Infants exposed to MRI in utero have a normal paediatric assessment at 9 months of age. *Br J Radiol.* 2000 Feb;73(866):190-4.
86. Kok RD, de Vries MM, Heerschap A, van den Berg PP. Absence of harmful effects of magnetic resonance exposure at 1.5 T in utero during the third trimester of pregnancy: a follow-up study. *Magn Reson Imaging.* 2004 Jul;22(6):851-4.
87. Myers C, Duncan KR, Gowland PA, Johnson IR, Baker PN. Failure to detect intrauterine growth restriction following in utero exposure to MRI. *Br J Radiol.* 1998;71(845):549-51.
88. Hailey D. Open magnetic resonance imaging (MRI) scanners. *Issues Emerg Health Technol.* 2006 Nov(92):1-4.
89. Kingdom JC, Rodeck CH, Kaufmann P. Umbilical artery Doppler--more harm than good? *Br J Obstet Gynaecol.* 1997 Apr;104(4):393-6.
90. Alfirevic Z, Stampalija T, Gyte GM. Fetal and umbilical Doppler ultrasound in normal pregnancy. *Cochrane Database Syst Rev.* 2010(8):CD001450.
91. A randomised controlled trial of Doppler ultrasound velocimetry of the umbilical artery in low risk pregnancies. Doppler French Study Group. *Br J Obstet Gynaecol.* 1997 Apr;104(4):419-24.
92. Beattie RB, Dornan JC. Antenatal screening for intrauterine growth retardation with umbilical artery Doppler ultrasonography. *BMJ.* 1989 Mar 11;298(6674):631-5.
93. Davies J, Gallivan S, Spencer JAD. Randomised controlled trial of doppler ultrasound screening of placental perfusion during pregnancy. *Lancet.* 1992;340(8831):1299-303.
94. Hanretty KP, Primrose MH, Neilson JP, Whittle MJ. Pregnancy screening by Doppler uteroplacental and umbilical artery waveforms. *Br J Obstet Gynaecol.* 1989 Oct;96(10):1163-7.

95. Mason GC, Lilford RJ, Porter J, Nelson E, Tyrell S. Randomised comparison of routine versus highly selective use of Doppler ultrasound in low risk pregnancies. *Br J Obstet Gynaecol.* 1993 Feb;100(2):130-3.
96. Whittle MJ, Hanretty KP, Primrose MH, Neilson JP. Screening for the compromised fetus: a randomized trial of umbilical artery velocimetry in unselected pregnancies. *Am J Obstet Gynecol.* 1994 Feb;170(2):555-9.
97. Omtzigt AM, Reuwer PJ, Bruinse HW. A randomized controlled trial on the clinical value of umbilical Doppler velocimetry in antenatal care. *Am J Obstet Gynecol.* 1994 Feb;170(2):625-34.
98. Goffinet F, Paris J, Heim N, Nisand I, Breart G. Predictive value of Doppler umbilical artery velocimetry in a low risk population with normal fetal biometry. A prospective study of 2016 women. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol.* 1997 Jan;71(1):11-9.
99. Bonnin P, Bailliart O, Kedra W, Ciraru-Vigneron N, Niang E, Savin E, et al. Relationship between birth weight and umbilical Doppler blood flow velocity waveforms during the third trimester of pregnancy. *Eur J Med.* 1993 Apr;2(4):219-22.
100. Cooley SM, Donnelly JC, Walsh T, MacMahon C, Gillan J, Geary MP. The impact of umbilical and uterine artery Doppler indices on antenatal course, labor and delivery in a low-risk primigravid population. *J Perinat Med.* 2011 Mar;39(2):143-9.
101. Yoon BH, Oh IH, Lee PR, Kim WJ, Syn HC, Kim SW. Is an abnormal Doppler umbilical artery waveform ratio a risk factor for poor perinatal outcome in the non-small for gestational age fetus? *Am J Perinatol.* 1993 May;10(3):245-9.
102. Arabin B, Snyders R, Nicolaidis KH, Versmold HK, Weitzel HK, Giffel J, et al. [Systematic antepartum fetal evaluation ("Safe"). A concept for diagnosis of fetal function in threatened hypoxia]. *Geburtshilfe Frauenheilkd.* 1993 Dec;53(12):835-42.
103. Arduini D, Rizzo G, Soliani A, Romanini C. Doppler velocimetry versus nonstress test in the antepartum monitoring of low-risk pregnancies. *J Ultrasound Med.* 1991 Jun;10(6):331-5.
104. Korszun P, Dubiel M, Kudla M, Gudmundsson S. Doppler velocimetry for predicting outcome of pregnancies with decreased fetal movements. *Acta Obstet Gynecol Scand.* 2002 Oct;81(10):926-30.
105. Anteby EY, Tadmor O, Revel A, Yagel S. Post-term pregnancies with normal cardiotocographs and amniotic fluid columns: the role of Doppler evaluation in

predicting perinatal outcome. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol.* 1994 Apr;54(2):93-8.

