

## Danksagung

Die in diesem Buch beschriebene Arbeit ist das Ergebnis der Zusammenarbeit und des Beitrags vieler Menschen. Besonders dankbar sind wir für die wunderbare und kompetente Unterstützung von Frau Anneke Kracht bei der Herstellung aller Abbildungen und Videos. Wir möchten auch Frau Dr. Sacha la Bastide-van Gemert unseren großen Dank aussprechen für die Unterstützung bei der Statistik und die Berechnungen der IMP-Perzentilen.

Die Erhebung der niederländischen Normdaten wäre nicht möglich gewesen ohne den Beitrag der Kollegen der KinderAcademie in Groningen (Leiter: Selma de Ruiter, PhD, und Francien Geerds, MSc), vieler medizinischer Masterstudenten der Universität Groningen, und von Ying-Chin Wu, PT, PhD, und Patricia van Iersel, PT, PhD. Nicht zuletzt danken wir den vielen Eltern und Kindern, die an den Studien teilgenommen haben, die dem IMP-Manual zugrunde liegen, insbesondere denen, die uns erlaubt haben, Bilder (Abbildungen und/oder Videos) ihrer Kinder zur Veranschaulichung des IMP zu verwenden.

Die Erhebung der Normdaten war Teil des IMP-SINDA-Projekts, das von der Cornelia Stichting und der Stichting Ontwikkelingsneurofysiologie Groningen finanziell unterstützt wurde. Wir danken auch für die technische Unterstützung von Linze Dijkstra im IMP-SINDA-Projekt und die kritischen und konstruktiven Kommentare von Schirin Akhbari Ziegler PT, PhD, zu Konzepten einiger Kapitel.

*Mijna Hadders-Algra und Kirsten R. Heineman*

# 1 Einführung

Entwicklungsstörungen entstehen in der Fetalzeit bis ins frühe Säuglingsalter durch schädigende Einflüsse, die aus einer Mischung von genetischen, sozialen, prä-, peri- und neonatalen Risikofaktoren bestehen (Hadders-Algra 2018a). Zu den Entwicklungsstörungen gehören beispielsweise die Cerebralparese (CP), die umschriebene Entwicklungsstörung motorischer Funktionen (UEMF) und die Autismuspektrumsstörungen (ASD). Es zeigt sich mit zunehmender Evidenz, dass Kinder mit Entwicklungsstörungen oder einem erhöhten Risiko für Entwicklungsstörungen von Frühinterventionen profitieren können (Spittle et al. 2015; Morgan et al. 2016; Hadders-Algra et al. 2017): das heißt, von Frühinterventionen in einem Alter, das durch hohe Plastizität des kindlichen Gehirns geprägt ist. Hierdurch ergibt sich die Notwendigkeit für eine möglichst frühe Identifikation dieser Kinder.

Die frühe Identifikation beruht auf der Anamnese (z.B. Frühgeburtlichkeit, intrauterine Wachstumsretardierung, Hypoxisch ischämische Enzephalopathie, angeborene komplexe Herzfehler), auf frühen Befunden der Bildgebung (besonders MRT oder Schädel-Sonografie) und der entwicklungsneurologischen Untersuchung des Kindes (Novak et al. 2017). Die Methode mit der besten Vorhersagequalität für die spätere Entwicklung des Kindes ist die Beurteilung des spontanen Bewegungsverhaltens, das General Movement Assessment, GMA (Einspieler et al. 2005; Heineman und Hadders-Algra 2008; Bosanquet et al. 2013). Da sich die General Movements jedoch zwischen dem 3. und 5. Monat korrigierten Alters (KA) zurückbilden, lässt sich diese Methode nicht bei älteren Säuglingen anwenden. So kamen wir auf die Idee, das Infant Motor Profile (IMP) zu entwickeln (Heineman und Hadders-Algra 2008; Heineman et al. 2008).

IMP beruht – wie das General Movement Assessment – auf der Beurteilung der Qualität des spontanen Bewegungsverhaltens anhand von Videos. Beim General Movement Assessment ist die Beurteilung der Komplexität und Variation der Bewegungen zentral, was als räumliche und zeitliche Komponente der Bewegungsvariation angesehen werden kann (Hadders-Algra 2018b; Wu et al. 2020c). Es erfassst den Umfang des kindlichen Bewegungsrepertoires (Hadders-Algra 2021b). Zusätzlich beurteilt das General Movement Assessment altersspezifische Bewegungsmuster, insbesondere das Auftreten von Fidgety-Bewegungen zwischen dem 2. und 5 Monat (KA) (Einspieler et al. 2005; Wu et al. 2020a).

