

**Sensorische Integration -  
Raumwahrnehmung  
unter besonderer Berücksichtigung des  
Kindesalters**

**Katherina Lugmair**

**Aus dem Institut für Soziale Pädiatrie und Jugendmedizin der Ludwig -  
Maximilians - Universität München**

**Vorstand: Prof. Dr. med. Dr. h. c. Hubertus von Voß**

**Sensorische Integration -  
Raumwahrnehmung  
unter besonderer Berücksichtigung des  
Kindesalters**

**Dissertation**

**zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin  
an der Medizinischen Fakultät der  
Ludwig- Maximilians- Universität zu München**

**vorgelegt von  
Katherina Lugmair**

**aus**

**Rosenheim**

**2006**

**Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität München**

**Berichterstatter: Prof. Dr. Dr. h. c. H. v. Voß**

**Mitberichterstatter: Prof. Dr. E. Pöppel**

**Dekan: Prof. Dr. med. D. Reinhardt**

**Tag der mündlichen Prüfung: 19.10.2006**

**Meinen Eltern**

# Inhaltsverzeichnis

## TEIL A

<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
<b>Methodik</b>	<b>8</b>

## TEIL B

<b>1. DEFINITION DES WAHRNEHMUNGSBEGRIFFS</b>	<b>10</b>
<b>2. PHYSIOLOGIE DER SINNESORGANE</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Vergleich mit dem Tierreich</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Reizleitung und -verarbeitung</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Klassifizierung der Sinnesorgane</b>	<b>22</b>
<b>2.4 Der Gesichtssinn</b>	<b>24</b>
<b>2.4.1 Physiologie des Auges</b>	<b>25</b>
<b>2.4.2 Die Sehbahn</b>	<b>30</b>
<b>2.4.3 Physiologie des Sehens</b>	<b>36</b>
<b>2.5 Das Gehör</b>	<b>45</b>
<b>2.6 Der Tastsinn</b>	<b>48</b>
<b>2.7 Der Geruchssinn</b>	<b>50</b>
<b>2.8 Der Geschmackssinn</b>	<b>52</b>
<b>2.9 Der Druck- und Berührungssinn</b>	<b>53</b>
<b>2.10 Der Temperatursinn</b>	<b>53</b>
<b>2.11 Der Schmerzsin</b>	<b>55</b>
<b>2.12 Die Organempfindungen</b>	<b>56</b>
<b>2.13 Der Stellungs- und Spannungssinn</b>	<b>60</b>
<b>2.14 Der Lage-, Bewegungs- und Drehbewegungssinn</b>	<b>60</b>

<b>3. PHYSIOLOGISCHE GRUNDLAGEN DER RAUMWAHRNEHMUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER KINDESENTWICKLUNG</b>	<b>64</b>
3.1 Die Bedeutung der Wahrnehmung im Lauf der Phylo- und Ontogenese	65
3.2 Das zentrale Nervensystem	66
3.2.1 Der Aufbau des menschlichen Gehirns	66
3.2.2 Die intrauterine Entwicklung	71
3.2.3 Der Kortex	73
3.3 Die Integration der Sinne	76
3.4 Die Entwicklung der Sehfunktion	78
3.4.1 Der Einfluß von Umweltfaktoren auf die Entwicklung der Sehfunktion	78
3.4.2 Die Auswirkung aktiver Bewegung auf die Entwicklung der Sehfunktion	83
3.5 Die Blicksteuerung	84
3.6 Grundlagen der Tiefenwahrnehmung	91
3.7 Die Verarbeitung von Tiefenbewegungen	93
3.8 Grundlagen des Stereosehens	99
3.9 Die Simultanerfassung	106
3.10 Unterschiede in der Kontrastempfindlichkeit von Mensch und Katze	107
3.11 Das Zustandekommen optischer Täuschungen	108
3.12 Mechanismen der statischen Wahrnehmung	114
<b>4. GRUNDLAGEN DER RAUMWAHRNEHMUNG AUS ENTWICKLUNGS-PSYCHOLOGISCHER SICHT</b>	<b>119</b>
4.1 Lernprozesse und Gedächtnisleistungen	119
4.2 Die Organisation räumlichen Verhaltens	128
4.3 Die Evolution des Verhaltens im Raum	131
4.4 Realer und kognitiver Raum	131
4.5 Die neuronale Repräsentation des Raums	133

<b>4.6</b>	<b>Die Bedeutung der Sinne für die Entwicklung der Raumwahrnehmung</b>	<b>134</b>
<b>4.7</b>	<b>Sensorische Integration nach Jean Ayres</b>	<b>136</b>
<b>4.8</b>	<b>Integrationsstörungen</b>	<b>137</b>
<b>4.9</b>	<b>Das Körperschema</b>	<b>139</b>
<b>4.10</b>	<b>Störungen des Körperschemas</b>	<b>142</b>
<b>4.11</b>	<b>Entwicklung und Reifung der Wahrnehmung</b>	<b>144</b>
<b>4.12</b>	<b>Der Einfluß sozialer Aspekte auf die Entwicklung der Wahrnehmung</b>	<b>153</b>
<b>4.13</b>	<b>Die Wahrnehmungsentwicklung des Kindes nach Marianne Frostig</b>	<b>155</b>
<b>4.14</b>	<b>Modelle der Kindesentwicklung</b>	<b>158</b>
<b>4.14.1</b>	<b>Piagets Theorie der kognitiven Entwicklung des Kindes</b>	<b>158</b>
<b>4.14.1.1</b>	<b>Das senso- motorische Stadium</b>	<b>161</b>
<b>4.14.1.2</b>	<b>Das präoperative Stadium</b>	<b>166</b>
<b>4.14.1.3</b>	<b>Das konkret- operative Stadium</b>	<b>170</b>
<b>4.14.1.4</b>	<b>Das formal- operative Stadium</b>	<b>172</b>
<b>4.14.2</b>	<b>Die Entwicklungsschritte des Kindes nach Jean Ayres</b>	<b>173</b>
<b>4.14.2.1</b>	<b>Der erste Lebensmonat</b>	<b>175</b>
<b>4.14.2.2</b>	<b>Der zweite und dritte Lebensmonat</b>	<b>176</b>
<b>4.14.2.3</b>	<b>Der vierte bis sechste Lebensmonat</b>	<b>177</b>
<b>4.14.2.4</b>	<b>Der sechste bis achte Lebensmonat</b>	<b>178</b>
<b>4.14.2.5</b>	<b>Der neunte bis zwölfte Lebensmonat</b>	<b>179</b>
<b>4.14.2.6</b>	<b>Das zweite Lebensjahr</b>	<b>180</b>
<b>4.14.2.7</b>	<b>Das dritte bis siebte Lebensjahr</b>	<b>181</b>
<b>5.</b>	<b>STÖRUNGEN DER RAUMWAHRNEHMUNG</b>	<b>183</b>
<b>5.1</b>	<b>Einteilungsaspekte räumlicher Störungen</b>	<b>183</b>
<b>5.2</b>	<b>Cerebrale Ursachen für Störungen der Raumwahrnehmung und ihre Erscheinungsformen</b>	<b>185</b>
<b>5.3</b>	<b>Manifestationsformen räumlicher Wahrnehmungsstörungen bei Kindern</b>	<b>190</b>
<b>5.4</b>	<b>Auswirkungen auf den sozialen Bereich</b>	<b>195</b>
<b>6.</b>	<b>MÖGLICHKEITEN DER WAHRNEHMUNGSFÖRDERUNG</b>	<b>197</b>
<b>6.1</b>	<b>FRÜHERKENNUNG VON WAHRNEHMUNGSSTÖRUNGEN</b>	<b>197</b>
<b>6.1.1</b>	<b>Früherkennung von Wahrnehmungsstörungen im visuellen Bereich</b>	<b>198</b>
<b>6.1.1.1</b>	<b>Strabismus</b>	<b>201</b>
<b>6.1.1.2</b>	<b>Astigmatismus</b>	<b>209</b>
<b>6.1.1.3</b>	<b>Isokorie</b>	<b>211</b>
<b>6.1.1.4</b>	<b>Visuell evozierte Potentiale</b>	<b>211</b>

6.1.2	<b>Früherkennung von Wahrnehmungsstörungen im auditiven Bereich</b>	213
6.1.2.1	Otoskopie	215
6.1.2.2	Tympanometrie	215
6.1.2.3	Otoakustische Emissionen	216
6.1.2.4	Elektro- Cochleographie	216
6.1.2.5	Brainstem Electric Response Audiometry (BERA)	217
6.1.2.6	Positronen- Emissions- Tomographie (PET)	217
6.2	<b>Testverfahren</b>	219
6.2.1	Psychologische Testverfahren	219
6.2.2	Psychomotorische Testverfahren	221
6.2.3	Intelligenztests für Kinder und Jugendliche	222
6.3	<b>Förderung der Wahrnehmungstätigkeit</b>	228
6.3.1	Förderung der visuellen Wahrnehmung	229
6.3.2	Förderung der auditiven Wahrnehmung	231
6.4	<b>Rehabilitation von Patienten mit Störungen der Raumwahrnehmung</b>	232
6.5	<b>Die Sensorische Integrationstherapie nach Jean Ayres</b>	233
<b>TEIL C</b>		
	Diskussion	238
<b>TEIL D</b>		
	Zusammenfassung	243
	LITERATURVERZEICHNIS	246
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	250
	Danksagung	251
	Lebenslauf	252

## *Dämmer-Empfindung*

*Was treibt mich hier von hinnen?  
Was lockt mich dort geheimnisvoll?  
Was ists, das ich gewinnen,  
Und was, womit ichs kaufen soll?*

*Trat unsichtbar mein Erbe,  
Ein Geist, ein luftger, schon heran,  
Und drängt mich, dass ich sterbe,  
Weil er nicht eher leben kann?*

*Und winkt mir aus der Ferne  
Die Traube schon, die mir gereift  
Auf einem andern Sterne,  
Und will, dass meine Hand sie streift?*

*Friedrich Hebbel (1843)*

## **Teil A**

### **Einleitung**

Störungen der Wahrnehmung im Allgemeinen, sowie der visuellen Wahrnehmung und dabei der Raumwahrnehmung im Speziellen stellen ein noch immer vernachlässigtes Forschungsgebiet dar. Literatur und Daten zu diesem Thema sind rar, insbesondere für das Kindesalter. Zudem findet sich kaum eine präzise und einheitliche Sprachregelung. Die Funktion der Sinnesorgane wird von vielen als selbstverständlich erachtet und daher nicht bewusst zur Kenntnis genommen.

Ungeachtet seiner immensen Bedeutung für das tägliche Leben hat sich der Bereich der Sinnes- und Wahrnehmungstätigkeit noch nicht in ausreichendem Maße im Bewusstsein der Bevölkerung, seien es Eltern und Lehrer, aber auch Ärzte oder Therapeuten, etabliert. Für das Kindesalter werden mehr Theorien geriert als Fakten, die auf validen Untersuchungsergebnissen beruhen. Klinische Psychologen haben vor allem mit der Entwicklung von Testverfahren zur Intelligenz und des Verhaltens Wahrnehmung als solche bei der Entwicklung besagter Untersuchungsverfahren berücksichtigt, sich aber vor allem empirisch dem Bereich Wahrnehmung angenommen.

Wie sehr aber Wahrnehmung bei Patienten und dann auch Kindern eingeschränkt sein kann - angeboren oder erworben - dies wird bei Merkfachbehinderungen, nach Schädel - Hirnverletzungen etc. den Patienten mit zunehmender Entwicklung bewusst und von der Umwelt wahrgenommen. Störungen im Bereich Wahrnehmung wirken sich auf viele, wenn nicht alle Lebensbereiche einschränkend aus.

Die vielfältigen Konsequenzen, die ein diesbezügliches Defizit mit sich bringt, sind den meisten Menschen häufig gar nicht bewusst. So ergeben sich für betroffene Kinder nicht nur nachteilige Konsequenzen für die Entwicklung von Sprache und Sprachverständnis, sondern auch für das Erlernen von Rechnen und Lesen und das Meistern von Alltagsaufgaben, die anderen als selbstverständlich erscheinen. Dadurch ergeben sich Einschränkungen für die Kindergarten- und Schulzeit und auch später für die Berufswahl, die sich negativ auswirken können auf soziale Fähigkeiten, was mitunter psychische Auffälligkeiten nach sich zieht. Die Liste ließe sich beliebig fortsetzen. Bedeutend ist in diesem Zusammenhang auch die Tatsache, dass einmal Versäumtes auf dem Gebiet der Früherkennung von Wahrnehmungsstörungen häufig durch Therapie nie wieder aufgeholt werden kann. Dabei ist festzuhalten, dass derzeit eher zu häufig die Diagnose „Wahrnehmungsstörung“ bei Kindern

gestellt wird und vielfach Charaktereigenschaften unnötig pathologisiert werden, folglich Therapie als anscheinend „zwingend“ erklärt wird und sich damit die Gefahr vergrößert, nicht immer die tatsächlich Betroffenen identifiziert zu haben. Somit wird es zukünftig mehr denn je notwendig werden, Instrumente der Frühdiagnostik von Wahrnehmungsstörungen unterschiedlichster Art und unterschiedlichsten Schweregrades mit nachvollziehbaren Untersuchungsverfahren frühzeitig erkennen zu können.

Was das Wissen um Diagnostik- und Therapiemöglichkeiten bei nicht intakter Wahrnehmungstätigkeit gerade im Kindesalter betrifft, so besteht ein großer Nachholbedarf.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, den Kenntnisstand zur Wahrnehmung und möglichen Störungen aus der Literatur zusammenzutragen. Damit sollen Fachleute in die Lage versetzt werden, sich von pauschalen Aussagen zur Wahrnehmung und deren Entwicklungsprozess zu distanzieren, um gerade auch im Hinblick auf tatsächlich nachgewiesene Typen von Wahrnehmungsstörungen differenzierter als bisher Therapiekonzepte entwickeln zu können.

## **Methodik**

Die vorliegende Arbeit basiert in erster Linie auf einer Literaturrecherche zur Wahrnehmung und damit den Sinnesbereichen, so z. B. der visuellen und auditiven Wahrnehmung. Hierbei wurde besonders Wahrnehmung unter dem Aspekt der Entwicklung bei Kindern betrachtet. Dies bedeutet, dass gerade auch Erkenntnisse aus der Entwicklungspsychologie und -physiologie beachtet und zusammen getragen wurden. Nachdem zu Wahrnehmungsstörungen eine Reihe von zum Teil selbst ernannten Fachleuten sich seit langem therapeutisch betätigt, sollte die vor allem im angloamerikanischen Bereich bevorzugte Therapiemethode, entwickelt von JEAN AYRES besondere Beachtung finden. Heute firmiert diese Methode als Therapie der „Sensorischen Integration nach Jean Ayres“ und wird als Spezialgebiet der Ergotherapie verstanden.

Die vorliegende Arbeit soll weiterhin einen Beitrag leisten zu einer präziseren Sprachregelung zur Begrifflichkeit „Wahrnehmung“. Befasst man sich nämlich näher mit diesem Thema, so stellen sich unwillkürlich Fragen wie, „was versteht man unter den einzelnen Wahrnehmungsbereichen“, „wie genau definiert sich visuelle, wie taktile Wahrnehmung“, etc. Mittlerweile ist deutlich geworden, dass „Wahrnehmung“ etwas anderes darstellt als „Empfinden“. Somit sollten in dieser Arbeit die Unterschiede zwischen den beiden Begriffen herausgearbeitet werden.

Literaturhinweise und Quellenangaben wurden bewusst so angeordnet, dass der Leser an den Inhalten erkennen kann, um welche Autoren, Forscher bzw. Forschungsgruppen es sich handelt, die sich mit den jeweiligen Einzelbereichen der Wahrnehmung befasst haben. Besonderen Wert legte ich darauf, nicht durch ständiges Zitieren von Namen und Quellen die Inhalte der Recherche und Darstellung brüchig werden zu lassen. Ziel war es, die Inhalte all dessen, was zur Wahrnehmung weitgehend bekannt ist, in verständlicher Form wiederzugeben. Zitate, die mir als besonders hervorhebenswert erschienen, sind mit genauer Seitenzahl angeführt.

Im Rahmen meiner Literaturrecherche habe ich mich darüber hinaus nicht zuletzt mit dem Informationsmedium „Internet“ beschäftigt und in diesem Zusammenhang geprüft, wie viel Qualität von Internetartikeln zu den thematischen Fragestellungen dieser Arbeit zu erwarten ist. Aus diesem Grund werden dem Internet entnommene Literaturquellen auch ausdrücklich im Anhang erwähnt. Eltern von Kindern mit vermeintlichen Wahrnehmungsstörungen informieren sich zunehmend im Internet, was darunter zu verstehen ist. Gleiches gilt für manche Fachgruppen, die ihrerseits häufig aber „Therapiekonzepte“ als qualitätsgesichert

bezeichnen und somit viele Eltern mit ihren Kindern von der Sinnhaftigkeit einer so genannten Therapie zu überzeugen versuchen.

## **Teil B**

### **1. Definition des Wahrnehmungsbegriffs**

#### **Wahrnehmung**

Der Begriff der Wahrnehmung besagt zunächst einmal, dass ein subjektiv ausgewählter Reiz aus der Umwelt durch das jeweils adäquate Sinnesorgan aufgenommen wird; als Elemente der Wahrnehmung dienen hierbei die Sinneseindrücke, etwa eine gesehene Farbe, die jedoch nie isoliert, sondern stets in Summation mit anderen Eindrücken auftreten, die dann im Ganzen als Sinnesempfindung bezeichnet werden. Kommen nun noch die individuelle Einordnung und Deutung, sowie der Vergleich mit früheren Erfahrungen hinzu, so wird der Vorgang als Wahrnehmung bezeichnet.

Der Reiz wird dabei über die afferenten Nervenbahnen in die entsprechenden sensorischen Zentren im Großhirn geleitet, woraufhin das Wahrgenommene gespeichert und mit früheren Speicherungen verglichen wird. Die Reize werden verarbeitet und in Bezug auf frühere Erfahrungen eingeordnet. Im Rahmen der reizbeantwortenden motorischen Reaktion sendet das Großhirn anschließend Impulse über die efferenten Nervenbahnen an die ausführenden Organe. Der Prozeß der Wahrnehmung ist also kreisförmig. Ein neuer Reiz wird mit bereits vorliegenden Informationen verarbeitet, ist aber auch immer wieder Lieferant neuer Erfahrungen; Reaktionen auf Reize ziehen weitere Wahrnehmungen nach sich. Die maximale Entwicklung des Wahrnehmungsvermögens findet im Alter zwischen 3,5 und 7 Jahren statt (7,55,79,124).