106. Kwon JY, Kwon HS, Kim YH, Park YW. Abnormal Doppler velocimetry is related to adverse perinatal outcome for borderline amniotic fluid index during third trimester. *J Obstet Gynaecol Res.* 2006 Dec;32(6):545-9.

107. Chaoui R, Heling KS, Kainer F, Karl K. [Fetal neurosonography using 3-dimensional multiplanar sonography]. *Z Geburtshilfe Neonatol.* 2012 Apr;216(2):54-62.

108. Hata T, Yanagihara T, Matsumoto M, Hanaoka U, Ueta M, Tanaka Y, et al. Three-dimensional sonographic features of fetal central nervous system anomaly. *Acta Obstet Gynecol Scand.* 2000 Aug;79(8):635-9.

109. Monteagudo A, Timor-Tritsch IE, Mayberry P. Three-dimensional transvaginal neurosonography of the fetal brain: 'navigating' in the volume scan. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2000 Sep;16(4):307-13.

110. Pooh RK, Pooh K, Nakagawa Y, Nishida S, Ohno Y. Clinical application of three-dimensional ultrasound in fetal brain assessment. *Croat Med J.* 2000 Sep;41(3):245-51.

111. Lee W, Chaiworapongsa T, Romero R, Williams R, McNie B, Johnson A, et al. A diagnostic approach for the evaluation of spina bifida by three-dimensional ultrasonography. *J Ultrasound Med.* 2002 Jun;21(6):619-26.

112. Pooh RK. Normal anatomy by three-dimensional ultrasound in the second and third trimesters. *Semin Fetal Neonatal Med.* 2012 Jul 17.

113. Pooh RK, Pooh KH. The assessment of fetal brain morphology and circulation by transvaginal 3D sonography and power Doppler. *J Perinat Med.* 2002;30(1):48-56.

114. Kalache KD, Eder K, Esser T, Proquitte H, Stoltenburg-Didinger G, Hartung JP, et al. Three-dimensional ultrasonographic reslicing of the fetal brain to assist prenatal diagnosis of central nervous system anomalies. *J Ultrasound Med.* 2006 Apr;25(4):509-14.

115. Rizzo G, Abuhamad AZ, Benacerraf BR, Chaoui R, Corral E, Addario VD, et al. Collaborative study on 3-dimensional sonography for the prenatal diagnosis of central nervous system defects. *J Ultrasound Med.* 2011 Jul;30(7):1003-8.

116. Malinger G, Lerman-Sagie T, Vinals F. Three-dimensional sagittal reconstruction of the corpus callosum: fact or artifact? *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2006 Oct;28(5):742-3.
117. Pilu G, Segata M, Ghi T, Carletti A, Perolo A, Santini D, et al. Diagnosis of midline anomalies of the fetal brain with the three-dimensional median view. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2006 May;27(5):522-9.
118. Kurjak A, Miskovic B, Andonotopo W, Stanojevic M, Azumendi G, Vrcic H. How useful is 3D and 4D ultrasound in perinatal medicine? *J Perinat Med.* 2007;35(1):10-27.
119. Bashore RA, Phillips WH, Jr., Brinkman CR, 3rd. A comparison of the morbidity of midforceps and cesarean delivery. *Am J Obstet Gynecol.* 1990 Jun;162(6):1428-34; discussion 34-5.
120. Towner D, Castro MA, Eby-Wilkens E, Gilbert WM. Effect of mode of delivery in nulliparous women on neonatal intracranial injury. *N Engl J Med.* 1999 Dec 2;341(23):1709-14.
121. Murphy DJ. Failure to progress in the second stage of labour. *Curr Opin Obstet Gynecol.* 2001 Dec;13(6):557-61.
122. Olah KS. Reversal of the decision for caesarean section in the second stage of labour on the basis of consultant vaginal assessment. *J Obstet Gynaecol.* 2005 Feb;25(2):115-6.
123. Barbera A, Becker T, Macfarland H, Hobbins J. Assessment of fetal head descent in labor with transperineal ultrasound. Teaching DVD. ACOG:. Washington, DC;176 2003.
124. Bamberg C, Scheuermann S, Slowinski T, Duckelmann AM, Vogt M, Nguyen-Dobinsky TN, et al. Relationship between fetal head station established using an open magnetic resonance imaging scanner and the angle of progression determined by transperineal ultrasound. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2011 Jan 24.
125. Bamberg C, Scheuermann S, Fotopoulou C, Slowinski T, Duckelmann AM, Teichgraber U, et al. Angle of progression measurements of fetal head at term: a systematic comparison between open magnetic resonance imaging and transperineal ultrasound. *Am J Obstet Gynecol.* 2012 Feb;206(2):161 e1-5.
126. Dückelmann AM, Bamberg C, Michaelis SA, Lange J, Nonnenmacher A, Dudenhausen JW, et al. Measurement of fetal head descent using the 'angle of