Variation ist ein Kennzeichen neuraler Aktivität und typischer motorischer Entwicklung (Touwen 1976; Edelman 1989; Changeux 1997; Chervyakov et al. 2016). Das bewog Gerald Edelman (Edelman 1989, 1993) die Neuronal Group Selection Theory (NGST) zu entwickeln (Details s. ▶ Kap. 2). Die Konzepte der

NGST wurden benutzt, um das IMP zu entwickeln – besonders, um die zwei neuen motorischen Domänen zu gestalten: Variation (Umfang des Bewegungsrepertoires) und Adaptabilität (Fähigkeit, die motorische Strategie auszuwählen, die optimal für die jeweilige Situation ist) (Heineman et al. 2008; Hadders-Algra 2010, 2018c). Neben diesen beiden neuen Domänen enthält das IMP die traditionellen Domänen zur Beschreibung von Bewegungen: Symmetrie, Flüssigkeit und Performance.

Das IMP ist eine Untersuchungsmethode für Kinder von 3 bis 18 Monaten (KA). Bei Kindern mit Entwicklungsstörungen oder Entwicklungsretardierung kann das IMP jedoch auch noch nach dem 18. Monat angewendet werden, bis zu einigen Monaten nach dem Beginn des freien Gehens. Das IMP nutzt Videoaufnahmen einer halbstandardisierten Spielsituation von etwa 15 Minuten, in denen die Untersucherin mit dem Kind so spielt, dass die IMP Items beurteilt werden können. Das bedeutet, die Untersucherin kennt die IMP Items und kann so die Untersuchung den Fähigkeiten des Kindes anpassen. Die 80 IMP Items bewerten das motorische Verhalten in Rückenlage, Bauchlage, im Sitzen, Stehen und Gehen sowie bei Ziel- und Greifbewegungen und bei der Manipulation. IMP ist ein Untersuchungsinstrument zur Diskrimination, Evaluation und Prädiktion. IMP wurde für Fachpersonen im Gesundheitswesen entwickelt, die im Bereich der Früherkennung und Frühbehandlung von Entwicklungsstörungen tätig sind: beispielsweise in der Kinderphysiotherapie, der Kinderergotherapie sowie der Entwicklungs-Neuro pädiatrie (► Kasten 1.1).

**Kasten 1.1:** Zwei Beispiele für die Anwendung des IMP in der klinischen Praxis

### Beispiel 1: James

James wurde wegen einer Kopfvorzugshaltung nach rechts in der Kinderphysiotherapie vorgestellt. Seine Schwangerschafts- und Geburtsanamnese waren unauffällig. Im Alter von drei Monaten wird James von der Therapeutin mit dem IMP untersucht. Er erreicht im IMP niedrige Werte für die Domänen Variation und Symmetrie (beide unter der 5. Perzentile [ $< P5$ ]), der Wert für Flüssigkeit liegt im Normbereich, der für Performance liegt unter der 15. Perzentile ( $< P15$ ). Die Therapeutin betreut James und seine Familie und betont die Notwendigkeit verschiedener motorischer Übungen, besonders zur Stimulation seiner nicht bevorzugten Körperseite. Nach drei Monaten testet die Therapeutin ihn erneut mit dem IMP. Im Ergebnis zeigt sich eine Verbesserung für Performance (P15–P50), jedoch kaum für Symmetrie (weiterhin  $< P5$ ). Der Wert für Variation bleibt niedrig ( $< P5$ ). Die Therapeutin sieht im Letzteren ein hohes Risiko für Entwicklungsstörungen. Sie überweist James in die Kinderneurologie.