Für den Begriff der Wahrnehmung finden sich vielerlei Definitionen und Deutungen: „Wahrnehmung kann definiert werden als Aufnahme gegebener Informationen in das Gehirn und Verarbeitung zu einer sinnlichen Erkenntnis, die in Zusammenhang mit einer gestellten Lebensaufgabe zweckmäßig genutzt werden kann. Ursprung aller Wahrnehmung ist das stete Bestreben des Gehirns, sich Informationen zu beschaffen. Um unnötige Informationen auszuschalten, sind Filtersysteme (z.B. im Thalamus) von wesentlicher Bedeutung“ (88, S 39).

Unter Wahrnehmung versteht man den Prozeß der Informationsaufnahme aus Umwelt- und Körperreizen, was einer äußeren und inneren Wahrnehmung entspricht, sowie die Weiterleitung, Koordination und Verarbeitung dieser Reize im Gehirn. In diesen Prozeß gehen individuelle Erfahrungen, Erlebnisse und subjektive Bewertungen ein. In der Regel

folgen der Aufnahme und Verarbeitung von Informationen Reaktionen in der Motorik oder im Verhalten eines Menschen, die wiederum zu neuen Wahrnehmungen führen (79,98).

## **Empfindung**

Als Empfindungen werden die durch die Sinnesorgane aufgenommenen Reize der Außenwelt bezeichnet. Hierbei ist noch keine seelische Verarbeitung gegeben, denn dann spräche man von Wahrnehmungen. Manche Empfindungen treten bereits vorgeburtlich oder zum Zeitpunkt der Geburt auf und verschwinden dann für kurze Zeit wieder (83). Nach Eisler kennzeichnet Empfinden das Erleben eines einfachen Bewusstseinsinhaltes, Wahrnehmung dagegen die Deutung eines Empfindungskomplexes als Repräsentant eines bestimmten Gegenstandes. Wahrnehmung wäre demnach als Empfinden einschließlich der Herstellung von Beziehungen oder als Objektivieren zu sehen; d.h. Empfindung bezeichnet den syntaktischen Aspekt und Wahrnehmung den semantischen Aspekt der Informationsaufnahme des Bewusstseins (22,87).

Der erste, der im Jahre 1765 auf den Unterschied zwischen Empfindung und Wahrnehmung hinwies, war Thomas Reid. E.G. Boring zitiert wie folgt: „Eine Empfindung, sagte er, ist, obwohl sie durch den Eindruck auf ein Sinnesorgan bewirkt wird, nichts Leibliches, sondern etwas Seelisches. Nur ein empfindendes Wesen kann Empfindungen haben. Auf der anderen Seite ist Wahrnehmung, obwohl sie auf Empfindung beruht, nichtsdestoweniger mehr als Empfindung, weil jene sowohl die Konzeption des wahrgenommenen Objekts als auch die unmittelbare und unwiderstehliche Überzeugung der gegenwärtigen Existenz des Objekts beinhaltet“ (12, S13).

Diese Definition beinhaltet bereits zwei wichtige Aspekte des Wahrnehmungsbegriffs. Einerseits wird damit gesagt, dass Wahrnehmung die Konzeption eines Objekts im Sinne von Gegenstandswahrnehmung beinhaltet; damit kommt der Wahrnehmung bereits eine primäre Denkfunktion zu. Andererseits ist Wahrnehmung immer mit der unmittelbaren unwiderstehlichen Überzeugung der augenblicklichen Existenz eines Objekts verbunden (87). Betrachtet man das englische Wort „perception“, so ergibt sich noch ein dritter Aspekt. „To perceive“, vom lateinischen „percipere“, bedeutet im Englischen soviel wie „apprehend with the mind“ oder „apprehend through the senses“ (67). Im englischen Begriff steckt also das aktive Aufnehmen des Bewußtseins bzw. das Gerichtetsein der Aufmerksamkeit auf ein Objekt, entsprechend der Bedeutung des lateinischen „percipere“, nämlich erfassen, sammeln (87).

Jean Ayres drückt sich folgendermaßen aus: „Empfindungen sind Ströme von elektrischen Impulsen. Biochemische Prozesse sind in die Erzeugung von Impulsen einbezogen. Diese Impulse müssen integriert werden, damit sie eine Bedeutung erhalten. Die Integration führt Empfindung in die Wahrnehmung über. Wir nehmen unseren Körper, andere Personen und Gegenstände wahr, weil unser Gehirn die Sinnesimpulse, die wir von ihnen erhalten, in bedeutungsvolle Formen und Beziehungen überführt hat“ (7, S 8).

Helmholtz (42,106) fasste Wahrnehmung als unbewußten Schluß von Empfindungen, die Gegenwart von Objekten als Ursache unserer Nervenerregung auf. Nach seiner Wahrnehmungstheorie ist Wahrnehmung als konstruierende Deutung von Empfindungen aus gemachter Erfahrung zu verstehen.

Die entsprechende Stelle bei Helmholtz stammt aus seinem wichtigsten philosophischen Vortrag: „Die Tatsachen in der Wahrnehmung“ von 1878 und greift einen Zusammenhang aus § 26 der 11 Jahre früher erschienenen „Physiologischen Optik“ wieder auf:

*„Die überzeugende Kraft jedes Experiments (durch das wir die Erscheinungsweise der Objekte abändern) ist aber hauptsächlich deshalb sehr viel grösser, als die der Beobachtung eines ohne unser Zuthun ablaufenden Vorganges, weil beim Experiment die Kette der Ursachen durch unser Selbstbewusstsein hindurchläuft. Ein Glied dieser Ursachen, unseren Willensimpuls, kennen wir aus innerer Anschauung und wissen, durch welche Motive er zu Stande gekommen ist. Von ihm aus beginnt dann, als von einem uns bekannten Anfangsglied und zu einem uns bekannten Zeitpunkt, die Kette der physischen Ursachen zu wirken, die in den Erfolg des Versuches ausläuft. Aber eine wesentliche Voraussetzung für die zu gewinnende Überzeugung ist die, dass unser Willensimpuls weder selbst schon durch physische Ursachen, die gleichzeitig auch den physischen Process bestimmen, mit beeinflusst worden sei, noch seinerseits psychisch die darauf folgenden Wahrnehmungen beeinflusst habe“ (106).*

Mit den „darauffolgenden Wahrnehmungen“ meint Helmholtz die der Handlung des Experimentators folgenden Veränderungen der Wahrnehmung. Er sieht das Experiment nicht auf den naturwissenschaftlichen Experimentator beschränkt, sondern ist der Auffassung, dass jeder Mensch nach seiner Geburt, vielleicht auch schon davor, mit seinen Bewegungen experimentiert und erst damit zu Wahrnehmungen, d.h. Deutungen von Empfindungen als Zeichen räumlicher Objekte, gebracht wird. Nicht nur das Experimentieren des Naturwissenschaftlers, sondern auch die Raumwahrnehmung ist als Resultat von

Experimenten also eng an die Fähigkeit geknüpft, ein Bewusstsein von sich selbst zu entwickeln. Dies ist genau die Wahrnehmungstheorie, deren Tradition sich auch der Psychologe Prinz zurechnet (106).

Gibson (35) dagegen meinte sogar unterscheiden zu können zwischen einer reinen Empfindungswelt, die v.a. dem bildenden Künstler zugänglich ist, und einer Wahrnehmungswelt, die der Gegenstandswelt des „normalen“ Menschen entspricht. 1966 rückte er allerdings von dieser Vorstellung ab und kam zu dem Schluß, Wahrnehmungen könnten prinzipiell nicht auf Empfindungen zurückgeführt werden (36).

Die drei Aspekte des Wahrnehmungsbegriffs, „Wahrheitsaspekt“, „Gegenstandsaspekt“ und „Handlungsaspekt“ werden in der Wahrnehmungsdefinition des Dialektischen Materialismus vereinigt: „Im Unterschied zur Empfindung gibt die Wahrnehmung als ganzheitliches, sinnliches Abbild die räumlichen Eigenschaften und Beziehungen der Gegenstände, Kontur, Konfiguration, Größe, Entfernung wieder. Daraus erklärt sich, weshalb Gesichtssinn und Tastsinn bei der Bildung der Wahrnehmung eine entscheidende Rolle spielen, denn sie ermöglichen die Raumwahrnehmung. Die optischen und taktilen Sinnesqualitäten bilden das Skelett der Wahrnehmung des Gegenstandes, um das sich die Angaben der anderen Sinnesorgane gruppieren. In den optischen und taktilen Sinnesqualitäten werden weitgehend dieselben Eigenschaften der Gegenstände widergespiegelt, wobei das optische Bild vor allem durch die Angabe des Tastsinns bestimmt wird. Das zeigt den engen Zusammenhang der Wahrnehmung mit dem Handeln, insbesondere mit der Arbeitstätigkeit“ (59, in: 53, S 1135).

Die Psychologie des Behaviorismus, die eine Wissenschaft vom beobachtbaren Verhalten fordert, deutet Wahrnehmung als Reaktion des Organismus auf einen Reiz. Verbindungen zwischen einem Stimulus und einer Reaktion werden durch einmaliges oder wiederholtes gemeinsames Auftreten bzw. durch Verstärkung verfestigt und bilden die Elemente menschlichen Lernens (95).

## 2. Physiologie der Sinnesorgane

Sensorische Grundlage jeder Wahrnehmung sind die Sinnesorgane. Deshalb soll an dieser Stelle auf die Physiologie der Sinnes- und Nerventätigkeit bei der menschlichen Wahrnehmung eingegangen werden.

Seit langem ist das Gehirn Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung. Erste Erfolge waren den Bemühungen gegen Ende des neunzehnten Jahrhunderts beschieden und nach dem zweiten Weltkrieg erzielte man mit neuen Techniken deutliche Fortschritte. Doch obwohl sich die Neurobiologie in den letzten Jahren zu einem der aktivsten Wissenschaftszweige entwickelt hat, steht die Hirnforschung, da es sich beim menschlichen Gehirn um ein ungeheuer kompliziert verflochtenes Organ handelt, trotz aller neu gewonnenen Erkenntnisse noch in ihren Anfängen. Beim Gehirn handelt es sich um ein System zur Informationsverarbeitung, das im Laufe seiner über Jahrmillionen dauernden Evolution bestimmte Aufgaben außergewöhnlich gut auszuführen gelernt hat (45,79).

Paradoxerweise ist der Mensch sich der Dinge, die sein Gehirn am schlechtesten bewältigen kann, am bewußtesten - man denke nur an die jüngsten evolutionären Entwicklungen, wie etwa Logik, Mathematik und Philosophie. Seine wahren Fähigkeiten, dazu zählt beispielsweise das Sehen, nimmt er demgegenüber häufig gar nicht explizit wahr.

Bemerkenswert ist, wie ähnlich die Funktionen des Nervensystems selbst bei stammesgeschichtlich so verschiedenen Lebewesen wie etwa Tintenfisch und Mensch sind. Das menschliche Gehirn als das Endprodukt einer 500 Millionen Jahre währenden Entwicklung der Vertebraten, die allesamt über ein zentrales Nervensystem mit Gehirn und Rückenmark verfügen, stellt das Zentrum dar, in dem Empfindungsreize konvergieren und Reaktionen erzeugt werden. Die ersten Vertebraten, Vorfahren der heutigen Fische, Amphibien, Reptilien, Vögel und der Säugetiere, waren primitive Fische, die eine sehr einfache zentral- nervöse Struktur besaßen, mit deren Hilfe sie nur wenige Empfindungsreize integrieren konnten.

Die ersten Strukturen und Funktionen des Gehirns, die sich entwickelten, haben sich im Lauf der Geschichte kaum verändert. Während der Hirnentwicklung kamen neue Strukturen und Funktionen zu diesen fundamentalen Elementen, die älteren Teile des Gehirns funktionieren jedoch heutzutage in der gleichen Art und Weise wie schon bei den Vorfahren des Menschen vor Millionen von Jahren (7,45).

## 2.1 Vergleich mit dem Tierreich

In vielen Fällen ist es für die Beantwortung der gegenwärtig noch offenen Fragen unerheblich, welches Gehirn man betrachtet, so dass die meisten Erkenntnisse der Neurobiologie im Tierexperiment gewonnen wurden. Dennoch bestehen auch einige Unterschiede bezüglich der Sinneskanäle von Mensch und Tier. Da die Empfindungs- und Wahrnehmungsprozesse einer direkten naturwissenschaftlichen Analyse nicht zugänglich sind, kann auf sie nur durch die Angaben von Versuchspersonen rückgeschlossen werden, wobei natürlich auch Tiere im Verhaltensexperiment indirekt Auskünfte über ihre Wahrnehmung geben. Man will einerseits von Versuchspersonen subjektive Angaben über Empfindungen und Wahrnehmungen erhalten, andererseits soll gleichzeitig die Funktion von Nervenzellen oder Nervenzellkomplexen registriert und analysiert werden. Letzteres ist im Tierversuch zwar leichter möglich, hier sind allerdings nur indirekte Aussagen über mögliche Empfindungen, Wahrnehmungen, Motive und Stimmungen zu machen.

In unserer Umwelt gibt es eine Vielzahl physikalischer Parameter wie Temperatur, elektromagnetische Wellen, Magnetfeld oder Schallwellen, von denen ein großer Teil vom Organismus gemessen, beurteilt und verarbeitet werden kann. Dafür sind Mensch und Tier mit speziellen Sinnesorganen ausgerüstet (45,55).

Während der Entwicklung der Tierwelt haben diejenigen Individuen, die in der Lage waren, sich erfolgreich an die Naturbedingungen anzupassen, überlebt und konnten ihre Gene an ihre Nachkommen weitergeben. In der Tierwelt stellt Anpassung die Fähigkeit dar, seinen Körper und die Umwelt zu empfinden, diese Gefühle richtig zu interpretieren und dann eine geeignete motorische Reaktion zu erzeugen, um etwa genügend Futter zu finden, nicht selbst gefressen zu werden, oder um mit den rauen Umweltbedingungen zurecht zu kommen. Die Tiere, die sich angepaßt und überlebt haben, waren durch ihre guten sensomotorischen Funktionen dazu in die Lage versetzt worden.

Bis vor etwa 100 Millionen Jahren bestand das Gehirn bei den frühen Tieren vorwiegend aus dem Hirnstamm, einem rudimentären Kleinhirn und angedeuteten Großhirnhemisphären, weshalb sie, wie heutzutage Fische und Eidechsen, kaum mehr als ihre unmittelbaren sensorischen und motorischen Funktionen erfüllen konnten. Um den Anforderungen ihres Lebensraumes gerecht zu werden, mußten sie zum Überleben ihre sensorischen und motorischen Funktionen in eine die Nervenreize vereinigende und ausbalancierende Struktur integrieren; nach diesem Prinzip funktioniert auch heute noch der menschliche Hirnstamm (7).

Einige Tiere besitzen Sinnesorgane, die dem Menschen nicht zur Verfügung stehen. So misst beispielsweise das an der Körperoberfläche von Fischen und manchen Amphibien liegende Seitenlinienorgan Wasserströmungen und dient darüber hinaus der Orientierung sowie der Lokalisation von Beutetieren. Die Elektrorezeptoren, mit denen verschiedene Fische wie auch das australische Schnabeltier ausgestattet sind, versetzen sie in die Lage, die durch Beutetiere oder durch Gegenstände verursachten Störungen elektrischer Felder auszuwerten oder die von Beutetieren verursachten Muskelaktionspotentiale zu entdecken; auch zur Kommunikation können solche elektrischen Felder verwendet werden. Einige Schlangenarten verfügen über ein Grubenorgan, das es ihnen ermöglicht, die Wärmestrahlung ihrer Beute wahrzunehmen. Als weiteres Beispiel für eine sehr spezifische Sinnestätigkeit wären Tauben und viele Zugvögel anzuführen; sie können sich nach dem Magnetfeld der Erde orientieren.

Oft sind auch bestimmte Sinne bei Tieren leistungsfähiger als beim Menschen; zu nennen wäre hier etwa der Geruchssinn beim Hund. Das Gehör bei Fledermäusen vermag Ultraschall zu verarbeiten, manche Vögel vernehmen Infraschall. Diese Beispiele zeigen, wie sehr die Sinnessysteme der Arten sich den Erfordernissen und Möglichkeiten ihres jeweiligen Lebensraumes evolutionär angepasst haben.

Der Mensch hat die Möglichkeit, ihm fehlende Sinneskanäle durch Meßgeräte zu ersetzen, andererseits darf nicht vergessen werden, dass die durch Sinneskanäle erzeugten Empfindungen qualitativ etwas anderes sind als die auslösenden Reize. Elektromagnetische Wellen empfindet der Mensch, wenn überhaupt, als Licht unterschiedlicher Farben; die Wellenlängen selbst bleiben ihm verborgen. Die Schwingungen mancher Oberflächen empfindet er als Töne, manche chemischen Verbindungen als Gerüche. Die Empfindungen sind also Konstrukte des Gehirns, auch wenn regelhafte Beziehungen zu den physikalischen Ursachen bestehen (55).

In Säugetieren sind Nervenfasern maximal 0,015 mm dick, weshalb elektrophysiologische Versuche an ihnen bis vor kurzem äußerst schwierig waren. Der Tintenfisch hingegen besitzt ein Riesenaxon mit dem 60fach größeren Durchmesser von etwa 1mm. Diese Modellnervenfaser erlaubte es schon sehr früh, die der Nervenregung zugrunde liegenden Vorgänge mit vergleichsweise einfachen Methoden zu klären. Auch der Mechanismus einfacher Lernvorgänge wie Habituation und Sensibilisierung bei polysynaptischen Reflexen hat sich am Modellganglion einer Meeresschnecke mit seinen großen Nervenzellkörpern und seinen wenigen, wohlbekannteren Schaltverbindungen viel einfacher klären lassen, als anhand des wesentlich komplizierteren Zentralnervensystems eines Säugetiers, das über Milliarden von Nervenzellen verfügt.

Die Qualle als ein wirbelloses Wesen besitzt zwar Nervenzellen, aber kein zentrales Nervensystem und verfügt daher über nur geringe Möglichkeiten, ihre Empfindungen zusammenzufügen, also zu integrieren. Ihre Nervenzellen sind zu einem Nervennetz zusammengesetzt und über den ganzen Körper ausgebreitet. Wird die Qualle an einer Stelle berührt, so läuft der Empfindungsreiz durch das gesamte Netzwerk, was das Tier veranlasst, sich zusammenzuziehen (7,45).