- progression' on transperineal ultrasound imaging is reliable regardless of fetal head station or ultrasound expertise. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2010 Feb;35(2):216-22.
127. Molina FS, Terra R, Carrillo MP, Puertas A, Nicolaides KH. What is the most reliable ultrasound parameter for assessment of fetal head descent? *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2010 Oct;36(4):493-9.
128. Tutschek B. Intrapartaler translabialer Ultraschall (ITU) zur Bestimmung des Geburtsfortschritts. CME Praktische Fortbildung Gynäkologie, Geburtsmedizin und Gynäkologische Endokrinologie. 2012.
129. Fochen K, Narik G. Röntgenologische Untersuchungen des Geburtsmechanismus. *Geburtshilfe und Frauenheilkunde.* 1955;5:401-11.
130. Borell U, Fernström I. The movements in the mechanism of disengagement with special reference to the attitude of the foetal head. *Acta Obstet Gynecol Scand.* 1957;36(3):347-55.
131. Borell U, Fernström I. Shape and course of the birth canal; a radiographic study in the human. *Acta Obstet Gynecol Scand.* 1957;36(2):166-78.
132. Jones J. Some causes of delay in labour; with special reference to the function of the cervical spine of the fetus. *J Obst & Gynec Brit Emp.* 1906;10(407).
133. Murray RM. The axis-traction forceps: The mechanical principles, construction, and scope. *The transactions of the Edinburgh Obstetrical Society.* 1890;16:58-89.
134. Bamberg C, Rademacher G, Guttler F, Teichgraber U, Cremer M, Bühner C, et al. Human birth observed in real-time open magnetic resonance imaging. *Am J Obstet Gynecol.* 2012 Jun;206(6):505 e1-6.
135. Zhu BP, Grigorescu V, Le T, Lin M, Copeland G, Barone M, et al. Labor dystocia and its association with interpregnancy interval. *Am J Obstet Gynecol.* 2006 Jul;195(1):121-8.
136. Cheng YW, Hopkins LM, Laros RK, Jr., Caughey AB. Duration of the second stage of labor in multiparous women: maternal and neonatal outcomes. *Am J Obstet Gynecol.* 2007 Jun;196(6):585 e1-6.
137. Cheng YW, Shaffer BL, Bryant AS, Caughey AB. Length of the first stage of labor and associated perinatal outcomes in nulliparous women. *Obstet Gynecol.* 2010 Nov;116(5):1127-35.

6. Danksagung

Mein Dank geht an Herrn Prof. Bollmann, der mir die Tür in die pränatale Diagnostik geöffnet hat, und Herrn Prof. Halle, der mich seit der Promotion väterlich begleitet und die Faszination für die Geburtsmechanik in mir geweckt hat. Herrn Prof. Dudenhausen danke ich herzlich für sein stetes Vertrauen und dafür, dass er mir alle Freiheiten gelassen hat und mich weiterhin unterstützt.

Herrn Prof. Romero danke ich für seine exzellenten Anmerkungen und konstruktiven Kritiken.

Für ihre kontinuierlichen Anregungen und konstruktive Zusammenarbeit bei zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten möchte ich mich bei Frau PD Fotopoulou bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Kalache, der mich an die klinische Forschung heranführte und mir den intrapartalen Ultraschall beibrachte, für seine kontinuierlichen Anregungen und langjährige Unterstützung.

Herrn Prof. Henrich möchte ich im Besonderen bedanken für die Bereitstellung optimaler Arbeitsbedingungen. Er hat mich sowohl klinisch als auch wissenschaftlich immer bestärkt und begleitet.

Vor allem möchte ich mich bei meinen Eltern von ganzem Herzen für ihre Toleranz und grenzenlose Unterstützung bedanken.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Nadin Bamberg und meinen Kindern Julius und Marlene, die mir alle Freiheiten gelassen haben, um diesen Weg gehen zu können und ohne ihr liebevolles Verständnis ich diese Arbeit nicht abgeschlossen hätte.

7. Eidstattliche Erklärung

Gemäß §4 Abs. 3 (k) der HabOmed der Charité

Hiermit erkläre ich, dass

- weder früher noch gleichzeitig ein Habilitationsverfahren durchgeführt oder angemeldet wurde,
- die vorliegende Habilitationsschrift ohne fremde Hilfe verfasst, die beschriebenen Ergebnisse selbst gewonnen wurden, sowie die verwendeten Hilfsmittel, die Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern/ Wissenschaftlerinnen und mit technischen Hilfskräften sowie die verwendete Literatur vollständig angegeben sind,
- mir die geltende Habilitationsordnung bekannt ist.

Berlin, September 2012

Dr. med. Christian Bamberg