### Beispiel 2: Janet

Die ehemalig frühgeborene Janet wird kinderärztlich betreut. Sie wurde in der 27. Schwangerschaftswoche geboren, hatte eine komplikationsreiche Neonalzeit und im zerebralen MRT zeigten sich in der weißen Substanz milde periventrikuläre Auffälligkeiten (PVL). Die Kinderärztin untersucht Janet im

korrigierten Alter von 9 Monaten mit dem IMP und vermerkt folgendes: (1) Janets Wert für Variation ist relativ gut (etwas unter der 50. Perzentile [P15–P50]), das weist bei Janet auf ein niedriges Risiko für eine CP hin und ist eine beruhigende Nachricht für die Eltern; (2) die Werte für Symmetrie und Flüssigkeit liegen im Normbereich; und (3) Janets Werte für Adaptabilität und Performance liegen unter der 15. Perzentile (< P15). Die beiden letzten Werte bedeuten, dass Janet von Frühinterventionen profitieren kann: einer Intervention, bei der die Eltern lernen, wie sie die Entwicklung ihres Kindes am besten fördern können (Hadders-Algra 2021a).

Diese Beispiele werden im ▶ Kap. 10 noch einmal erörtert.

Im IMP ist die selbstgenerierte motorische Aktivität zentral. Die selbstproduzierten motorischen Aktionen – die entweder völlig spontan oder während des Spielens mit der Untersucherin auftreten – werden nach den definierten Kriterien der 80 Items bewertet. Die IMP-Bewertung beruht auf der Beobachtung des motorischen Verhaltens, ohne dieses jedoch zu interpretieren (z. B. »hoher Muskeltonus«). Die Interpretation der IMP-Daten basiert auf den IMP-Domänenwerten und dem Gesamt-Score, die am Ende der Untersuchung berechnet werden (▶ Kap. 10). Diese Art der Beobachtung entspricht dem verhaltenswissenschaftlichen Ansatz von Heinz Prechtl, dem Pionier der General Movements (Prechtl 1990). Prechtl hat den Wert verhaltenswissenschaftlicher Methoden, einschließlich der Verhaltensbeobachtung, von seinem berühmten Lehrer, dem Nobelpreisträger Konrad Lorenz gelernt.

In ▶ Kap. 2 werden die Prinzipien der neuromotorischen Entwicklung zusammengefasst mit besonderem Fokus auf die NGST. ▶ Kap. 3 beschreibt den Aufbau und die psychometrischen Eigenschaften, aber auch praktische Aspekte des IMP. In ▶ Kap. 4 bis ▶ Kap. 9 wird das genaue Vorgehen für die unterschiedlichen Untersuchungssituationen, in denen das motorische Verhalten beurteilt wird, dargestellt (in Rückenlage, in Bauchlage, im Sitzen, Stehen und Gehen, bei Ziel- und Greifbewegungen, bei der Manipulation). Die einzelnen Items, einschließlich ihrer Bewertungskriterien, werden genau beschrieben. Für die altersabhängigen Items wird mit Abbildungen aus unserer Normierungsstudie der Alterszusammenhang verdeutlicht (▶ Kap. 3). Diese Altersabhängigkeit besteht hauptsächlich bei den Items für Performance und Adaptabilität.

In ▶ Kap. 10 werden die Berechnung und Interpretation der IMP Scores besprochen. In demselben Kapitel finden sich auch die Perzentilenkurven aus unserer Normpopulation, die an einem repräsentativen niederländischen Kollektiv von 1.700 Kindern zwischen 2 und 18 Monaten (KA), erhoben wurden. Die Perzentilenkurven sind hilfreich für die Interpretation der IMP Scores. Wir beschreiben auch die Bedeutung des IMP-Profils für das physiotherapeutische Vorgehen und dessen prognostischen Wert für die spätere Entwicklung.