## **2.2 Reizleitung und -verarbeitung**

Das menschliche Gehirn wiegt etwa 3 Pfund und setzt sich aus ungefähr 100 Milliarden Nervenzellen zusammen - wobei diese Zahl vermutlich um den Faktor 10 nach oben oder unten ungenau ist -, die von Gliazellen gestützt und ernährt werden. Eine Nervenzelle besteht aus einem Zellkörper von 5-100 µm Durchmesser, von dem das Axon, dessen Länge von 0,1 mm bis zu 1m reicht, und kürzere Fortsätze, die Dendriten, ausgehen. Diese empfangen Signale von anderen Nervenzellen, der Zellkörper verarbeitet sie und sendet seinerseits Signale aus, die vom Axon zu anderen Zellen geleitet werden.

Das Nervensignal ist elektrischer Natur und pflanzt sich in dieser Form längs der Nervenfasern fort, an deren Ende es dann durch Neurotransmitter auf chemischem Wege an den Empfänger, meist einen Dendriten oder Nervenzellkörper, aber auch Muskelzellen und hormonproduzierende Zellen weitergeleitet wird. Jede einzelne Nervenzelle erhält Informationen von Hunderten bis Tausenden anderer Zellen und überträgt sie ihrerseits auf weitere Nervenzellen, deren Anzahl etwa in der gleichen Größenordnung liegt. Auf diese Weise wird es ermöglicht, dass sich ein Impuls in einer einzigen Sekunde in bis zu einer Million Neuronen in unterschiedlichen Teilen des Gehirns ausbreitet und es kann ein einzelner Klang oder eine Berührung des Fingers Aufmerksamkeit, Vorstellung, Gedanken, Gefühle, Lernfähigkeit und Verhalten, alles im gleichen Moment, veranlassen.

Einige Impulse können auch zurückfließen und Rückwirkungen beim ersten Neuron auslösen. Dieser Strom elektrischer Signale durch das komplizierte Netzwerk stellt die Voraussetzung für unsere Lernfähigkeit und unser Verhalten dar (7,45,79,85,88).

## **Das Aktionspotential**

Trotz ihrer Unterschiede in Größe und Gestalt verwenden alle Nervenzellen die gleichen Formen elektrischer Signale, nämlich elektrotonische Potentiale und Aktionspotentiale. Die gesamte Nervenzelle ist an ihrer Oberfläche polarisiert; die elektrische Spannung zwischen Innen- und Außenseite der Zelle beträgt in Ruhe etwa -70 mV. Verantwortlich hierfür sind die Eigenschaften der Membran, Natrium- Ionen aus der Zelle hinaus und dafür Kalium- Ionen hinein zu transportieren, so dass diese Ionen innerhalb und außerhalb der Zelle in unterschiedlicher Konzentration vorliegen. Zudem ist die Membran für Natrium- und Kalium- Ionen nicht gleich gut durchlässig.

Die elektrischen Signale der Nervenzelle kommen durch Änderungen ihres Membranpotentials zustande. Sobald sich dieses an irgendeiner Stelle der Zelle oder ihrer Fortsätze ändert, breitet sich diese Störung in alle Richtungen aus, wird dabei jedoch ein gewisser Schwellenwert, der bei etwa -50mV liegt, nicht überschritten, so schwächt sie sich bei der Ausbreitung schnell wieder ab und ist schon wenige Millimeter vom Ort ihrer Entstehung entfernt nicht mehr nachweisbar. Es handelt sich dabei um ein elektrotonisches Potential, das vorwiegend der Informationsübertragung über kurze Strecken dient. Überschreitet die Änderung des Membranpotentials dagegen den Schwellenwert, so entsteht ein Aktionspotential, das sich über größere Entfernungen fortpflanzt. An der Membran kommt es zum Einstrom von Natrium- Ionen, wodurch eine örtlich begrenzte Umkehr des Membranpotentials bis auf +50 mV entsteht; das ursprüngliche Ruhepotential stellt sich durch den darauffolgenden Ausstrom von Kalium- Ionen wieder ein.

Dieser Prozeß, der sich innerhalb 1/1000 Sekunde abspielt, setzt sofort im Anschluß im benachbarten Abschnitt der Membran ein, wodurch sich das Aktionspotential über die gesamte Länge der Nervenfasern ohne Abschwächung fortsetzt. Ein intensiverer Reiz führt dabei nicht zu einer entsprechenden Erhöhung der Intensität der Aktionspotentiale, sondern vielmehr zu einer Veränderung der Impulsfolge pro Sekunde (9,45).

## **Die Synapse**

In der Synapse endet eine Nervenfasern an der nächsten Nervenzelle. Erreicht ein Nervensignal eine Synapse, so verändert dies die Wahrscheinlichkeit, dass die nächste Nervenzelle ihrerseits ein Signal aussendet. An der präsynaptischen Membran wird ein Neurotransmitter

freigesetzt, der den synaptischen Spalt durchquert und die postsynaptische Membran beeinflusst. Bindet sich der Transmitter an Membranrezeptoren der nachgeschalteten Nerven-, Muskel-, oder Drüsenzelle, so bewirkt dies dort eine Änderung des Membranpotentials. Handelt es sich um eine erregende Synapse, was von der Natur des Transmitters und der Chemie der postsynaptischen Membran abhängt, so setzt der Transmitter das Membranpotential der postsynaptischen Membran herab und die postsynaptische Zelle kann leichter ein Signal erzeugen. Wirkt die Synapse dagegen hemmend, so stabilisiert der Transmitter das Membranpotential der postsynaptischen Zelle, wodurch die Wirkung anderer erregender Synapsen auf die gleiche Zelle abgeschwächt und die Bildung neuer Signale reduziert oder unterbunden wird. In jeder Situation sind einige Synapsen aktiv, andere in Ruhe. Das Zusammenwirken dieser Einflüsse bestimmt, ob eine Nervenzelle Signale aussendet oder nicht, und falls ja, mit welcher Frequenz. Die genaue Anzahl der Synapsen im Gehirn ist unbekannt, wird aber auf mindestens  $10^{14}$ , das sind 100 Billionen, geschätzt (9,45,88).

### **Neurotransmitter**

Die zahlreichen verschiedenen Transmitter haben eine zentrale Bedeutung für den Körper; sie sind an der Steuerung von Befinden und Verhalten maßgeblich beteiligt. Der am meisten verbreitete Neurotransmitter ist das Acetylcholin, der Transmitter aller das zentrale Nervensystem (ZNS) verlassender Nervenfasern. Ebenso wie dieses wirkt auch das Dopamin erregend auf die Synapse und steuert überdies emotionale und geistige Reaktionen sowie Bewegungsentwürfe. Auch Noradrenalin und Adrenalin, wie Acetylcholin wichtige Transmitter des zentralen und peripheren vegetativen Nervensystems, wirken, wie auch Glutamat und Glycin, erregend, letztere allerdings nur zentral. Als wichtige hemmende Transmittersubstanz wäre Gamma-Aminobuttersäure (GABA) anzuführen (9,88).

### **Rezeptoren**

Nicht weniger wichtig für das Zustandekommen von sinnlicher Wahrnehmung sind die Rezeptoren, Nervenzellen, die sich darauf spezialisiert haben, von außen auf den Organismus einwirkende Reize in elektrische Signale zu übersetzen und damit für das Gehirn verständlich

zu machen. Rezeptoren können auf Licht, chemische Reize, was bei Geschmack und Geruch der Fall ist, oder auf mechanische Deformation, was auf Tastsinn und Gehör zutrifft, reagieren. Sie stehen mit nachgeschalteten Nervenzellen in Verbindung, denen wiederum Nervenzellen folgen, und so fort. Bei jeder Verbindung verzweigen sich die Nervenfasern und versorgen mehrere nachgeschaltete Nervenzellen, die ihrerseits Informationen von mehreren Nervenzellen erhalten (9,45,88).

### **Afferente Nervenleitung**

Die Nervenleitung zwischen dem Sinnesorgan und den sensorischen Zentren des ZNS bezeichnet man als afferente Prozesse. Auf ihrem Weg zum ZNS werden die afferenten Impulse auf vielfache Art und Weise miteinander verschaltet, wobei das räumliche und zeitliche Erregungsmuster des Sinnesorgans vereinfacht, strukturiert und kontrastiert wird. Eine Folge von Impulsen gibt den Erregungszustand des Sinnesorgans wieder (9,88).

Dabei ist der Prozeß der Signalumwandlung durch das Sinnesorgan für Klix nur die erste Stufe einer „Kaskade von Übertragungs- und Umwandlungsprozessen der Erregungsfortpflanzung und -verknüpfung im Zentralnervensystem“ (57, S 200).

Dieser Vorgang dient zugleich der Informationsreduktion, denn aus der Vielzahl von Einzelerregungen werden nur die wesentlichen hervorgehoben, die unwesentlichen dagegen unterdrückt. Die Einteilung in „wesentlich“ und „unwesentlich“ ist nach Klix, der diesen Prozeß als „Invariantenbildung“ bezeichnet, Ergebnis der phylogenetischen Entwicklung der Menschheit und der gesellschaftlichen Aneignung der Natur (57, S 238).

Schließlich erreichen die Erregungen das „sensorische Projektionsfeld“ im Kortex, wo die am höchsten organisierten Formen von Bewegungen der organischen Materie stattfinden; hier ablaufende Prozesse sind grundsätzlich bewußtseinsfähig (34).

Zusammenfassend läßt sich sagen, dass die Reizleitung und -verarbeitung aus 4 Schritten besteht:

- Im ersten Schritt wird der Reiz durch den reizleitenden Apparat an die Rezeptoren herangebracht und dabei häufig transformiert. Dennoch behält er seine ursprüngliche physikalische Dimension bei.

- Im zweiten Schritt erfolgt die adäquate Reizung der Rezeptoren. Infolge des Transduktionsvorgangs entstehen Rezeptorpotentiale, die den Reiz zwar in analoger Form abbilden, aber nicht mehr in der physikalischen Dimension des Reizes. Der Transduktionsvorgang verändert also den externen Reiz zu einem internen Signal, das nicht in analoger Weise an das Zentralnervensystem weitergegeben werden kann.
- Im dritten Schritt wird das beim Transduktionsprozeß entstandene Signal in eine Folge von Aktionspotentialen kodiert. Über afferente Nervenbahnen gelangt die informationstragende Folge von Aktionspotentialen dann ans Gehirn, wo sie mit Hilfe synaptischer Prozesse evaluiert und weiter verarbeitet wird.
- Im vierten Schritt schließlich wird in den sensorischen Zentren des Gehirns die einlaufende Information durch neuronale Netzwerke kritisch verarbeitet. Dabei kommt es in erster Linie auf die Extraktion wichtiger Reizeigenschaften aus dem Muster der Aktionspotentiale an. Eine grundlegende Eigenschaft dieser Netzwerke ist die Kontrastverschärfung mit Hilfe der lateralen Inhibition, die nicht nur die Reizmaxima heraushebt, sondern auch ein hemmendes Umfeld zur Folge hat. Diese hemmenden Umfeldler können auch subjektiv wahrgenommen werden, z.B. an Hell- Dunkel-Grenzen (9,15,34,46,88).

### **Efferente Nervenleitung**

Wichtig ist es, festzuhalten, dass die Schritte 1-3 durch Einflüsse seitens des ZNS modifiziert werden können. Rezeptoren sind häufig efferent innerviert, weshalb ihre Empfindlichkeit modifiziert werden kann. Erst recht sind praktisch alle neuronalen Strukturen des Zentralnervensystems zentrifugal über zumeist hemmende Bahnen beeinflusst, die der Steuerung des Aufmerksamkeitsverhaltens dienen und unter Umständen bestimmte Sinneskanäle weitgehend abschalten können. Schließlich tun Adaptationsvorgänge ein Übriges, um neuronale Antworten auf definierte physikalische Reize zu verändern. Dabei versteht man in der Physiologie unter Adaptation im Allgemeinen die Anpassung der Rezeptoren an die vorhandene Reizstärke. Einen Vorgang mit ähnlichem Endergebnis, der aber im Zentralnervensystem über neuronale Rückkopplungsschleifen zustande kommt, nennt man Habituation (9,55,88).

Die Fähigkeit der Rezeptoren der Sinnesorgane charakterisiert Klix wie folgt: „Die universelle Eigenschaft aller Rezeptor- Systeme besteht ... darin, dass sie auf Veränderungen

der physikalischen Energie eines Reizes mit einer systemeigenen, bio- chemisch oder bio- elektrisch faßbaren Zustandsänderung selektiv ansprechen“ (57, S 203).

Es findet also eine Umwandlung der Form der materiellen Bewegung statt, wie es auch beim Übergang von der Erregung der Rezeptoren des Sinnesorgans zu der Weiterleitung durch die Nervenfasern der Fall ist. Am empfindlichsten reagieren die Rezeptoren gewöhnlich auf den Beginn oder das Ende eines Reizes, da Informationen über Veränderungen am bedeutendsten sind. Schließlich erreicht die Information die motorischen Nervenzellen, die sie an Muskel- oder Drüsenzellen oder andere Erfolgsorgane weiterleiten.

Durch die nervöse Verarbeitung des Organismus werden die Objekte der materiellen Welt im Bewußtsein abgebildet, zugleich aber ist der Prozeß der Reiz- und Erregungsverarbeitung durch das Bewußtsein bedingt, durch welches die motorischen Zentren der Großhirnrinde gesteuert werden. Dies geschieht über die efferenten Prozesse, die vom ZNS zu den Erfolgsorganen verlaufen (9,55,57,88).

## **Motorik**

Die zweckmäßige Durchführung motorischer Handlungen erfordert auch sensorische Informationen über die momentane motorische Situation. Das einwandfreie Funktionieren der motorischen Systeme ist unter anderem von Informationen über die Vorgänge in der Peripherie abhängig. Hierfür sind somatosensorische Meldungen verantwortlich, die Körperhaltung und Bewegung größtenteils selbst hervorrufen.

Die enge Verknüpfung von motorischen Befehlen und sensorischen Meldungen findet ihren Ausdruck in der zusammenfassenden Bezeichnung der Somatosensorik. So geht beispielsweise ein Ausfall der Tiefensensibilität normalerweise auch mit motorischen Koordinationsstörungen einher (7,88).

## **2.3 Klassifizierung der Sinnesorgane**

### **Einteilung der Sinnesorgane**

Aristoteles, der sich als erster der Klassifizierung der verschiedenen Sinnesorgane widmete, unterschied die klassischen fünf Sinne: Gesichtssinn, Gehör, Geruch, Geschmack und

Tastsinn. Bald jedoch stellte sich heraus, dass diese fünf Sinne nicht ausreichen, um die verschiedenen Sinnesorgane und -gebiete zu beschreiben. Man unterschied daher eine Reihe von weiteren Sinnesorganen, denen allerdings keine eigene Erkenntnistätigkeit, Sehen etwa, sowie keine Wahrnehmungsaktivität des Körpers zugeordnet werden konnte. Diese zusätzlichen Sinnesorgane werden, da sie Meßgrößen innerhalb des Körpers registrieren, Enterozeptoren genannt. Sie messen etwa Blutdruck, CO<sub>2</sub>-Gehalt des Blutes oder des Liquors, den osmotischen Druck von Körperflüssigkeiten und vieles mehr.

Geht man davon aus, dass ein eigenes Sinnesgebiet dann vorliegt, wenn sich spezifische Sinnesorgane bzw. Rezeptoren nachweisen lassen, so ergeben sich des weiteren der Druck- und Berührungssinn, der Temperatursinn, der Schmerzsinne, die Organempfindung, der Stellungssinn, der Spannungs- und Kraftsinn, der Lage- und Bewegungssinn, sowie der Drehbewegungssinn.

Eine der ältesten Einteilungen der Sinnesorgane nahm der Physiologe Sherrington vor, wobei er sich an der Lage- und Wirkungsrichtung der Rezeptoren orientierte. Er unterschied Interozeptoren, die dem Organempfinden dienen, Propriozeptoren, die für Stellungs-, Spannungs-, Lage-, Bewegungs- und Drehbewegungssinn zuständig sind, sowie Exterozeptoren, die sich an der Hautoberfläche befinden und wiederum in Kontaktrezeptoren für Tast-, Geschmacks-, Druck-, Berührungs-, Temperatur- und Schmerzsinne und Distanzrezeptoren für Gesichtssinn, Gehör- und Geruchssinn unterteilt werden. Exterozeptoren verarbeiten Reize aus der Umwelt; daher gehören ihnen die klassischen fünf Sinne an. Propriozeptoren werden auch als kinästhetische Sinne oder Körpersinne bezeichnet. Häufig bleibt das Wirken von Rezeptorsystemen, besonders das der Proprio- und Enterozeptoren unbemerkt, da es dem Bewußtsein nicht zugänglich ist.

Die letzte Unterteilung erfolgt in Nahsinne und Fernsinne sowie angesichts der physiologischen Komplexität bzw. des Entwicklungsstandes in höhere Sinne, das sind Gesichtssinn, Gehör-, Tast-, Lage-, Bewegungs- und Drehbewegungssinn, und alle anderen Sinne, die niederen Sinne (55,87).

Holzkaampfs grobe Systematisierung der Sinnesorgane erfolgt anhand der für die Reizung der Rezeptoren spezifischen Energieform. Typisch für Gehör, Tast-, Druck-, Berührungs-, Schmerz-, Stellungs-, Spannungs-, Lage-, Bewegungs- und Drehbewegungssinn und Organempfindung ist demnach mechanische Energie, für Geruchssinn, Geschmackssinn und Organempfindung chemische Energie, für den Temperatursinn thermische Energie, sowie für den Gesichtssinn elektromagnetische Energie (44).

## **Sinnesreize**

Von den einzelnen Sinnesorganen werden jeweils nur solche Empfindungen und Wahrnehmungen vermittelt und abgebildet, die für Organisation und Aufbau des Sinnesorgans spezifisch sind; verschiedene Reizungen des Sinnesorgans erzeugen also immer die gleiche Empfindung.

Als adäquat werden Reize bezeichnet, die der Organisationsstruktur, dem Aufbau und der spezifischen Empfindungsqualität des Sinnesorgans angepaßt sind; allerdings erzeugen auch nicht- adäquate Reizeinwirkungen an manchen Sinnesorganen die spezifischen Empfindungen, wenn auch in wenig strukturierter Form. Die spezifische Reaktionsweise eines Sinnesorgans wird als Modalität bezeichnet (50,87).