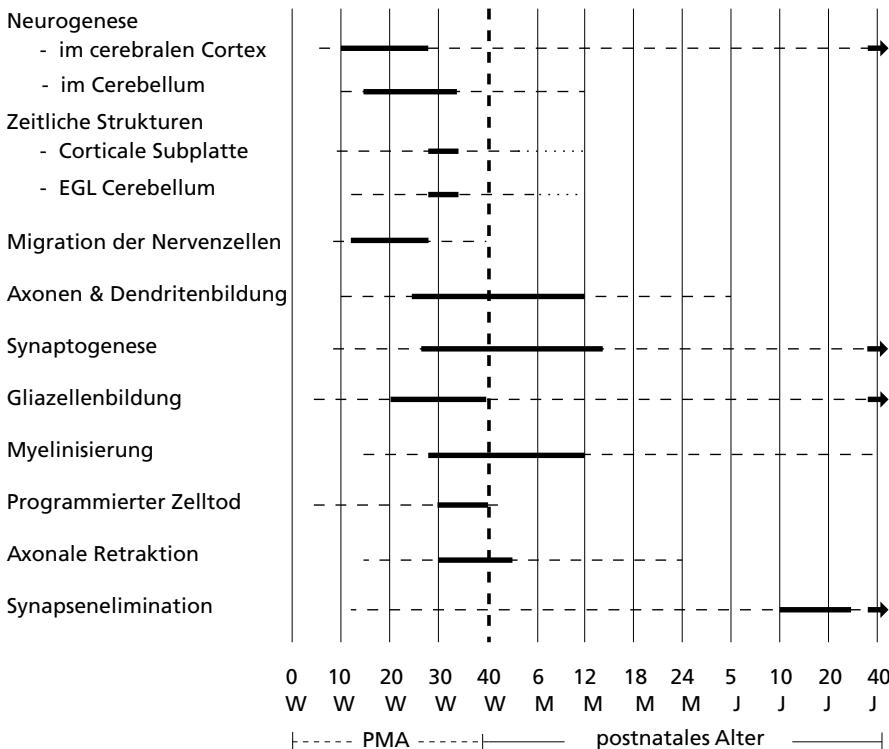
Noch drei abschließende Bemerkungen: Erstens, das angegebene Alter des Kindes bezieht sich immer auf das um die Frühgeburtlichkeit korrigierte Alter (KA). Dies wird im Text nicht weiter gekennzeichnet. Zweitens, es ist für die Autorinnen schwierig, über Personen unterschiedlicher Geschlechtszugehörigkeit

zu schreiben: Sie müssen umständliche Bezeichnungen für das jeweilige Geschlecht oder stets nur dieselbe Form verwenden. Im letzten Fall ist der Text lesbarer, es könnte jedoch der Eindruck entstehen, die anderen Geschlechtsidentitäten würden vernachlässigt. Wir haben uns aus Gründen der besseren Lesbarkeit dafür entschieden, für die Untersucherin die weibliche und für das Kind die männliche Form zu verwenden. Wir möchten allerdings ausdrücklich unsere geschlechtsneutrale Haltung betonen. Drittens, das Buch ist reich illustriert mit Abbildungen und mit Videos. Die Eltern der Kinder gaben uns ihr schriftliches Einverständnis für die Veröffentlichung des Bildmaterials. Diese Information wird in den folgenden Kapiteln nicht mehr bei jedem Bild oder Video wiederholt.

Und zuletzt: IMP richtet sich an Säuglinge und Kleinkinder im Alter von 3 bis 18 Monaten, bzw. bis nach dem Beginn des freien Gehens. Im Folgenden wird für den ganzen Altersbereich der Begriff »Kind« verwendet und schließt Säuglinge ein. Nur wo inhaltlich problematisch, wurde punktuell der Begriff »Säugling« verwendet.

## 2 Prinzipien der neuromotorischen Entwicklung

Das IMP ist ein Instrument zur Beurteilung des motorischen Verhaltens für das Altersspektrum von 3–18 Monate. In dieser Zeit ändert sich das motorische Verhalten eindrucksvoll: so lernen die sich typisch entwickelnden Kinder beispielsweise Greifen, Sitzen, Stehen und Gehen. Die Kinder lernen diese Fertigkeiten durch eine kontinuierliche Wechselwirkung zwischen Entwicklungsprozessen im Körper und in der Umwelt. Unter den körperlichen Entwicklungsveränderungen spielen diejenigen im Gehirn eine herausragende Rolle. In diesem Kapitel fassen wir folgendes kurz zusammen (1) die Entwicklung des menschlichen Gehirns, (2) die Entwicklung der Muskulatur (3) die Entwicklung der sensorischen Systeme (4) Theorien zur motorischen Entwicklung und (5) die motorische Entwicklung. Dabei fokussieren wir auf Entwicklungsveränderungen, die vor dem Alter von 2 Jahren stattfinden (Hadders-Algra 2021a). Im Abschnitt über die Theorien der motorischen Entwicklung beleuchten wir die Neuronal Group Selection Theory näher, da sie den theoretischen Rahmen darstellt, der dem IMP zugrunde liegt.