Im Folgenden soll näher auf die einzelnen Sinnesgebiete eingegangen werden, wobei natürlich berücksichtigt werden muß, wie eng diese zusammenwirken und sich dabei gegenseitig beeinflussen, da die Sinneskanäle einschließlich ihrer Motorik in Bezug auf einzelne Aufgaben sehr gut aufeinander abgestimmt sind.

### **2.4 Der Gesichtssinn**

*„Aber Lichtempfindung ist immer noch kein Sehen.*

*Zum Sehen wird die Lichtempfindung erst, insofern wir durch sie*

*Zur Kenntnis der Gegenstände der Außenwelt gelangen;*

*Das Sehen besteht also erst im Verständnis der Lichtempfindung.“*

Hermann von Helmholtz: „Über das Sehen des Menschen“, Vortrag, gehalten am 27. Februar 1855 in Königsberg (49, S22)

Auf den Netzhäuten des rechten und linken Auges entstehen unterschiedliche perspektivische Ansichten, die das Gehirn zu einem räumlichen Gesamteindruck verbindet. Dieses Prinzip der

stereoskopischen Raumwahrnehmung hat der Engländer Wheatstone entdeckt und an seinem Beispiel hat der Physiker Hermann von Helmholtz in seinem Vortrag zu Ehren Kants den aktiven interpretierenden Charakter des Sehvorgangs veranschaulicht (106,127).

### **Visuelle Information**

Da dem Sehen wohl die zentralste Rolle beim Prozeß der Wahrnehmung zukommt, soll speziell auf dieses Sinnesgebiet im Anschluß näher eingegangen werden. Selbstverständlich steht die visuelle Information, beispielsweise über Fortbewegung, nicht isoliert für sich allein da. Sie tritt vielmehr mit Signalen in Wechselwirkung, die von anderen Sinnesorganen kommen und Körperbewegungen melden, zum Beispiel von Sinnesorganen in den Gelenken, den Muskeln und dem Innenohr. Doch reicht die von dort kommende Information ganz offensichtlich nicht aus, um das Bewußtsein von Fortbewegung hervorzurufen. Wenn die visuelle Information über eine Fortbewegung und die von den anderen Sinneskanälen kommende räumliche Information im Widerspruch stehen, gewinnt die visuelle Information die Oberhand. Der optische Fluß auf der Netzhaut hat also Priorität vor allen anderen sensorischen Informationen (7,50,87).

Im Folgenden sollen die Physiologie des Auges und des Sehens, sowie die verschiedenen Stationen der Sehbahn betrachtet werden.

#### **2.4.1 Physiologie des Auges**

Die Augen nehmen, da sie sich durch die größte Reichweite und Adaptationsfähigkeit auszeichnen, eine Sonderstellung unter allen Sinnesorganen ein; aufgrund eines eigenen Bewegungsapparates sind sie selbstbeweglich und zielgerichtet. Adäquater Reiz für die Photorezeptoren im Auge sind elektromagnetische Strahlen mit Wellenlängen zwischen 400 und 750 nm. Durch die zweidimensionale Abbildung auf der Netzhaut, die entwicklungsgeschichtlich einen Teil des Zentralnervensystems darstellt, wird eine Parallelverarbeitung im nachgeschalteten Nervennetzwerk ermöglicht.

Funktionell kann man das Auge aufteilen in den physikalisch- optischen Teil, also den dioptrischen Apparat, und die Rezeptorfläche der Netzhaut, in der die Umsetzung des optischen Reizes in Erregung neuronaler Elemente erfolgt, was als Transduktion bezeichnet wird. Das Licht tritt zuerst durch die Kornea ein und erreicht dann über vordere Augenkammer, Linse und Glaskörper die Netzhaut, woraufhin der dioptrische Apparat im

Auge ein verkleinertes, umgekehrtes Bild entwirft. Die scharfe Abbildung auf der Netzhaut stellt dabei hohe Anforderungen an eine genaue Abstimmung zwischen Brechkraft der optischen Medien und Abmessungen des Auges, da bereits eine Abweichung von 0,1mm einen Fehler darstellt, der durch korrigierende Linsen in Form einer Brille ausgeglichen werden muß (9,23,87).

## **Die Linse**

Die Akkomodation, also die Fokussierung von Gegenständen in der Bildebene, erfolgt durch Änderung der Linsenbrechkraft. Aufgrund ihrer Eigenelastizität strebt die Linse eine stärkere Oberflächenkrümmung an, der die Zugkraft der Zonulafasern jedoch entgegenwirkt. Reguliert wird der Faserzug durch den hauptsächlich parasymphatisch innervierten Ziliarmuskel, der aber zusätzlich durch sympathische Innervation beeinflusst wird. Kontraktion des Ziliarmuskels führt zur Nahakkomodation, Erschlaffung zur Fernakkomodation. Im Ruhezustand ohne Akkomodationsreiz, etwa in völliger Dunkelheit, ist der Ziliarmuskel leicht kontrahiert und das Auge eines Normalsichtigen ist auf eine Entfernung von etwa 1m scharf eingestellt. Bei der Fernakkomodation wird der Ziliarmuskel völlig entspannt, dabei übertragen die Zonulafasern die elastischen Kräfte der Sklera und der Chorioidea, die durch die Kammerwasser- und Glaskörperfüllung des Auges aufrechterhalten werden, auf den Linsenrand und flachen die Linse ab.

Bei maximaler Fernakkomodation ist ein Gegenstand, der sich im Fernpunkt befindet, scharf abgebildet. Bei der Nahakkomodation kontrahiert sich der Ziliarmuskel und durch die schließmuskelartige Verkleinerung des Ziliarmuskelringes wird der Zug der Zonulafasern am Linsenrand verringert. Die Eigenelastizität der Linse führt zu einer stärkeren Krümmung besonders der Vorderfläche der Linse, verbunden mit einer Brechwerterhöhung. Bei maximaler Nahakkomodation wird ein Gegenstand im Nahpunkt scharf gesehen (9,23,87).

## **Iris und Pupille**

Die Iris stellt eine Blende mit der Pupille als Öffnung dar. Helligkeitszunahme führt zur Verkleinerung der Pupille im Sinne einer Konstanterhaltung der Leuchtdichte auf der Netzhaut. Dieser als Pupillenreflex bezeichnete Vorgang ermöglicht auch einen relativ

schnellen Schutz vor Blendung. Bei Beleuchtung nur eines Auges verengt sich nicht nur die beleuchtete Pupille, sondern in einer konsensuellen Lichtreaktion auch die Pupille des anderen Auges. Bei der Naheinstellungsreaktion verringert sich die Pupillenweite gekoppelt mit Nahakkommodation und Konvergenzreaktion. Dabei bedingt die geringere Pupillenweite eine Erhöhung der Tiefenschärfe.

Zuständig für den Pupillenreflex sind die Photorezeptoren der Netzhaut. Die Signale werden über Abzweigungen aus dem Tractus opticus zur prätektalen Region fortgeleitet, von wo aus eine parasympathische, pupillenkonstriktorische Bahn über den Edinger- Westphal- Kern und das Ganglion ciliare zum Musculus constrictor pupillae verläuft. Eine sympathische, dilatatorische Bahn geht vom Hypothalamus aus und zieht über das ziliospinale Zentrum des Rückenmarks und das Ganglion cervicale superius zum Musculus dilatator pupillae.

Maßgeblich für die neuronale Kontrolle über die Lichtreaktion der Pupille sind die parasympathischen Fasern, bei deren Erregung sich die Pupille verengt, was als Miosis bezeichnet wird, und bei deren Hemmung sie sich, unterstützt durch die sympathische Innervation, erweitert; dies wird Mydriasis genannt. Die Sympathikuserregung, die vom Wachheitsgrad sowie von psychischen und emotionalen Faktoren abhängt, gibt dabei zugleich die maximale Pupillenweite vor, die bei Hemmung des Parasympathikus erreicht werden kann.

Eine wichtige Rolle spielt die Pupillenreaktion im klinischen Alltag für die objektive Prüfung der afferenten Leitung im ersten Abschnitt der Sehbahn vom Auge bis zum Zwischenhirn und für die Beurteilung von Narkosestadien oder der Tiefe einer Bewußtlosigkeit (9,23).

### **Der Augennendruck**

Im Bereich der hinteren Augenkammer, genauer in den Epithelzellen des Ziliarkörpers, wird das Kammerwasser gebildet, das durch die Pupille in die vordere Augenkammer übertritt, wo es im Kammerwinkel durch das Trabekelwerk und den Schlemm- Kanal in den intra- und episkleralen Venenplexus abfließt. Halten sich Produktion und Abfluß die Waage, so entsteht ein konstanter Augennendruck, der physiologisch zwischen 10 und 20 mm Hg beträgt (23).

### **Die Tränenflüssigkeit**

Sezerniert wird die Tränenflüssigkeit von den Tränendrüsen, durch deren Ausführungsgänge sie austritt; als dünner Flüssigkeitsfilm schützt sie die Kornea vor dem Austrocknen. Fremdkörper zwischen Augenlidern und Kornea regen über Rezeptoren des Nervus trigeminus die Tränensekretion reflektorisch an, was zum Ausspülen des Fremdkörpers beiträgt. Die zentralen Neurone dieses Reflexes liegen im pontinen Bereich des Hirnstamms, von wo aus auch die emotionale Auslösung des Tränenflusses über Verbindungen mit dem limbischen System erfolgt. Der pontine Hirnstamm innerviert das Ganglion pterygopalatinum, dessen parasympathische Fasern die Tränensekretion an den Tränendrüsen auslösen (23).

## **Die Retina**

Die Netzhaut oder Retina mit einer mittleren Dicke von etwa 200 µm besteht aus einem vielschichtigen neuronalen Netzwerk einschließlich Stütz- und Pigmentepithelzellen. Das Licht trifft die Netzhaut von innen an der den Rezeptoren abgewandten, an den Glaskörper anschließenden Seite.

Von außen nach innen lassen sich folgende Schichten unterscheiden: Pigmentepithelzellen, Photorezeptorzellen, Horizontalzellen, Bipolarzellen, amakrine Zellen und Ganglienzellen. Die Axone der Ganglienzellen bilden den Nervus opticus. Direkte synaptische Verbindungen bestehen von den Zapfen zu den Ganglienzellen, von denen aus die Signale über die Fasern des Nervus opticus zentralwärts geleitet werden. Die Stäbchen sind über stäbchenamakrine Zellen mit den Zapfenbipolarzellen verbunden. Anatomisch bilden die Kerne der Rezeptorzellen die äußere Körnerschicht, die Bipolar-, Horizontal- und amakrinen Zellen die innere Körnerschicht und die Ganglienzellen die nach ihnen benannte Ganglienzellschicht. Zwei laterale Interneuronsysteme ermöglichen eine Modulation und Weiterverarbeitung der Signale schon innerhalb der Netzhaut, die Horizontalzellen mit Synapsen im Bereich der äußeren plexiformen Schicht und die amakrinen Zellen mit Synapsen im Bereich der inneren plexiformen Schicht. Die Horizontalzellen bieten die Möglichkeit zur horizontalen Ausbreitung von Hemmung und zur Rückkopplung des Signalflusses auf die Photorezeptoren. Die amakrinen Zellen hingegen weisen einen besonders großen Typenreichtum auf und wirken in der Regel ebenfalls hemmend, die Gliazellen der Retina erstrecken sich durch alle retinalen Schichten.

Nasal auf der Netzhaut liegt der Bereich der Papilla nervi optici, wo der Sehnerv das Auge verläßt und die Arteria und Vena centralis retinae ein- und austreten. Die Papilla nervi optici

ist rezeptorfrei; hier befindet sich der blinde Fleck, der im Gesichtsfeld etwa 15 Grad temporal des Fixationspunktes auf dem horizontalen Meridian liegt; er hat einen Durchmesser von circa 5 Grad. Da fehlende Konturen und Farbflächen ergänzt werden, wird unsere Wahrnehmung dennoch nicht beeinträchtigt.

Temporal der Papille liegt die Fovea centralis inmitten eines gefäßfreien Bezirks mit stärkerer Pigmentierung, der Macula lutea. Die sichtbaren Netzhautarterien versorgen die inneren zwei Drittel der Netzhaut, die direkt unter den Gefäßen liegen. Das äußere Drittel der Netzhaut wird durch Diffusion aus dem Chorioidalkreislauf versorgt (23,97).

### **Photorezeptoren**

Auf der Retina befinden sich in jedem Auge etwa 110 Millionen Stäbchen und 6 Millionen Zapfen, die auf 1 Million Ganglienzellen und ebenso viele Fasern im Nervus opticus konvergieren. In den Stäbchenaußengliedern liegen, geldrollenförmig angeordnet, etwa 1000 Membranscheibchen; bei den Zapfen stellen die entsprechenden Strukturen Membraneinfaltungen im Außenglied dar. In der Scheibchenmembran findet man den Sehfärbstoff der Stäbchen, das Rhodopsin, in den Membraneinfaltungen der Zapfen die Zapfensehfärbstoffe, die aus Glykoproteinen bestehen. Die Zapfen sind für das Tagessehen verantwortlich und leisten eine Differenzierung der Lichtwellen nach ihrer Frequenz und ihrer Amplitude, d.h. sie ermöglichen eine Farb- und Helligkeitsunterscheidung; die Stäbchen sorgen für das Dämmerungs- und Nachtsehen und vermögen nur Helligkeits-, aber keine Farbunterscheidung zu leisten.

Im Bereich der Fovea centralis ist die Verteilung der Zapfen am dichtesten, während ihre Häufigkeit zu den Rändern hin abnimmt; Stäbchen hingegen findet man im Bereich der Fovea centralis keine, ihre Häufigkeit nimmt in Richtung der Peripherie hin zu und übertrifft jenseits von 30 Grad sogar die Anzahl der Zapfen pro Flächeneinheit. Die Sehschärfe ist also beim Dämmerungssehen in der Peripherie des Gesichtsfeldes gleichmäßig hoch, nimmt aber im zentralen Bereich stark ab. Daher kann der Mensch in der Dämmerung, wenn keine Farbwahrnehmung stattfindet, im Zentrum des Gesichtsfeldes keine Gegenstände differenzieren, sich aufgrund der über das übrige Gesichtsfeld gleichmäßig verteilten Sehschärfe aber orientieren; beim Tagessehen dagegen ist die Differenz zwischen der Sehschärfe im Bereich der Fovea centralis und der Peripherie so groß, dass die

verschwommene Abbildung im peripheren Bereich nur einen räumlich- zeitlichen Zusammenhang im Blickfeld herzustellen imstande ist.

Die eigentliche differenzierte Wahrnehmung findet im relativ kleinen Bereich der Netzhaut statt, der nur etwa zwei bis fünf Grad des Seh winkels umfaßt. Zapfen und Stäbchen setzen optische Reize in Nervensignale um, die über vier Zellarten in der Netzhaut schließlich die Ganglienzellen der Netzhaut erreichen. Beim Phototransduktionsprozeß an den Stäbchen werden Lichtquanten von der chromophoren Gruppe des Rhodopsins, des Sehfärbstoffs der Stäbchen, absorbiert; das Adsorptionsmaximum liegt bei etwa 500 nm.

Der anschließenden Konformationsänderung des Rhodopsins folgt eine Verminderung der Permeabilität der äußeren Stäbchenmembran für Natrium- und Calciumionen. So führt bei maximaler Reizung, im Gegensatz zu allen anderen Rezeptoren, die Erregung durch den adäquaten Reiz beim Photorezeptor zu einer Hyperpolarisation von -30 auf -70 mV, woraufhin vermindert Transmitter an den Synapsen der Photorezeptoren abgegeben wird. Ein Natrium- Calcium- Austauschcarrier in der Plasmamembran verringert daraufhin die Calciumkonzentration im Zytoplasma; es kommt wieder zur Öffnung der Natrium- Calcium- Kanäle, zur Depolarisation und zur Rückkehr zum Ruhestand der Photorezeptormembran.

Ähnliche Vorgänge spielen sich an den Membraneinfaltungen der Zapfenaußensegmente ab. Im Vergleich zu den Stäbchen antworten die Zapfen schneller, jedoch mit geringerer Empfindlichkeit. Die Signalverarbeitung in Rezeptoren und Bipolarzellen, sowie in Horizontalzellen und in amakrinen Zellen erfolgt über fein abgestufte Änderungen des Membranpotentials, synaptische Übertragung und postsynaptische Potentiale; erstmals treten Aktionspotentiale an den Ganglienzellen auf (23,46,47,87).

## **2.4.2 Die Sehbahn**

### **Chiasma opticum**

Durch die Papilla nervi optici verlassen die Nervenfasern der retinalen Ganglienzellen das Auge und ziehen gemeinsam zum Chiasma opticum, der Sehnervenkreuzung, wo die nasalen Fasern des Sehnervs kreuzen, die temporalen hingegen ungekreuzt zentralwärts ziehen. Aufgrund der Bildumkehr bei der optischen Abbildung repräsentieren die nasalen Fasern der Netzhaut die temporale und die temporalen Fasern die nasale Gesichtsfeldhälfte. Auf diese Weise entsteht die gekreuzte Projektion der beiden Gesichtsfeldhälften in die beiden

Hemisphären des Gehirns; eine Ausnahme dabei bildet allein der innerste Bereich des zentralen Gesichtsfeldes, der beiderseitig repräsentiert wird.

### **Corpus geniculatum laterale**

Nach Verlassen des Chiasma opticum verlaufen die gekreuzten Fasern des kontralateralen und die ungekreuzten Fasern des ipsilateralen Auges gemeinsam im Tractus opticus und geben Abzweigungen zur prätektalen Region und zu den Colliculi superiores ab, bevor sie das Corpus geniculatum laterale erreichen. Hier im Thalamus erfolgt eine monosynaptische Übertragung von den Sehnervenfasern auf die genikulären Schaltzellen, deren Axone schließlich ohne weitere Verschaltung als Radiatio optica in die Eingangsschichten der primären Sehrinde in der Area 17 ziehen.

Benachbarte Orte der Netzhaut werden in Corpus geniculatum laterale und Sehrinde auch benachbart abgebildet, was retinotopie Abbildung genannt wird. Bedingt durch ihre höhere Ganglienzellichte nehmen dort zentrale Netzhautbereiche eine überproportionale Projektionsfläche ein, während die Peripherie in der zentralen Sehbahn kleiner repräsentiert ist, wobei die Fovea centralis mit einem hohen Vergrößerungsfaktor abgebildet wird.