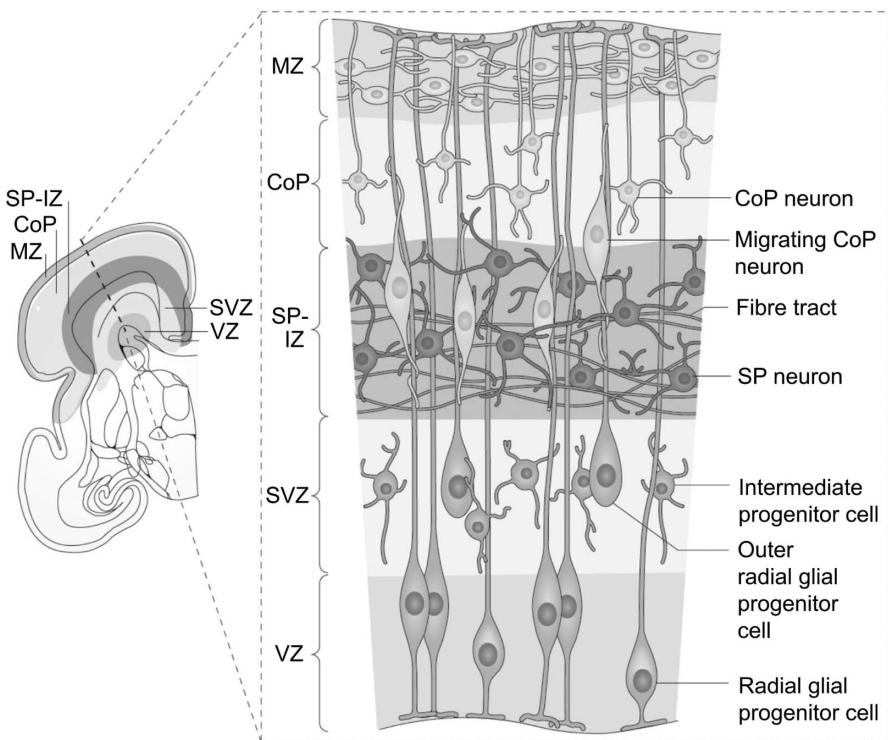


**Abb. 2.1:** Schematischer Überblick über die im menschlichen Gehirn ablaufenden Entwicklungsprozesse.

Die fettgedruckten Linien zeigen an, dass die auf der linken Seite genannten Prozesse sehr aktiv sind, die gestrichelten Linien zeigen an, dass die Prozesse noch ablaufen, aber weniger stark. Das Diagramm basiert auf der Übersichtsarbeit von Hadders-Algra (2018a).

EGL = Externe Granulatschicht; M = Monate; PMA = Postmenstruelles Alter; W = Wochen; J = Jahre.

(mit freundlicher Genehmigung von Mac Keith Press aus »*Early Detection and Early Intervention in Developmental Motor Disorders*« von Mijna Hadders-Algra, erschienen bei Mac Keith Press ([www.mackeith.co.uk](http://www.mackeith.co.uk)) in der Reihe »*Clinics in Developmental Medicine*«, 2021)



**Abb. 2.2:** Entwicklung des menschlichen Kortex – die Subplatte.  
 Schematische Darstellung der menschlichen Großhirnrinde im Alter von 28 Wochen PMA. Auf der linken Seite ist ein koronaler Schnitt abgebildet; der Kasten auf der rechten Seite enthält Einzelheiten zu den Entwicklungsprozessen. Die ventrikuläre Zone (VZ) und die subventrikuläre Zone (SVZ) bilden die Keimmatrizen, in denen die Zellteilung stattfindet. Die ersten Zellgenerationen werden in der VZ gebildet, die späteren Generationen in der SVZ. Die SVZ ist eine Struktur, die sich im Laufe der Phylogenetese ausgedehnt hat; sie ist bei Primaten besonders groß (Ortega et al. 2018). Die radialen Gliazellen spannen ihre Schäfte zwischen den Keimschichten und der äußeren Schicht des Kortex (Marginalzone (MZ)). Die Neuronen der ersten Generation sind in die Subplatte (SP) eingewandert – sie sind an der funktionellen fetalen Hirnrinde beteiligt; spätere Generationen von Neuronen wandern in die kortikale Platte (CP). (Hoerder-Suabedissen und Molnár 2015, mit freundlicher Genehmigung von Springer Nature)

## Die Entwicklung des menschlichen Gehirns

Die Entwicklung des menschlichen Gehirns benötigt viele Jahre und erreicht erst mit 40 Jahren die voll ausgereifte Konfiguration (De Graaf-Peters und Hadders-

Algra 2006; Hadders-Algra 2018a; ▶ Abb. 2.1). Die Entwicklungsprozesse im Gehirn sind das Ergebnis eines kontinuierlichen Austausches von Genen und Umwelt, von Aktivität und Erfahrung (Ben-Ari und Spitzer 2010).

Die Entwicklung des Nervensystems beginnt in der 5. Woche post menstruationem (pm) mit der Bildung des Neuralrohrs aus dem Ektoderm. Kurz nach dem Verschluss des Neuralrohrs werden die Neurone in speziellen ventrikelnahen Arealen gebildet. Die meisten Neurone entstehen in der Periode von 5 bis 25–28 Wochen pm. Sie wandern von ihrem Entstehungsort in den ventrikulären Schichten radial oder tangential zu ihrem Bestimmungsort in der oberflächlicher gelegenen kortikalen Platte. Dieser Migrationsprozess erreicht seinen Höhepunkt zwischen 20 und 26 Wochen pm. Während der Migration beginnen die Neurone sich zu differenzieren: d.h. sie bilden Axone, Dendriten, Synapsen mit Neurotransmittern, die intrazelluläre Maschinerie und die komplexen neuronalen Membranen. Bemerkenswerterweise wandern die Neuronen der ersten Generationen nicht zur kortikalen Platte; sie verbleiben in der kortikalen Subplatte.

Die kortikale Subplatte ist eine Struktur zwischen dem Kortex und der späteren weißen Substanz (▶ Abb. 2.2). Sie ist der wesentliche Ort der Neuronen-Differenzierung und der Synaptogenese im Kortex, sie empfängt die ersten einwachsenden kortikalen Afferenzen (z.B. vom Thalamus) und sie ist der Hauptort der synaptischen Aktivität im Gehirn der mittleren Fetalzeit (Kostović et al. 2015). Das impliziert, dass die Subplatte ein wichtiger Vermittler des fetalen motorischen Verhaltens ist (Hadders-Algra 2018b). Die Subplatte ist am dicksten zwischen 28 und 34 Wochen pm. Zuvor, ab 25 bis 26 Wochen, beginnen die Neurone der Subplatte allmählich abzusterben, und später gebildete Neurone beginnen die kortikale Platte zu besiedeln. Diese Entwicklungsänderungen werden begleitet von einer Verlagerung der thalamo-kortikalen Afferenzen, die nun zu ihrem endgültigen Ziel in der kortikalen Platte wachsen. (Kostović et al. 2014a)

Im dritten Schwangerschaftstrimenon nimmt der Kortex an Größe zu und die Gyrierung beginnt (Kostović und Judas 2010). Die Dicke der Subplatte nimmt in dieser Phase ab, während die Dicke der kortikalen Platte zunimmt. Das bedeutet auch, dass zu diesem Zeitpunkt der menschliche Kortex durch die Koexistenz zweier getrennter, aber miteinander verbundener kortikaler Kreisläufe gekennzeichnet ist: den transienten fetalen Kreisläufen, die in der Subplatte zentriert sind und den noch unreifen, aber sich stetig weiterentwickelnden Kreisläufen in der kortikalen Platte. Der Zustand der doppelten Kreisläufe endet mit der Rückbildung der Subplatte. Diese Situation wird im primären motorischen, sensorischen und visuellen Kortex im Alter von etwa drei Monaten, jedoch im assoziativen präfrontalen Kortex erst im Alter von etwa einem Jahr erreicht (Kostović et al. 2014b).