### **Retinotopie Abbildung**

Im Tractus opticus liegt das untere Gesichtsfeld medial, das obere lateral, das zentrale Gesichtsfeld dorsal und die Peripherie ventral. In der Radiatio optica erfolgt eine Drehung, so dass nun die untere Gesichtsfeldhälfte dorsal und die obere ventral abgebildet wird und das zentrale Gesichtsfeld nach lateral orientiert ist. Auf diese Weise strahlt die Radiatio optica ohne weitere Veränderung der Topographie in die primäre Sehrinde in der Area 17 ein, wo die Fovea centralis auf dem hinteren Okzipitalpol abgebildet ist, mit der unteren Gesichtsfeldhälfte oberhalb der Fissura calcarina des Sulcus calcarinus und der oberen Gesichtsfeldhälfte darunter. Die Peripherie des Gesichtsfeldes ist rostralwärts auf der medialen Seite der Hemisphären repräsentiert.

Das dorsale Corpus geniculatum laterale bildet die beiderseitig angelegte thalamische Schaltstation der Sehbahn zwischen Retina und visuellem Kortex. Hier entsteht durch retinotopie Abbildung etwas wie eine innere Netzhaut, in der die Signale auf dem Weg zur Hirnrinde weiterverarbeitet und moduliert werden können. In sechs im Wechsel von beiden Augen innervierten Schichten ist das kontralaterale Gesichtsfeld retinotopisch in dorso-ventralen Säulen repräsentiert. Die großen Zellen in den magnozellulären ventralen Schichten 1 und 2 haben größere rezeptive Felder und höhere Leitungsgeschwindigkeit und sind besonders zur Bewegungsanalyse geeignet; ihre Eingänge stammen von den  $\alpha$ -Ganglienzellen aus der Retina. Demgegenüber haben die Zellen in den parvozellulären, dorsalen Schichten 3-6, die ihren retinalen Eingang von den  $\beta$ -Ganglienzellen der Netzhaut erhalten und eher zur Feinanalyse von Form und Farbe beitragen können, kleinere, farbempfindliche rezeptive Felder, geringere Leitungsgeschwindigkeit und stärkeren Zentrum-Umkreis-Antagonismus.

### **Kontrastverschärfung**

Durch Einflüsse nicht- visueller Regionen des Hirnstamms, interne Hemmnetzwerke sowie Rückprojektionen vom Kortex werden im Corpus geniculatum laterale vielfältige Interaktionen erst möglich. Die nichtretinalen modulatorischen Eingänge des Corpus geniculatum laterale etwa dienen einer verhaltensadäquaten Anpassung der visuellen Signalübertragung. Die Hemmung zwischen den verschiedenen Schichten kann grundlegende Funktionen des Binokularsehens vorbereiten, und die kortikofugalen Eingänge ermöglichen es, durch eine topographisch spezifische Rückkopplung die Übertragung in bestimmten Gesichtsfeldregionen entweder besonders hervorzuheben oder aber zu unterdrücken. Laterale Hemmung durch lokale Interneurone führt im Corpus geniculatum laterale zu weiterer Kontrastverschärfung.

### **Colliculi superiores und inferiores**

Nach der Sehnervenkreuzung zweigen einige Ganglienzellaxone, die zum Teil von  $\alpha$ - Zellen und von der kleinen, heterogenen Gruppe von Netzhautzellen stammen, die bei Primaten nicht zum Corpus geniculatum laterale projizieren, zu den Colliculi superiores und in die prätektale

Region im Mittelhirn ab. In den Colliculi superiores sind die rezeptiven Felder groß, reagieren bevorzugt auf bewegte Reize mit bestimmter Richtung und sind deshalb mehr zur Bewegungs- als zur Musteranalyse geeignet.

Colliculi superiores und inferiores bilden zusammen die Vierhügelplatte, die Lamina tecti, die den dorsalen Teil des Mesencephalons darstellt. Bei Fischen, Reptilien und Amphibien stellen die Colliculi superiores das wichtigste sensorische, insbesondere visuelle Integrationszentrum dar, aber auch bei Vögeln und Säugetieren spielt dieses Zentrum eine wichtige Rolle bei visuell und auditorisch ausgelösten Blick- und Kopfbewegungen und bei gerichteten Arm- und Handbewegungen und entsprechenden Aufmerksamkeitsleistungen. Die Colliculi inferiores sind dagegen ein wichtiges auditorisches Zentrum.

Auch in den Colliculi superiores liegt, genau wie im Corpus geniculatum laterale, eine retinotopie Abbildung der kontralateralen Gesichtsfeldhälften vor. Nicht nur visuelle, sondern auch somatosensorische und auditorische Eingänge mit entsprechender topographischer Zuordnung des Raumes werden hier in vertikalen Säulen durch die verschiedenen Schichten hindurch repräsentiert. Außerdem finden sich in den tiefen Schichten Zellen, die sich unmittelbar auf die Blickmotorik auswirken. Nervenzellen der Colliculi superiores adaptieren schnell auf gleichartige Reize, wohingegen das Auftreten neuartiger Reize starke Antworten auslöst. So werden in der Peripherie auftauchende Reize erkannt und können mittels einer Sakkade in den fovealen Bereich zentriert werden. Die Colliculi superiores lassen sich als eine Art visuelles Reflexzentrum, das auch durch Schallreize beeinflusst werden kann, beschreiben. Das visuelle Reflexzentrum für den Pupillenreflex stellt die prätektale Region rostral der superioren Colliculi dar (9,23,46,97,112).

## **Visueller Kortex**

Im Okzipitallappen des Gehirns, in der Area 17, befindet sich der primäre visuelle Kortex. In einer Dicke von etwa 3 mm liegen sechs Schichten, in denen Signale aufgenommen und nach der Verarbeitung an andere Rindengebiete oder subkortikale Strukturen weitergegeben werden. Haupteingangsschicht für die Axone aus dem Corpus geniculatum laterale ist die Schicht IV. Die Axone aus den magnozellularären Schichten des Corpus geniculatum laterale enden in Schicht IV b, die aus den parvozellularären Schichten dorsal und ventral davon in Schicht IV a und IV c; Axonkollateralen verlaufen auch zu Zellen in Schicht VI.

Die Neurone der Schichten II und III dienen der Weiterverarbeitung und projizieren in Area 18 und 19, während die Pyramidenzellen der Ausgangsschichten V und VI ihre Axone zurück zu subkortikalen Strukturen senden, die Zellen der Schicht V Ursprung der kortikalen Innervation der Colliculi superiores sind und die Pyramidenneurone der Schicht VI eine direkte Rückkopplung zum Corpus geniculatum laterale vermitteln; in Schicht I dagegen finden sich vorwiegend kortikokortikale Axone.

Im primären visuellen Kortex sind Zellen, die über einander ähnliche Eigenschaften verfügen, nach ganz bestimmten Regeln angeordnet; Okularität bedeutet dabei die bevorzugte Erregung der Zellen vom rechten oder vom linken Auge. Die vom linken und die vom rechten Auge dominierten Zellen liegen jeweils in etwa 0,5 mm breiten okulären Dominanzsäulen zusammen.

Intrakortikale, inhibitorische Schaltkreise sind an den kortikalen Spezifitäten maßgeblich beteiligt; sie enthalten den hemmenden Transmitter Gamma- Aminobuttersäure.

## **Endhemmung**

Zu optimalen Antworten auf eine bestimmte Reizlänge führt die sogenannte Endhemmung. Reize, die diese Länge überschreiten, werden aufgrund starker Hemmung nicht oder stark vermindert beantwortet. Die hyperkomplexen Zellen sind durch die Endhemmung charakterisiert.

## **Simple und complex cells**

Die einfachen Zellen im visuellen Kortex, auch „simple cells“ genannt, reagieren sehr empfindlich auf die exakte Lokalisation des Reizes in ihren kleinen rezeptiven Feldern, die aus räumlich getrennten, erregenden und hemmenden Subfeldern bestehen. Die komplexen Zellen oder „complex cells“ andererseits, deren größere rezeptive Felder globaler, ohne nachweisbare Subfelder, aufgebaut sind, weisen eine weitgehende Unabhängigkeit von der exakten Position der Reize im rezeptiven Feld auf, sind also ortsinvariant.

## **Orientierungsspezifität**

Ein weiteres Organisationsprinzip stellt die Orientierungsspezifität dar. Die Mehrzahl der kortikalen Zellen antwortet spezifisch auf Reize bestimmter Orientierung im Raum, was als Orientierungsspezifität bezeichnet wird. Viele Zellen bevorzugen dabei bewegte Reize, wobei oft auch noch die Richtung der Bewegung als Merkmal der Richtungsspezifität für die Auslösung einer Antwort entscheidend ist. Richtungsselektive Zellen antworten bei optimaler Reizorientierung nur bei Bewegungen in eine Richtung, nicht aber in die entgegengesetzte. Orientierungssäulen enthalten Zellen gleicher Orientierungsspezifität, die Antworten beispielsweise nur auf horizontale oder auf vertikale Reize liefern; sie befinden sich innerhalb der okulären Dominanzsäulen. Reizt man nur ein Auge mit einer bestimmten Orientierung, dann ist der Abstand der erregten Orientierungssäulen dem der okulären Dominanzsäulen gleich. Die gleiche Orientierung kehrt, ebenso wie die okuläre Dominanz, jeweils nach etwa einem Millimeter wieder.

## **Hyperkolumnen**

Dies beruht auf der Organisation des visuellen Kortex in sogenannten Hyperkolumnen. Eine Hyperkolumne stellt einen Teil des visuellen Kortex mit einer Oberfläche von rund 1x1 mm dar, der sich über sämtliche Schichten in die Tiefe erstreckt. Die Hyperkolumne ist ein kortikales Analysemodul, das sämtliche Orientierungsspezifitäten, ebenso wie Farb-, Richtungs- und andere Spezifitäten, und beide okulären Dominanzen für einen Ort im Gesichtsfeld enthält. Benachbarte Hyperkolumnen repräsentieren benachbarte Bereiche des Gesichtsfeldes, wobei durch die verschiedenen in den Hyperkolumnen vorhandenen Antwortspezifitäten die visuelle Welt zur Vorbereitung weiterer Analysen in verschiedene Teilaspekte zerlegt wird.

Die Frage, wo sich ein Objekt in der visuellen Welt befindet, wird hierbei parietal verarbeitet, die, worum es sich bei dem Objekt handelt, temporal (23,38,46).

## **Agnosien**

Die parallele Verarbeitung im Sehsystem wird besonders bei Patienten mit Agnosien deutlich, Funktionsausfällen, die selektiv einen Aspekt der Wahrnehmung, nicht aber andere betreffen.

Bei lokalisierten Schädigungen der Hirnrinde können Verluste des Farbsehens oder des Bewegungssehens beobachtet werden, bei denen Form- und Musterwahrnehmung ungestört erhalten sind. Die Selektivität des Ausfalls kann bis zur isolierten Unfähigkeit der Gesichtserkennung, der Prosopagnosie, die bei beidseitigen, mesial gelegenen okzipitotemporalen Läsionen auftritt, reichen.

Durch die genaue Kenntnis der Topographie der Sehbahn läßt sich bei vielen Gesichtsfeldausfällen der Ort der Schädigung voraussagen. So liegen monokulare Ausfälle immer vor der Sehnervenkreuzung auf der Netzhaut oder im Bereich des Nervus opticus, bitemporale oder seltene binasale Schäden im Chiasmabereich und homonyme, also im Gesichtsfeld gleichseitige Ausfälle, beruhen auf Ausfällen der Sehbahn hinter der Sehnervenkreuzung, das heißt im Tractus opticus, dem Corpus geniculatum laterale, der Sehstrahlung oder der Sehrinde (9,23,34,38,41).

### **2.4.3 Physiologie des Sehens**

#### **Visuelle Informationsverarbeitung**

Beim Anblick eines Gegenstandes vollziehen sich unbewußt mehrere Verarbeitungsschritte. Auf der ersten Wahrnehmungsstufe wird er in Merkmale zerlegt, dann erst werden diese zu einem geschlossenen Objekt zusammengesetzt. Der Prozeß der visuellen Informationsverarbeitung spaltet sich dabei in zwei Ebenen. Bestimmte Komponenten scheinen gleichzeitig, also für das gesamte Gesichtsfeld auf einmal und automatisch, ohne dass die Aufmerksamkeit auf irgendeinen einzelnen Teil des Gesichtsfeldes konzentriert ist, vollzogen zu werden, andere scheinen gerichtete Aufmerksamkeit zu erfordern und werden nacheinander durchgeführt. Demnach werden zunächst verschiedene Bereiche einer Szene nach Figuren und Hintergrund getrennt, damit anschließend unter Aufbieten von Aufmerksamkeit einzelne Gegenstände identifiziert werden können.

Beim ersten Schritt der visuellen Verarbeitung scheinen Merkmale aus Lichtmustern extrahiert zu werden, während auf späteren Stufen die Gegenstände samt ihrer Umgebung identifiziert werden. Demnach werden beim Sehen auf der untersten Stufe einige einfache Eigenschaften einer Szene in Form von Merkmalen wie Farbe, Orientierung, Größe und stereoskopischer Abstand kodiert, die möglicherweise die räumlichen Beziehungen der visuellen Welt bewahren, aber nachfolgenden Verarbeitungsstufen selbst keine räumliche

Information zur Verfügung stellen. Stattdessen wählt dann gerichtete Aufmerksamkeit die Merkmale aus, die an bestimmten Orten vorhanden sind, und fügt sie zusammen.

Auf späteren Stufen dient schließlich die zusammengefügte Information dazu, „Akten“ über Wahrnehmungsgegenstände anzulegen und auf den neuesten Stand zu bringen, die der Reihe nach mit Beschreibungen verglichen werden, die in einem Wiedererkennungsnetzwerk gespeichert sind, welches Merkmale, Verhalten, Namen und Bedeutung vertrauter Gegenstände vereinigt (38,91).

### **Augenbewegungen**

Um das Sehen zu ermöglichen, ist eine Reihe von Aktivitäten auf Verhaltens- und Bewußtseinsebene erforderlich. Voraussetzung für optimales Sehen sind präzise Augenbewegungen. Um Doppelbilder zu vermeiden, müssen überdies beide Augen mit hoher Präzision synchron bewegt werden. Durch Körperbewegungen und -drehungen wendet der Mensch sich einem bestimmten Ausschnitt der Umwelt zu; durch Drehbewegungen des Kopfes kann er bei konstanter Körperhaltung über 270 Grad dieses Umweltausschnittes sukzessive mit den Augen abtasten. In der Regel werden jedoch Körper- und Kopfbewegungen koordiniert durchgeführt, um den gesamten Umkreis der Widerspiegelung zugänglich zu machen. Aktive oder passive Körperbewegungen wie auch Kopfwendungen werden durch gegenläufige Augenbewegungen ausgeglichen, damit das Bild auf der Retina nicht bewegungsunscharf wird.

Beide Augen werden normalerweise zusammen bewegt, weshalb Motoneurone der Augenmuskeln nicht, wie etwa die der Handmuskulatur, direkt kortikal angesteuert, sondern die motorischen Programme für die genau abgestimmte Aktivierung und Hemmung der sechs Augenmuskeln im Hirnstamm generiert werden, wo Eingänge von allen Sinnessystemen konvergieren, die Augenbewegungen auslösen können, in erster Linie aus dem visuellen, vestibulären und dem auditorischen System (8,23,38,87).

### **Das Blickfeld**

Als Blickfeld bezeichnet man den Bereich, in dem Gegenstände bei bewegtem Auge, aber fixiertem Kopf gesehen werden können. Alle Gegenstände, die man bei ruhendem Auge, während Kopf und Körper fixiert sind, überblicken kann, liegen im Gesichtsfeld, welches einen Bereich von über 180 Grad umfaßt.

Adäquate Reize für das visuelle System stellen elektromagnetische Schwingungen mit einer Wellenlänge von 0,4 bis 0,7 nm dar. In diesem Spektrum des sichtbaren Lichtes liegen an bestimmten Wellenlängen die Spektralfarben rot, orange, gelb, grün, blau und violett.

Während innerhalb des Blickfeldes die Umweltausschnitte nach und nach abgetastet werden, kann innerhalb des Gesichtsfeldes ein bestimmter Bereich simultan wahrgenommen werden. Allerdings gibt es in den einzelnen Bereichen des Gesichtsfeldes Unterschiede in der Qualität des Farbsehens und der Sehschärfe. Am weitesten reicht die Unterscheidungsfähigkeit für Helligkeiten. Dann folgt in konzentrischen Gesichtsfeldkreisen jeweils die Grenze für die Farben gelb, blau, rot und grün. Die Unterscheidungsfähigkeit für die Farbe grün ist also auf das Zentrum des Gesichtsfeldes beschränkt, die für die Farbe gelb reicht bis in die Peripherie (23,87).

### **Die Fovea centralis**

Das menschliche Auge besitzt in der Mitte der Retina eine Stelle des schärfsten Sehens, die Netzhautgrube oder Fovea. Auf einen Gegenstand, den genau erkannt werden soll, muß exakt mit der Fovea geblickt werden, das heißt, der Blick muß von einer Stelle, auf die er gerade gerichtet ist, auf diese neue Stelle gerichtet werden. Diese alltäglich erscheinende Tatsache ist keinesfalls selbstverständlich, denn es stellt sich die Frage, wie das Bild, welches durch die Hornhautkrümmung und die Augenlinse optisch auf der Netzhaut abgebildet wird, ins Gehirn übertragen und als einheitliches Ganzes wahrgenommen wird. Scheinbar werden die jeweils gerade betrachteten Dinge vom Gehirn bevorzugt bearbeitet, gegenüber den jeweils gerade nicht angeschauten Dingen, wenngleich dies unbewußt geschieht. Andererseits müssen aber auch Reize, die zunächst nur aus dem Augenwinkel gesichtet werden, besonders behandelt werden, damit je nur ein einziger von ihnen als nächstes Blickziel anvisiert werden kann. Aufgrund der anatomisch-physiologischen Konstruktion von Auge und Retina müssen bei der Erfassung des Sehraumes die Blickrichtung einerseits dauernd geändert, andererseits Einzelbilder wieder zusammengesetzt und der nächste Blicksprung vorbereitet werden (8,97).

## Die Sehschärfe

Der Begriff der Sehschärfe bezeichnet die Fähigkeit, zwei in einem bestimmten Abstand nebeneinander liegende Punkte gerade noch getrennt wahrzunehmen. In der Mitte des Gesichtsfeldes, im Bereich der Fovea centralis, ist die Sehschärfe sehr stark, an den Rändern des Gesichtsfeldes kann man die Objekte der Umwelt dagegen nur ungenau und verschwommen wahrnehmen. Die Fovea hat einen Durchmesser von ca. 5 Grad; auf eine Entfernung von einem Meter sieht der Mensch daher nur in einem Areal von 9 cm Durchmesser wirklich scharf.

Zum Zwecke der Erfassung des zentralen Gesichtsfeldes, im fovealen Bereich der Netzhaut also, sind die Lichtrezeptoren und die retinalen Nervenzellen dort am dichtesten gepackt. Die Fortsätze der Ganglienzellen, die ins Gehirn ziehen, sind nach einer Umschaltung im Corpus geniculatum laterale mit Zellen der Großhirnrinde verbunden. Man kann davon ausgehen, dass relativ wenig Zellen für das periphere Sehen und damit für einen entsprechend relativ großen Teil des Gesichtsfeldes verantwortlich sind, während der relativ kleine Teil des zentralen Gesichtsfeldes durch vergleichsweise viele Nervenfasern vertreten wird. Gleichzeitig nimmt auch die Empfindlichkeit für Lichtreize und die Sehschärfe von zentral nach peripher stark ab.

Untersuchungen an Ganglienzellen der Netzhaut haben ergeben, dass der Einzugsbereich der Einzelzellen, ihr rezeptives Feld und deren Empfindlichkeit so miteinander verknüpft sind, dass ihr Produkt im Mittel konstant ist. Dieses Funktionsprinzip der Netzhaut lässt sich durch Normierung der rezeptiven Feldverteilungen auf ihre Größe ausdrücken; ihm entsprechen logarithmische Transformationen der Gesichtsfeldkoordinaten in die entsprechenden Gehirnkoordinaten. Die Transformationen sind dabei so geartet, dass die Anzahl der sich überlappenden Einzugsbereiche der Sinneszellen im gesamten Gesichtsfeld konstant bleibt. Dieses Prinzip wird insgesamt unverändert auf die Sehrinde übertragen (23,40,121).

Bestimmt wird die Sehschärfe durch die Verteilungsstruktur der Photorezeptoren auf der Retina. Dort findet sich die stärkste Differenzierung verschiedener funktioneller Teilsysteme, verschiedener Rezeptorsysteme. Klix beschreibt dies wie folgt: „Es sind dies erstens: die Regulation von Empfindlichkeitseinstellungen des reizaufnehmenden Systems, zweitens: das selektive Ansprechen von Rezeptorelementen auf das Einsetzen oder Aufhören von Reizwirkungen, drittens: das Eichungssystem für die mittlere Stärke im Reizeinzugsgebiet der

Rezeptorfläche und viertens: das funktionelle System der selektiven Empfindlichkeiten für verschiedene Wellenlängen des einstrahlenden Lichts“ (57, S 204).

## **Die Vigilanz**

Aufmerksamkeit beim Sehen ist ein Vorgang, bei dem bestimmte Objekte der visuellen Welt eine größere Bedeutung erhalten als andere. Besonderes Interesse seitens der Psychologen und Physiologen wird diesem Vorgang zuteil, da er einen leicht und zuverlässig zu messenden Begleitvorgang beinhaltet, die Bewegungen der Augen nämlich.

Der allgemeine Aktivierungsgrad des Organismus, der als Aufmerksamkeit, Wachsamkeit oder Vigilanz bezeichnet wird, stellt eine aktive Komponente der visuellen Wahrnehmung dar. Diese hängt sowohl von äußeren Reizbedingungen, wie auch von Bedingungen des Allgemeinzustandes des Organismus, der Motivation etwa, ab (85,87,97).

Als Aufmerksamkeit wird die Fähigkeit bezeichnet, sich innerhalb einer lebendigen Umgebung Dingen von Interesse zuwenden zu können. Der amerikanische Psychologe und Philosoph William James (1842-1910) beschrieb das Phänomen treffend, als er sagte: „Jedermann weiß, was Aufmerksamkeit bedeutet. Das Bewußtsein ergreift, in klarer und lebendiger Form, Besitz von einem Gegenstand oder einem Gedankengang aus einer Reihe gleichzeitig möglicher. Das wesentliche Merkmal der Aufmerksamkeit ist, dass sich das Bewußtsein quasi in einem Brennpunkt konzentriert. Es ist ein Abwenden von den einen Dingen, um mit den anderen besser umgehen zu können“ (97, in: 93, S 58).

## **Der Sehnerv**

Die Nervenfasern der Ganglienzellen, es handelt sich um etwa eine Million pro Netzhaut, bilden zusammen den Sehnerv. Bei Affen und Menschen teilt sich der Sehnerv in zwei Hauptstränge, von denen einer ohne Unterbrechung zum seitlichen Kniekörper, dem Corpus geniculatum laterale zieht und dort Synapsen bildet. Die Zellen des Corpus geniculatum laterale sind durch ihre Nervenfasern unmittelbar mit dem primären Sehfeld verbunden, dem ganz hinten gelegenen Teil der Großhirnrinde, wo die sichtbare Welt nach Farbe, Gestalt, Bewegung und Größe analysiert wird. Vom primären Sehfeld aus werden die Informationen über mehrere Synapsen zu benachbarten Rindengebieten und an tief im Gehirn gelegene

Stellen weitergeleitet. Das primäre Sehfeld stellt also keineswegs das Ende, sondern vielmehr eine Straße in der Verarbeitung der visuellen Information dar; hinsichtlich des Abstraktionsgrades handelt es sich vermutlich um eine frühe Station. Einige Nervenfasern ziehen vom primären Sehfeld zurück zum Corpus geniculatum laterale. Der zweite Hauptstrang führt zum Colliculus superior, dem vorderen Vierhügelpaar, das sich bei allen Säugetieren oben auf dem Mittelhirn befindet.

Besonders auffällig ist die teilweise Überkreuzung der Sehnerven, durch welche der rechte Teil des Gesichtsfeldes auf das linksseitige Sehfeld abgebildet wird: Corpus geniculatum laterale und Sehfeld der linken Hirnhälfte empfangen Informationen von den beiden linken Netzhauthälften, die ihrerseits die rechte Hälfte des Gesichtsfeldes erfassen. Entsprechend übernehmen das rechte Corpus geniculatum laterale und das rechte Sehfeld die linke Hälfte des Gesichtsfeldes (46,97).

### **On- und Off- Zentrum- Zellen**

Am besten reagieren eine Ganglienzelle der Netzhaut und eine Zelle des Corpus geniculatum laterale auf einen ungefähr runden Lichtfleck einer bestimmten Stelle des Gesichtsfeldes. Die Größe des Lichtflecks spielt eine Rolle, weil das rezeptive Feld, also der Teil der Netzhaut, der eine Ganglienzelle der Retina mit Signalen versorgt, geteilt ist. Es besteht aus einem Zentrum und einem Umfeld. Wirkt Licht im Zentrum des rezeptiven Feldes erregend auf die zugehörige Bipolar- oder Ganglienzelle der Retina, so hat Licht, das auf die Randzone des rezeptiven Feldes fällt, die entgegengesetzte Wirkung. Man spricht von einer „On- Zentrum- Zelle“. Daneben gibt es „Off- Zentrum- Zellen“, deren rezeptive Felder umgekehrt organisiert sind. Lichterregte On- und lichtgehemmte Off- Neurone können als Hell- und Dunkelsystem betrachtet werden.

Ein Lichtfleck, der gerade so groß ist, dass er das Zentrum des rezeptiven Feldes einer On- Zentrum- Zelle füllt, ist ein wirksamerer Reiz, als ein Lichtfleck, der auch noch die hemmend wirkende Randzone des rezeptiven Feldes beleuchtet, oder als diffuses Licht. Besonders wirksam ist ein Lichtstreifen dann, wenn er hauptsächlich das Zentrum des rezeptiven Feldes einer On- Zentrum- Zelle trifft. Da die rezeptiven Felder der Ganglienzellen der Retina und der Zellen im Corpus geniculatum laterale kreisförmig sind, spielt die Orientierung des Lichtstreifens keine Rolle. Die Ganglienzellen der Retina und die Zellen des Corpus

geniculatum laterale vergleichen also die Lichtstärke in einem kleinen Gebiet mit der durchschnittlichen Lichtstärke in seiner Umgebung (23,46).

### **Orientierungsspezifische Zellen**

Die meisten Zellen des primären Sehfeldes reagieren nicht auf Lichtflecken, sondern auf unterschiedlich orientierte Lichtstreifen und sie unterscheiden sich in ihren Reaktionen. So gibt es einfache und kompliziertere Zellen, wobei die einfacheren Informationen an die komplizierteren weitergeben. Im primären Sehfeld des Affen gibt es Zellen, die wie die Zellen des Corpus geniculatum laterale runde rezeptive Felder haben. Alle diese Zellen befinden sich im unteren Teil der Schicht 4 der Großhirnrinde, die den größten Teil der vom Körper kommenden Signale erhält. Zellen außerhalb der Schicht 4 reagieren am stärksten auf Lichtstreifen, die mit bestimmten Neigungen an bestimmten Stellen des Gesichtsfeldes aufleuchten oder das Gesichtsfeld durchqueren. Beleuchtet man die gleiche Stelle des Gesichtsfeldes mit diffusem Licht oder mit einem kleinen Lichtfleck, so wirkt sich dies auf die Zellen außerhalb der Schicht 4 nur in geringem Maße oder gar nicht aus.

Die wirksamste Neigung eines Lichtstreifens wechselt von Zelle zu Zelle. Schon durch eine Drehung des Lichtstreifens um 10-20 Grad wird die Wirkung deutlich herabgesetzt oder sogar aufgehoben, und ein Lichtstreifen, der zu der für eine Zelle wirksamsten Orientierung senkrecht steht, ruft fast nie eine Reaktion hervor. Je nach Zellart kann der visuelle Reiz eine helle Linie auf dunklem Grund, eine dunkle Linie auf hellem Grund oder eine Grenze zwischen einer hellen und einer dunklen Fläche sein.

Die auf die Orientierung eines Lichtstreifens reagierenden Nervenzellen sind von unterschiedlicher Komplexität: die einfachen unter ihnen erhalten ihre Signale direkt von Zellen mit kreisförmigen rezeptiven Feldern, also von Zellen aus der Schicht 4. Die zweite Gruppe der orientierungsspezifischen Zellen sind die bei weitem zahlreicheren komplexen Zellen, die sich alle dadurch auszeichnen, dass ihre Reaktionen weniger genau von der Position der als Reiz dienenden Lichtlinie abhängen.

Durchquert eine optimal orientierte Lichtlinie das Gesichtsfeld, so senden diese Zellen ununterbrochen Signale aus, wobei sie sich in der Bewegungsrichtung der Linie, auf die sie reagieren, unterscheiden. Vermutlich erhalten die komplexen Zellen ihre Signale von einigen einfachen Zellen, deren rezeptive Felder alle die gleiche Orientierung, aber eine etwas andere Position haben. Man geht davon aus, dass die orientierungsspezifischen Zellen insofern der

visuellen Wahrnehmung dienen, als sie eine frühe Stufe in der Analyse visueller Formen bilden (23,46).

### **Monokulare Zellen**

Die zweite Aufgabe des primären Sehfeldes besteht darin, die von den beiden Augen kommenden Signale zu kombinieren. In den Corpora geniculata können die Nervenzellen auf Signale vom linken oder vom rechten Auge reagieren, niemals aber auf Signale von beiden Augen. Obwohl jedes Corpus geniculatum laterale Signale von beiden Augen empfängt, sorgt der anatomische Aufbau dafür, dass diese Signale getrennt bleiben. Jedes Corpus geniculatum laterale besteht aus sechs Schichten, die entweder nur dem rechten oder nur dem linken Auge zugeordnet sind. Da jede Schicht Signale nur von einem Auge erhält, werden die Zellen als monokular bezeichnet. In jede Schicht wird dieselbe Hälfte des Gesichtsfeldes projiziert.

Auch für die Zellen in der Schicht 4 des primären Sehfeldes, die mit den Zellen der Corpora geniculata verbunden sind, ist dieser monokulare Charakter charakteristisch, ebenso wie für die einfachen Zellen des primären Sehfeldes. Erst auf der Ebene der komplexen Zellen laufen die von den beiden Augen kommenden Bahnen zusammen, wo sie sich dennoch nur unvollständig mischen, denn etwa die Hälfte der komplexen Zellen ist monokular und nur der Rest kann durch Reizung jedes der beiden Augen erregt werden, ist also binokular (46).

### **Binokulare Zellen**

Untersucht man die im rechten und im linken Auge gelegenen rezeptiven Felder der binokularen Zellen, indem man zuerst das eine und dann das andere Auge reizt, so zeigt sich, dass sowohl die Positionen, Orientierungen und Komplexitäten als auch die Richtungsspezifitäten der Felder übereinstimmen. Was immer man über eine binokulare Zelle durch die Reizung eines Auges erfährt, bestätigt sich bei der Reizung des anderen Auges, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass die Verbindungen zwischen den binokularen Zellen des primären Sehfeldes und beiden Augen qualitativ gleich, aber quantitativ verschieden sind, da alle Grade der Dominanz auftreten. Bei manchen Zellen läßt sich die Bevorzugung eines Auges erkennen, andere werden von beiden Augen gleichwertig versorgt (46).

## **Das primäre Sehfeld**

In den Schichten des primären Sehfeldes liegen Zellen gleicher Komplexität beisammen, wobei sich die Zellen mit kreisförmigen rezeptiven Feldern unten in der Schicht 4 befinden, die einfachen orientierungsspezifischen Zellen gerade darüber, und die komplexen Zellen die Schichten 2, 3, 5 und 6 bilden. Bezüglich der Lage ihrer Endpunkte unterscheiden sich die von den einzelnen Schichten ausgehenden Nervenfasern; während die Fasern der Zellen der Schicht 4 fast ausschließlich zurück zu den Corpora geniculata verlaufen, ist die Schicht 5 mit dem Colliculus superior im Mittelhirn verbunden, und die von den Schichten 2 und 3 ausgehenden Bahnen enden in anderen Gebieten der Großhirnrinde.

Der Colliculus superior entspricht dem Tectum opticum, der Stelle im Hirnstamm, an dem bei anderen Wirbeltieren die Axone der Sehnerven ankommen. Bei Fröschen und Fischen stellt das Tectum opticum das wichtigste Sehzentrum dar.

Die räumliche Ordnung, die sich bei den Corpora geniculata, wo auf jede Schicht dieselbe Hälfte des Gesichtsfeldes abgebildet wird, nachweisen läßt, bleibt auch beim Übergang zum primären Sehfeld, dem Rindengebiet 17, dem Gebiet, das die höchste Empfindlichkeit für die Details der visuellen Welt besitzt, erhalten. Dort benachbart liegende Zellen verfügen über rezeptive Felder, die nahe beisammenliegen und sich gewöhnlich sogar überlappen.

Über die größten rezeptiven Felder verfügen gewöhnlich die Zellen in den Schichten 3, 5 und 6, in erster Linie aber hängt die Größe der rezeptiven Felder von ihrer Entfernung vom gelben Fleck ab. Verglichen mit den Feldern der Randbezirke des Gesichtsfeldes sind die rezeptiven Felder, die im gelben Fleck liegen, sehr klein. Ebenso weichen die rezeptiven Felder benachbarter Zellen der Sehrinde kaum voneinander ab, sofern sie im gelben Fleck liegen, während die Abweichung in den Randbezirken erheblich sein kann. Die von den rezeptiven Feldern, die bei einem senkrechten Einstich an irgendeinem Punkt der Hirnrinde erfaßt werden, insgesamt bedeckte Fläche wird auch Aggregatfeld dieses Punktes genannt.

Die Größe eines Aggregatfeldes hängt dabei von seiner Entfernung vom gelben Fleck ab. In dem Bereich des primären Sehfeldes, auf den der gelbe Fleck abgebildet wird, sind die Aggregatfelder kleiner und weniger gegeneinander verschoben, als in den Randbezirken. Ein Block des primären Sehfeldes mit einer Grundfläche von 1-2 mm<sup>2</sup> scheint einer Region des Gesichtsfeldes zu entsprechen, die die Größe eines Aggregatfeldes hat; den Inhalt des Gesichtsfeldes im zentralen Teil analysiert das primäre Sehfeld detaillierter als am Rand.

In Bezug auf die Retina ist die Zahl der Millimeter, die einem Grad des Gesichtsfeldes entsprechen, aus optischen Gründen konstant; in der Mitte sind die Ganglienzellen aus diesem Grund dicht gepackt. Jede dieser Zellen ist hier für einen kleinen Gesichtsfeldausschnitt verantwortlich. Zum Rand hin wird die Schicht der Ganglienzellen dann immer dünner, während das primäre Sehfeld überall die gleiche Dicke hat, so dass hier der Teil des Gesichtsfeldes, der besonders fein analysiert werden soll, ein sehr großes Gebiet in Anspruch nehmen muß.

Die einheitliche Struktur des primären Sehfeldes zeigt sich anhand gefärbter Schnitte und wird anhand von Untersuchungen über die Orientierungsspezifität und die Augendominanz bestätigt. Wird eine Mikroelektrode senkrecht zur Hirnoberfläche durch die Schichten des primären Sehfeldes gestochen, so ergibt sich, dass aufeinanderfolgende Zellen in der Orientierung des Lichtreizes übereinstimmen, auf den sie optimal reagieren. Offenbar also ist das primäre Sehfeld in Säulen unterteilt, deren Zellen jeweils die gleiche Orientierung ihrer rezeptiven Felder aufweisen. Vermutlich bilden die Zellen gleicher optimaler Orientierung nicht nur Säulen, sondern ganze Schichten, die zur Hirnoberfläche senkrecht stehen, aber nicht notwendigerweise eben sind, sondern gekrümmt sein können. Diese Systematik bestätigt die Annahme über die hierarchische Zusammenschaltung von einfachen und komplexen Zellen. Zellen, die gleichartig zusammenschaltet sind, werden auch räumlich zu Gruppen zusammengefasst, wobei die unten in der Schicht 4 befindlichen Zellen, die nicht orientierungsspezifisch sind, eine Ausnahme bilden.