Zur Hirnentwicklung gehört auch die Bildung von Gliazellen. Die Bildung der Gliazellen findet vor allem in der zweiten Schwangerschaftshälfte statt. Ein Teil der Gliazellen (zum Beispiel die Oligodendrozyten) ist zuständig für die Myelinisierung der Axone. Die Entwicklung der Oligodendrozyten erreicht ihren Höhepunkt zwischen 28 und 40 Wochen pm (Volpe 2009a). Die Myelinisierung ist sehr aktiv im dritten Schwangerschaftstrimenon und in den ersten sechs Monaten nach der Geburt (Yakovlev und Lecours 1967; Haynes et al. 2005). Die Myelinisierung ist

jedoch ein langandauernder Prozess, der erst im Alter von etwa 40 Jahren abgeschlossen ist (De Graaf-Peters und Hadders-Algra 2006).

Zur Hirnentwicklung gehören nicht nur die Neubildung von Neuronen und ihrer Verbindungen, sondern auch Rückbildungsprozesse. Der neuronale Zelltod wurde bereits erwähnt. Man geht davon aus, dass im Zentralen Nervensystem von Säugetieren etwa die Hälfte der gebildeten Neuronen durch Apoptose zugrunde geht. Die Neurone sterben als Ergebnis einer Wechselwirkung zwischen endogen programmierten Prozessen und durch Erfahrung induzierten chemischen und elektrischen Signalen (Lossi und Merighi 2003). Ein bekanntes Beispiel für die Elimination von Axonen ist deren Abbau während der Entwicklung der kortikospinalen Bahn. Hier beginnt die Axonelimination während des letzten Schwangerschaftstrimenons und dauert über die ersten zwei postnatalen Jahre an. Dadurch werden die ursprünglich bilateralen Projektionen der kortikospinalen Bahn im Rückenmark zu einem hauptsächlich kontralateral gelegenen Fasersystem reorganisiert (Eyre 2007). Die Elimination der Synapsen im Gehirn beginnt in der mittleren Fetalperiode. Im zerebralen Kortex ist die Elimination der Synapsen jedoch in der Periode vom Beginn der Pubertät bis zum jungen Erwachsenenalter am stärksten ausgeprägt (Petanjek et al. 2011).

Von früh an sind im Nervengewebe Neurotransmitter mit Rezeptoren vorhanden (s. Review Herlenius und Lagercrantz 2001.) Interessanterweise ist die Periode um den errechneten Geburtstermin durch eine vorübergehende spezifische Konfiguration der verschiedenen Transmittersysteme gekennzeichnet: nämlich durch eine temporäre Überexpression der noradrenergen  $\alpha_2$ -Rezeptoren und glutamatergen NMDA-Rezeptoren, durch eine relativ hohe serotoninerge Innervation und einen hohen dopaminergen Umsatz. Man vermutet, dass diese Konstellation der Neurotransmitter um den errechneten Geburtstermin eine erhöhte Exzitabilität induziert, die sich unter anderem an den Motoneuronen zeigt, und dass diese transiente Konstellation der Neurotransmitter den Übergang vom fetalen periodischen Atemmuster zur kontinuierlichen Atmung, die für das postnatale Überleben notwendig ist, erleichtert (Hadders-Algra 2018b).

Die Entwicklung des Kleinhirns erfolgt nach einem eigenen Zeitplan. Die Zellen des Kleinhirns stammen aus zwei Proliferationszonen: (1) der ventrikulären Zone, aus der durch radiale Wanderung die tiefen Kleinhirnkerne und die Purkinje-Zellen hervorgehen, und (2) der rhombischen Lippe, aus der durch tangentielle Wanderung die äußere Körnerschicht hervorgeht (Volpe 2009b). Die Proliferation der Kleinhirnzellen beginnt mit 11 Wochen pm in der ventrikulären Zone und mit 15 Wochen in der äußeren Körnerschicht. Die äußere Körnerschicht ist eine transiente Struktur, die zwischen 28 und 34 Wochen pm ihre maximale Dicke hat. Hier werden die häufigsten Kleinhirnzellen, die Körnerzellen, gebildet. Diese Zellen wandern von der äußeren Körnerschicht nach innen zu ihrem Bestimmungsort in der inneren Körnerschicht. Letztere wächst am stärksten zwischen der Schwangerschaftsmitte und drei Monaten nach errechnetem Termin. Die äußere Körnerschicht schrumpft, vor allem zwischen dem zweiten und dritten Monat nach errechnetem Termin. Es dauert jedoch bis zur zweiten Hälfte des ersten Lebenshalbjahrs, bis sie sich vollständig auflöst (Hadders-Algra 2018a).