Ebenso läßt sich beobachten, dass eine binokulare Zelle auf Signale von einem Auge stärker reagieren kann, als vom anderen. Die Entstehung dieser Augendominanz läßt sich damit erklären, dass die vom Corpus geniculatum laterale zum primären Sehfeld ziehenden Nervenfasern letzten Endes entweder vom linken oder vom rechten Auge kommen ohne sich zu mischen, wenn sie die Schicht 4 des primären Sehfeldes erreichen. So ergeben sich in Abständen von jeweils etwa einem halben Millimeter links- und rechtsäugige Gebiete. Entscheidend ist schließlich, ob die betreffende Stelle der Schicht 4 ihre Signale vom rechten oder vom linken Auge erhält.

Wird eine Mikroelektrode senkrecht zur Hirnoberfläche in das primäre Sehfeld gestochen, so zeigt sich, dass alle untereinanderliegenden Zellen bis hinab zur Schicht 6 die gleiche Augendominanz aufweisen. Die genaue Aufgabe dieser Augendominanzsäulen ist noch unklar, doch wird ein Zusammenhang zwischen der gleichmäßigen Verteilung aller Grade der Augendominanz und dem räumlichen Sehen vermutet (23,38,46,88).

## **2.5 Das Gehör**

### **Funktionen des Hörsinns**

Ein Blick auf die Sprachgeschichte illustriert die zentrale Bedeutung des Hörsinns für den Menschen. Die sprachlich verwandten Wörter "deaf" und "doof", sowie "stumm" und "dumm" belegen, welche geringe Bildungschancen angeboren gehörlose Kinder haben, wenn man sich nicht speziell um sie bemüht. Nur konsequentes diagnostisches wie therapeutisches Handeln vom Kleinkindesalter an vermag diese Folge zu mindern, ja weitgehend zu beheben. Aus diesem Grund ist die frühzeitige Diagnose einer Hörbehinderung schon in den ersten Lebenswochen von größter Wichtigkeit. Doch auch für den Erwachsenen bedeutet Hörbehinderung oder gar Ertaubung eine Erschwerung zwischenmenschlicher Kommunikation und damit einen massiven Verlust an Lebensqualität.

Mit Hilfe seines Gehörs kann der Mensch Töne, Geräusche, Klänge und Musik wahrnehmen bzw. unterscheiden; da es der Vermittlung von Sprache dient, kommt ihm überdies eine wichtige Funktion für die menschliche Kommunikation zu. Wenn die Hörinformation nicht mit anderen Arten sensorischer Information auf jedem Hirnniveau kombiniert würde, wäre es sehr schwer, die Bedeutung des soeben Gehörten zu erkennen.

Durch das Gehör kann die Entfernung und Richtung von Reizen, in diesem Fall Schallquellen, sowie deren Bewegung, wie es etwa bei vorbeifahrenden Autos der Fall ist, wahrgenommen werden. Auch die akustische Qualität von geschlossenen Räumen, etwa ob der Raum groß, klein, möbliert oder leer ist, aus welchem Material die Wände bestehen etc., wird über das Gehör vermittelt (16,56,87).

### **Schallreize**

Die Grundlage der Schallwahrnehmung bilden die Schalldruckschwingungen, die die adäquaten Reize für das Gehörorgan darstellen. Im physikalischen Sinne werden unter Schall alle elastischen Schwingungen der Materie verstanden, so dass sich Schall außer durch Luft auch durch Wasser und feste Materie fortsetzt, was den Grund darstellt, weshalb bei der Gehörwahrnehmung zwischen Luft- und Körperschall unterschieden wird.

Beim Luftschall werden die durch die Luft übertragenen Schalldruckschwingungen über die Ohrmuschel in den Gehörgang geleitet, im Mittelohr über die Gehörknöchelchenkette auf das Trommelfell übertragen, anschließend über die Flüssigkeit im Inneren der Schnecke geleitet und analysiert und gelangen letztlich zu den Rezeptorfeldern des Cortischen Organs. Trommelfell und Gehörknöchelchen übernehmen dabei nicht nur die Funktion einer Schallbrücke, sie vermindern auch durch ihre Konstruktionsweise Reflexionsverluste ganz beträchtlich und verbessern so das Hörvermögen. Je nach Frequenzbereich wird dadurch ein Gewinn an Hörvermögen um 10-20 dB erzielt, beinahe so viel, wie die Differenz zwischen offenen und zugehaltenen Ohren beträgt.

Als Körperschall dagegen gelangen die Schwingungen über die Schädelknochen direkt an das Innenohr. Beim normalen Hören, insbesondere bei der Wahrnehmung der eigenen Sprache sind Luftschall und Körperschall immer miteinander gekoppelt, wobei die Knochenleitung die geringere Rolle spielt.

Die Schalldruckwellen variieren hinsichtlich ihrer Amplitude und Frequenz. Der Frequenzbereich des hörbaren Schalls reicht von 16-20 000 Hertz. Die obere Grenze der hörbaren Frequenzen nimmt mit zunehmendem Alter bis auf etwa 10 000 Hertz ab. Die größte Empfindlichkeit besitzt das menschliche Gehör im Bereich von 2-5 kHz, bei niedrigeren und höheren Frequenzen benötigt man höhere Schalldrucke, um Hörempfindungen auszulösen. Sehr tiefe Frequenzen (Infraschall) und sehr hohe Frequenzen (Ultraschall) sind für den Menschen nicht hörbar, für viele Tiere dagegen schon.

Aus der Amplitude einer Schalldruckschwingung ergibt sich die Lautstärke der Schallempfindung, deren Skala in Phon eingeteilt wird. Eine einfache sinusförmige Schwingung wird in der Akustik als Ton bezeichnet, in der Regel findet man jedoch Klänge, aus mehreren Frequenzen zusammengesetzte Schallwellen. Im Innenohr werden alle Klänge, gleich in welcher Phase sie miteinander vermischt sind, wieder in ihre sinusförmigen Teilschwingungen zerlegt; additive Lichtwellenfrequenzmischungen in ihre Bestandteile zu zerteilen ist das Auge demgegenüber nicht in der Lage. Im Gegensatz zu Klängen setzen sich Geräusche aus einer großen Anzahl von Einzelschwingungen zusammen, die in einem nichtharmonischen Frequenzverhältnis zueinander stehen.

Die Wahrnehmung der Entfernung von Schallquellen geschieht zunächst einmal über die Einschätzung der Lautstärke des Schalls. Es ist jedoch auch eine Entfernungsschätzung von Schallquellen unabhängig von der Lautstärkeninformation möglich, die aber bei reinen Sinustönen versagt, was auf die Rolle des Frequenzspektrums bei der Entfernungsschätzung hinweist. Tatsächlich werden bei der Luftschalleitung über größere Entfernung hin die hohen

Frequenzen aus dem Frequenzspektrum herausgefiltert, so dass ein entfernteres Geräusch dumpfer klingt und ein näheres heller.

Ermöglicht wird die Feststellung der Richtung von Schallquellen durch die Anlage des Ohrs als Doppelorgan; räumliche Information wird, ähnlich wie beim Gesichtssinn, durch den Vergleich der Reize, die auf das rechte bzw. das linke Sinnesorgan treffen, verarbeitet. Um eine eindeutige Entscheidung über die Richtung der Schallquelle treffen zu können, sind aktive Kopfdrehungen zur Schallortung notwendig.

Der Hörnerv meldet die Frequenzzusammensetzung eines Schallreizes auf zwei Weisen an das Gehirn. Zum einen werden seine spektralen Komponenten durch die Aktivierung bestimmter Nervenfasern nach dem Ortsprinzip repräsentiert. Zum anderen sind die Aktionspotentiale an die zeitlichen Strukturen, die Perioden der Schallschwingungen gekoppelt, und das Gehirn wertet diese Zeitstruktur aus.

Erst das Gehirn analysiert also die Aktivität des Hörnervs. Die zentrale Hörbahn ist dazu aus Kernen spezifischer Funktionen aufgebaut, die eine Kette von 5-6 Neuronen bilden. Die zentrale Musteranalyse dient der Spracherkennung oder der Erkennung anderer Schalle. In der aufsteigenden Hörbahn werden dazu in immer steigendem Maße bestimmte Charakteristika des Schallreizes extrahiert, bis eine Schallerkennung möglich ist. Auch die Lokalisation von Schallquellen gelingt mit Hilfe zentraler Rechenprozesse, ebenso die Verbesserung der Hörbarkeit von Nutzsignalen im Lärm (16,56,87).

## **2.6 Der Tastsinn**

Der Begriff der Wahrnehmungstätigkeit trifft auf den Tastsinn vermutlich am besten zu, denn in diesem Sinnesgebiet ist kaum ein Sinneserlebnis denkbar, welches nicht auf die Aktivität des Körpers und seiner Glieder angewiesen wäre. In der Regel geschieht daher die Erfassung von Formen und Gegenständen durch den Tastsinn sukzessiv, entsprechend dem Ablauf der das jeweilige Objekt umgreifenden bzw. abtastenden Bewegung. Die Form besonders kleiner Objekte läßt sich mit den Fingerkuppen jedoch auch simultan abtasten und zwar umso leichter, wenn die Fingerkuppen in dauernder Bewegung darüber streichen. Auch wenn die Bedeutung von Berührungen oft nicht bis ins Bewußtsein vordringt, ist das taktile System das ausgedehnteste Sinnesorgan des menschlichen Körpers und spielt eine entscheidende Rolle im menschlichen Verhalten, sowohl psychisch als auch physisch.

Eine Fülle von Empfindungen wird über die Haut vermittelt, so etwa die Weichheit eines Fells, die Rauigkeit von Sandpapier oder der brennende Schmerz einer frischen Wunde, aber auch starke Emotionen können über die Haut geweckt werden, wie es etwa beim zärtlichen Streicheln der Fall ist. Zahlreiche Eigenschaften von Gegenständen können allein über die Hautsinne erkundet werden. Aus der Verknüpfung daraus entstandener Empfindungen setzt sich die Struktur- und Formwahrnehmung zusammen, die beim aktiven Befühlen und Betasten eines Gegenstandes entsteht (7,16,87).

Die Empfindlichkeit gegenüber verschiedenartigen Reizen ist keineswegs gleichförmig über die Haut verteilt, vielmehr sind Punkte höherer Empfindlichkeit von Abschnitten relativer Unempfindlichkeit umgeben. Diese Sinnespunkte liegen in empfindlichen Hautarealen wie Gesicht oder Hände dichter als in unempfindlichen, wie dem Rücken, und lassen sich anhand punktförmiger mechanischer oder thermischer Reize leicht aufsuchen.

Die an einem Ort gleichzeitig auftretenden Empfindungen werden normalerweise zu einer einheitlichen Wahrnehmung zusammengefaßt. Die Tatsache, dass die von der Haut auslösbaren Empfindungen durch die räumliche Dimension verbunden sind, würde es nahelegen, die Hautsinne als eine Modalität zu betrachten, sie werden aber vielmehr in Tastsinn, Temperatursinn und Schmerz unterteilt, da die Unabhängigkeit dieser Hautsinne vielfach belegt ist.

Wie bei allen Wirbeltieren wird auch die Haut des Menschen entsprechend der Anzahl der Wirbelkörper sensorisch segmental innerviert. Das von einem Rückenmarksegment und den zugehörigen Spinalnerven sensibel versorgte Areal wird Dermatome genannt, wobei ein wesentliches Prinzip die Überlappung benachbarter Dermatome ist. Da die Dermatome von proximal nach distal schmaler werden, ist ihre Überlappung an Händen und Füßen weniger ausgeprägt. Der Verlust einer Hinterwurzel führt daher niemals zu einem Hautbezirk ohne Empfindung, sondern nur zu einer Abnahme der Empfindlichkeit.

Adäquate Reize für den Tastsinn sind mechanische Reize an Fingerkuppen, Lippen usw., die mit Propriozeptoren bzw. kinästhetischer Rezeption von Kopf-, Lippen- und Zungen- bzw. Finger-, Hand- und Armbewegungen simultan auftreten. Die entsprechenden Rezeptoren sind Berührungs- oder Tangorezeptoren und Thermorezeptoren, sowie Stellungs- und Spannungsrezeptoren in den Gelenken und Sehnen.

Ein Sinneseindruck, der nicht mit Aktivitäten des Körpers verbunden ist, wird dem Berührungs- und nicht dem Tastsinn zugeordnet; somit ist dem Tastsinn also eigentlich kein eigenes spezifisches Rezeptorenfeld zugeordnet, sondern er kombiniert die Rezeptoren anderer Sinnesgebiete. Dabei zeichnet er sich durch einen Reichtum an spezifischen

Qualitäten aus, die zunächst nur über diesen Sinn erfaßt werden können und die über das visuelle System nur durch das Vorhandensein anderer Tasterfahrungen erschlossen werden können. Diese Qualitäten beziehen sich in erster Linie auf Oberflächen- und Konsistenzeigenschaften von Objekten, wie Platteheit, Rauheit, Klebrigkeit, Feuchtigkeit, Trockenheit, Weichheit, Härte, Elastizität und viele andere mehr. Darüber hinaus können Größe, Form und Struktur von Objekten ertastet werden. Welche Empfindungsqualität durch den die Haut berührenden Reiz ausgelöst wird, hängt wesentlich von seiner Intensität, seinem zeitlichen Verlauf sowie der Reizfläche ab.

Bei leichtester bewegter Reizung der behaarten und unbehaarten Haut sowie der Schleimhäute entsteht Kitzel. Kitzelempfindungen haben eine starke Weckwirkung; da sie auf Hautkontakte z.B. auch von sehr kleinen Insekten aufmerksam machen und gezielte Abwehrbewegungen auslösen, ist ihnen eine Schutzfunktion zuzuschreiben.

Berührungsempfindungen werden ebenfalls durch leicht bewegte mechanische Reizung der Haut hervorgerufen; sie ermöglichen beim aktiven Betasten das Erkennen von Form und Oberfläche eines Gegenstandes. Besonders empfindlich hierbei sind Fingerbeere und Zungenspitze. Darüberhinaus lassen sich noch Vibrations-, Druck- und Spannungsempfindung unterscheiden. Bei einer Steigerung der Reizstärke gehen die beiden letztgenannten schließlich in eine Schmerzempfindung über.

Die höchste taktile Empfindlichkeit findet sich im Bereich des Mundes und der Fingerspitzen; hier lassen sich bis zu 100 Intensitätsabstufungen unterscheiden. Voraussetzung für eine derart hohe taktile Empfindlichkeit ist eine große Rezeptordichte (7,9,31,33,87).

Das taktile System stellt das erste sensorische System dar, das sich im Mutterleib entwickelt und bereits dann vollständig funktioniert, wenn optische und akustische Systeme erst noch ausreifen müssen. Als erstes Sinnesgebiet hat der Tastsinn in der ontogenetischen Entwicklung des Menschen eine lebenserhaltende Funktion, da die Suchbewegungen des Säuglings mit den Lippen nach der Mutterbrust bzw. das Flaschennuckeln den ersten zielgerecht koordinierten Einsatz eines Sinnesorgans beim Menschen darstellen. Mit zunehmender Entwicklung des Säuglings bis zum Kleinkind gehen dann die Funktionen des Tastens mehr und mehr auf die Hände über. Der Mund als Tastorgan verliert seine Orientierungsfunktion, die Informationsfunktion über lustbetonte soziale Kontakte bleibt dagegen bis ins Erwachsenenalter erhalten.

Kleinkinder orientieren sich über die Form und Oberfläche von Gegenständen durch Abtasten mit dem Mund. Das Abtasten durch die Hände beginnt zwar schon im Säuglingsalter, ersetzt diese Funktion des Mundes aber erst viel später vollständig. Ein rein visuelles Wahrnehmen

und Erkennen eines Gegenstandes genügt den meisten Kindern nicht, ihr Interesse daran ist erst gestillt, wenn sie ihn ausgiebig mit den Händen betastet haben. Erst im Erwachsenenalter kommt der visuellen Wahrnehmung die bedeutendste Erkenntnistätigkeit zu (7,87).

## **2.7 Der Geruchssinn**

Gerüche dienen als Signale für Gefahr, Nahrung, Genuß oder Freude; sie verbinden die Außenwelt mit inneren Bedürfnissen wie Hunger, Durst oder Sexualität. Im Gegensatz zur Vielfalt der Gerüche, die sich bisher nicht in eine sinnvolle Ordnung bringen ließen, steht die Armut unserer Sprache an Geruchsbezeichnungen.

Der Geruchssinn ist der empfindlichste chemische Sinn des Menschen; auffällig ist auch das gute Erinnerungsvermögen für Gerüche. Einen auch nur annähernd so hohen Orientierungswert wie für manche Tierarten, die ihren Lebensraum durch bestimmte Düfte markieren, durch Gerüche wiedererkennen oder strukturieren können, hat der Geruchssinn für den Menschen dennoch nicht mehr; seine Bedeutung liegt wohl vor allem darin, dass er Informationen über den Zustand der Luft und die Beschaffenheit bzw. Genießbarkeit der Nahrung ins Bewußtsein weiterleitet.

Diese Funktion kann der Geruchssinn allerdings nur unvollkommen erfüllen, denn nicht alle gasförmigen chemischen Verbindungen stellen adäquate Reize für den Geruchssinn dar. Das hochgiftige Kohlenmonoxid etwa, das sich z.B. in Auspuffgasen nachweisen läßt, ist völlig geruchlos. Auch gibt es eine Reihe von Giftstoffen, die sich nicht am Geruch von Speisen usw. feststellen lassen. Haben aber bereits Fäulnis- und Gärungsprozesse eingesetzt, so werden wir anhand der sich ergebenden typischen Geruchsqualitäten über die Un genießbarkeit der Nahrung informiert. Im Verlauf der Phylogenese des Menschen hat sich der Geruchssinn an unsere Lebensgewohnheiten angepaßt, auf die mit Beginn der Industrialisierung auftretenden chemischen Vergiftungserscheinungen der Luft ist er dennoch nicht eingerichtet.

Bei der Klassifizierung der Gerüche werden immer wieder folgende sechs Geruchsqualitäten hervorgehoben: blumig, fruchtig, würzig, faulig, brenzlig und harzig, Gerüche, die auf chemische Veränderung der Luft hinweisen bzw. im Fall des brenzlichen Geruchs einen gewissen Orientierungswert für den Menschen haben, da es hier durch den Geruch gelingt, noch nicht sichtbare oder schwelende Brandstellen rechtzeitig zu lokalisieren.

Beim Geruchssinn handelt es sich also auch um einen Fernsinn, mit dessen Hilfe eine gewisse Raum- und Richtungslokalisation möglich wird. Unabdingbare Voraussetzung dafür ist Wahrnehmungsaktivität, in diesem Fall in Form von Lufteinziehen durch die Nase, da es notwendig ist, dass die gasförmigen chemischen Verbindungen, die als adäquater Reiz für die Geruchsrezeptoren - die Riehzellen der Regio olfactoria in der Nasenhöhle - dienen, an diesen Rezeptoren vorbeistreichen. Das Riechepithel kleidet die Kuppeln der Nasenhöhlen aus; es enthält Millionen von Sinneszellen, die sich fortwährend erneuern. Riechbare Moleküle sind flüchtig, klein und wasserlöslich; sie müssen in dem die Riechschleimhaut überziehenden Schleim löslich sein.

Eine Sinneszelle ist für viele Geruchsstoffe empfindlich; sie sendet ihre Signale zum Bulbus olfactorius, wo die Geruchsinformationen sortiert, direkt dem gleichseitigen Riechhirn übergeben und dann an Neokortex und limbisches System verteilt werden. Dadurch entstehen Geruchswahrnehmungen mit affektiven und autonomen Begleitreaktionen (7,32,87).

## **2.8 Der Geschmackssinn**

Dieser Sinn steht in zweierlei Hinsicht in enger funktioneller Verbindung mit dem Geruchssinn: Zum einen wird über den Geruchssinn ein Vorgeschmack auf die Speisen, die wir gleich darauf zu uns nehmen vermittelt, zum anderen wird das Schmecken durch das Riechen unterstützt.

Adäquater Reiz für den Geschmackssinn sind chemische Lösungen. Daher können wir den Geschmack von festen Stoffen erst wahrnehmen, wenn sie sich mit Hilfe des Speichels gelöst haben. Die biologische Funktion des Geschmackssinns dürfte der des Geruchssinns sehr ähnlich sein, nämlich die Genießbarkeit der Nahrung festzustellen bzw. bei der Nahrungsaufnahme zu kontrollieren.

Auch beim Schmecken handelt es sich um eine Erkenntnistätigkeit, bei der eine Aktivität des wahrnehmenden Organismus vonnöten ist. In der Regel ist die Aktivität beim Schmecken mit der Funktion der Nahrungszerkleinerung verbunden. Indem wir den Verwandlungsprozeß vom festen Körper in eine chemische Lösung beschleunigen, werden die adäquaten Reize für

das Geschmacksorgan erst erzeugt, das heißt, Voraussetzung für die Fähigkeit zu schmecken ist eine ausreichende Speichelbildung.

Bei den Rezeptoren des Geschmackssinns handelt es sich um die Geschmacksknospen, die sich weit verstreut auf der Zunge und im Mund- und Rachenraum befinden. Geschmacksknospen werden von Axonen des Nervus facialis, Nervus glossopharyngeus und Nervus vagus versorgt. Konzentration und Temperatur eines Geschmacksstoffs sowie seine Einwirkungsdauer bestimmen die Intensität der Geschmacksempfindung. Bei anhaltender Reizung adaptiert der Geschmackssinn vollständig.

Über den Nucleus solitarius und den ventrobasalen Thalamuskern werden die Geschmacksinformationen weiter zum primären gustatorischen Kortex geführt, der die Signale weiterverarbeitet und sie dann an die sekundäre Geschmacksrinde und das limbische System verteilt, wo wahrscheinlich die affektiven Anteile der Geschmackswahrnehmung vermittelt werden. Noch ist unklar, ob beim Menschen der Geschmackssinn in Thalamus und Rinde ipsi-, kontra-, oder bilateral repräsentiert ist.

Bei der Erstellung eines Qualitätssystems hat man sich auf folgende vier Kategorien geeinigt: süß, sauer, bitter und salzig; entsprechende Mischungen sind natürlich möglich. Verschiedene Bereiche der Zungenoberfläche sprechen auf diese Grundqualitäten unterschiedlich stark an. Allerdings konnten noch keine spezifischen Geschmacksknospen für je eine dieser Geschmacksempfindungen gefunden werden. Die einzelnen Geschmacksknospen sprechen also nicht etwa auf nur je eine der vier Empfindungen an; dazu wären auch die Nervenfasern, die Erregungen von den einzelnen Geschmacksknospen fortleiten, nicht hinreichend voneinander getrennt (32,87).

## **2.9 Der Druck- und Berührungssinn**

Dieser Sinn kann als passive Komponente des Tastsinns betrachtet werden. In der Außenhaut des gesamten Organismus sind in unterschiedlicher Dichte Tangorezeptoren verteilt, freie Nervenendigungen großer markhaltiger Nervenfasern des somatischen Systems und marklose Nervenfasern der Gruppe C des visceralen Systems. Adäquater Reiz ist die mechanische Deformation und Bewegung der Haut. Dem Bewußtsein wird die mehr oder weniger starke Berührung des Organismus mit Objekten der Außenwelt signalisiert.

In Abhängigkeit von der Intensität der Berührung bzw. des Drucks und der Bewegtheit des Objektes ergeben sich dabei die Empfindungsqualitäten der Berührung, des Druckes, des Kitzels, der Vibration, des Streichelns, des Juckens usw.

Im Gegensatz zum Tastsinn liefert der Druck- und Berührungssinn also nicht Informationen über Form, Größe und Oberfläche der Objekte, die sich mit dem Organismus in Kontakt befinden, sondern spiegelt die Empfindlichkeit des Organismus bei diesem Kontakt wider. In Bezug auf den Druck- und Berührungssinn ist es der inaktive Organismus, der durch die Objekte der Außenwelt sozusagen tangiert wird.

Auch differenzierte räumliche Informationen vermag der Druck- und Berührungssinn in gewissen Grenzen zu liefern. So ist es möglich, auf größeren Berührungsflächen der Haut die Entfernung von Druckpunkten zu unterscheiden, wobei die Unterscheidungsfähigkeit an den Fingerkuppen am größten ist (87).

## **2.10 Der Temperatursinn**

Die Thermorezeptoren des Temperatursinns, freie Nervenendigungen, die nur auf warm oder kalt reagieren, sind über die gesamte Außenhaut verteilt und lassen sich in zwei spezifische Klassen unterteilen: Kaltrezeptoren und Warmrezeptoren. Adäquater Reiz für den Temperatursinn bilden Abweichungen der Außentemperatur von der mittleren Temperatur der Haut, die zwischen 24 und 35 Grad Celsius liegt, einem Bereich, in dem man keine Temperaturempfindung hat und der als physiologischer Nullpunkt oder Indifferenztemperatur bezeichnet wird. Der Temperatursinn informiert über die jeweilige Temperatur der Haut bzw. an verschiedenen Stellen der Haut, die sich als Abweichung vom physiologischen Nullpunkt nach oben, was als Wärme oder Hitze, oder nach unten, was als Kälte empfunden wird, manifestiert. Dabei wird keine kontinuierliche Temperaturveränderung signalisiert, sondern nur in etwa der Grad der Abweichung vom physiologischen Nullpunkt.

Kaltrezeptoren sind am empfindlichsten bei normalen Hauttemperaturen um 30 Grad. Empfindlichkeit und Spontanaktivität nehmen zu höheren oder niedrigeren Temperaturen hin ab; unterhalb 10 Grad und oberhalb 40 Grad reagieren sie meist nicht mehr. Einige Kaltrezeptoren können jedoch bei rascher Erhitzung der Haut auf über 45 Grad erneut aktiv werden. Beim Menschen verfügt etwa ein Drittel der Kaltrezeptorneurone über dünne, markhaltige Axone, die übrigen Kaltrezeptoraxone sind marklos.

Warmrezeptoren, denen ebenfalls ein kleines rezeptives Feld zu Eigen ist, sind im Bereich zwischen 30 und 45 Grad spontan aktiv und reagieren auf Erwärmung der Haut mit Frequenzzunahme, bei Abkühlung mit Beendigung der Impulserzeugung; sie adaptieren ähnlich schnell wie Kaltrezeptoren. Warmrezeptorneurone haben marklose Axone; von ihren rezeptiven Endstrukturen ist nur bekannt, dass sie tiefer als die der Kaltrezeptoren in der Dermis liegen. Die Hitzeaktivität einiger Kaltrezeptoren vermittelt wahrscheinlich die paradoxe Kalt-empfindung.

Die Temperaturempfindlichkeit ist nicht gleichförmig über die Haut verteilt; mit kleinflächigen Temperaturreizen lassen sich Warm- und Kaltpunkte, umgeben von unempfindlichen Hautbezirken, voneinander abgrenzen. Bei stärkerer Abkühlung oder Erwärmung gehen Temperaturempfindungen in Schmerz über.

Temperaturempfindungen sind häufig affektiv getönt. Wird die Hauttemperatur verändert, so hängt das Auftreten einer Temperaturempfindung von der Geschwindigkeit der Temperaturänderung und der Größe der gereizten Fläche ab. Je schneller bzw. größer diese Werte sind, desto geringer braucht die Temperaturänderung zu sein, um die Wahrnehmungsschwelle zu erreichen.

Temperaturempfindungen lassen sich auch durch chemische Substanzen auslösen; so ruft Menthol auf der Schleimhaut eine deutliche Kaltempfindung hervor. Den Temperaturempfindungen der Haut verwandt sind Allgemeinempfindungen wie Frieren und Hitzegefühl; sie treten z.B. bei Fieberanstieg und Entfiebern auf und sind stark unlustbetont (16,31,87).

## **2.11 Der Schmerzsin**

Die Haut als Schutzhülle des Organismus ist am ehesten Verletzungen ausgesetzt. Um eine drohende Gewebeschädigung frühzeitig zu erkennen, besitzt der Organismus ein hochentwickeltes Sinnessystem, die Nozizeption. Die Nozizeptoren der Haut sind ohne Reiz nicht spontan aktiv und registrieren normalerweise nur drohende oder eingetretene Verletzungen. Nach mehrfacher schädigender Reizung oder in entzündetem Gewebe erhöhen sie ihre Empfindlichkeit.

Aufgabe von Nozizeption und Schmerz ist die Erhaltung und Wiederherstellung der Unversehrtheit des Organismus. Schädigende Reize aktivieren Nozizeptoren, deren Signale häufig zu motorischen Reaktionen führen, die den Schaden begrenzen sollen, aber auch als

Schmerz wahrgenommen werden, der die Aktivität des Organismus dämpft und so Heilungsvorgänge fördert; chronische Schmerzen erfüllen diesen Zweck nicht.

Die hohe Schmerzempfindlichkeit der Haut ist auf Epidermis und Dermis beschränkt. Bei Verletzungen der Haut vermitteln Nozizeptoren nicht nur Schmerzen, sondern fördern direkt lokale Abwehr- und Heilungsprozesse. In menschlichen Hautnerven gehören über 10% der markhaltigen und über 50% der marklosen Axone zu Nozizeptoren. Mit Ausnahme von einigen wenigen Stellen verteilen sich die freien Nervenendigungen, die als Rezeptoren des Schmerzsinns dienen, über die gesamte Körperoberfläche. Ihr adäquater Reiz besteht in Verletzungen bzw. der Zerstörung von Gewebe auf mechanischem, thermischem, chemischem oder elektrischem Wege sowie den Folgen einer Verletzung, Entzündungen. Es gibt jedoch auch Reize, die bei längerer Einwirkung das Gewebe schädigen oder zerstören, selbst aber nicht wahrgenommen werden können; dazu zählt ultraviolette oder radioaktive Strahlung.

Aufgrund ihrer Axondurchmesser sowie ihrer spezifischen Empfindlichkeit gegenüber noxischen Reizen lassen sich die unterschiedlichen Nozizeptoren zu drei großen Gruppen zusammenfassen: Nozizeptoren mit markhaltigen Axonen reagieren entweder auf starke, vorzugsweise spitze mechanische Reize (A- Mechanonozizeptoren) oder zusätzlich auch auf Hitzereize und chemische Reize (A- polymodale Nozizeptoren). Nozizeptoren mit marklosen Axonen reagieren sowohl auf starke mechanische Reize als auch auf starke Hitze und auf verschiedene chemische Substanzen (C- polymodale Nozizeptoren); ihre genaue Struktur ist nicht bekannt.

Allen Nozizeptoren ist gemeinsam, dass sie bei überschwelliger, jedoch noch nicht schädigender Reizung langsam adaptieren. Nach mehrmaliger noxischer Reizung oder in entzündetem Gewebe erhöht sich aber ihre Empfindlichkeit; durch den Vorgang der Sensibilisierung reagieren sie auch auf nichtnoxische Reize oder werden spontan aktiv. A- Nozizeptoren vermitteln den ersten, gut ortbaren, kurzdauernden, spitzen Schmerz, C- Nozizeptoren den zweiten Schmerz, der langsam einsetzt, von brennender Qualität ist, ausstrahlt und länger anhält, insgesamt also erheblich unangenehmer ist.

Je nach Art der Gewebeerstörung können einige Schmerzqualitäten unterschieden werden, etwa der stechende, der bohrende, der ziehende oder der beißende Schmerz und darüber hinaus der Tiefenschmerz, der Schmerzreizungen der inneren Organe anzeigt und damit meist auf Krankheit hinweist.

Über die für den Tiefenschmerz verantwortlichen Rezeptoren ist bisher wenig bekannt. In allen tieferen Geweben finden sich Rezeptoren mit dünnen markhaltigen oder marklosen

Axonen, die häufig nur auf starke mechanische Reizung reagieren. In der Regel werden diese Rezeptoren jedoch durch chemische Stoffe, wie sie aus entzündetem oder hypoxischem Gewebe, aus Blutgerinnseln oder Nekrosen freigesetzt werden, derart sensibilisiert, dass sie auf schwache mechanische Reizung reagieren oder ohne Reiz spontan aktiv werden. Auch Juckempfindungen werden von Nozizeptoren vermittelt; es ist aber nicht bekannt, welche Untergruppe dafür verantwortlich ist (31,87).

## **2.12 Die Organempfindungen**

Auch in den inneren Organen und den großen Blutgefäßen existieren Sinnesorgane, die den Hirnstamm mit Informationen, die der Gesunderhaltung des Organismus dienen, versorgen. Aus den Eingeweiden stammen Gefühle wie Hunger, Völle, Übelkeit, Harn- und Stuhldrang, Atemnot, Sexualempfindungen oder Schmerzen. Während bei nur wenigen inneren Organen die normale Tätigkeit wahrgenommen werden kann, machen sich deren Erkrankungen häufig durch Schmerzen bemerkbar. Einerseits können Entzündung, starke Kontraktion der glatten Muskulatur und Ischämie zu visceralen Schmerzen führen, andererseits bleiben selbst ausgedehnte Zerstörungen innerer Organe durch Tumoren oder Verletzungen mitunter schmerzfrei. Die den visceralen Schmerzen zugrundeliegenden Rezeptormechanismen sind noch weitgehend unbekannt. Wahrscheinlich werden sie durch eine anhaltend gesteigerte Aktivität normalerweise schon tätiger Rezeptoren verursacht, zu der die Aktivität von sensibilisierten, sonst stummen Rezeptoren hinzutreten kann.

Die Aufnahme und Verarbeitung von Informationen aus den Hals-, Brust- und Baueingeweiden wird als viscerale Sensibilität bezeichnet. Für diese Art der Empfindung ist eine ganze Reihe von Interorezeptoren verantwortlich, die als freie Nervenendigungen an den inneren Organen auf mechanische, chemische und physikalisch-chemische Reize ansprechen. Signalisiert wird die allgemeine Befindlichkeit des Organismus, besonders der Deprivations- bzw. Befriedigungszustand der zyklischen Bedürfnisse, wie Hunger, Durst und sexuelle Erregung.

Diese wenigen schlecht zu ortenden Empfindungen haben einen starken Einfluß auf Antrieb und Stimmung. Vermittelt werden sie durch viscerale Rezeptorneurone, deren Axone dem autonomen Nervensystem folgen und entweder als spinale viscerale Afferenzen über das Rückenmark oder als vagale viscerale Afferenzen über den Nervus vagus den Hirnstamm erreichen. Ihre Zellsomata liegen in den Spinalganglien der Segmente Th1-L3 und S2-S4

sowie im Ganglion inferius vagi. Empfindungen aus den Körperhöhlen werden aber auch über die Rezeptoren der parietalen Serosaüberzüge, Pleura, Perikard und Peritoneum vermittelt, die ihre Axone über die Spinalnerven und die Nervi phrenici zum ZNS senden. Die Zahl visceraler Rezeptorneurone ist im Vergleich zur somatischen Sensibilität gering; ihre Axone sind fast ausschließlich marklos.

Abgesehen von den visceralen Rezeptoren existieren im Magen- Darm- Trakt noch weitere Rezeptoren, deren Somata in der Wand der Eingeweide liegen und deren Axone nicht das ZNS erreichen. Sie dienen autonomen Regulationsvorgängen und gehören dem Darmnervensystem an. Die Rezeptoren des Magen- Darm- Kanals lassen sich in Muskelrezeptoren, Schleimhautrezeptoren und Rezeptoren des Mesenteriums und der Serosa untergliedern. Ein Teil der Rezeptoren des Magen- Darm- Trakts reagiert auch auf körpereigene Schmerzstoffe und auf Ischämie. Schmerzen aus dem Magen- Darm- Bereich werden über die spinalen visceralen Rezeptoren ausgelöst. Nur Temperaturempfindungen aus Speiseröhre und Magen werden möglicherweise über den Nervus vagus vermittelt. Die Hauptaufgabe der vagalen Rezeptoren besteht in der Überwachung der Verdauung. Die Rezeptoren der glatten Muskulatur von Leber, Gallenwegen, Pankreas und Milz entsprechen denen des Darms. Diese Organe werden sowohl von spinalen als auch von vagalen Rezeptorneuronen versorgt.

In der Niere finden sich Druck- und Osmorezeptoren, in der glatten Muskulatur der Harnleiter und der Blase langsam adaptierende Mechanorezeptoren, in den Schleimhäuten freie Nervenendigungen. Während Niere und oberer Harnleiter auch von vagalen Afferenzen versorgt werden, verfügen unterer Harnleiter und Blase nur über spinale viscerale Afferenzen. Da die Sexualorgane unter starker endokriner Kontrolle stehen und die glatte Muskulatur weitgehend selbständig arbeitet, ist die neuronale Übertragung sensibler Signale für die Funktion dieser Organe nicht immer von Bedeutung; so wird der normale Geburtsablauf auch durch vollständige Blockade der die Gebärmutter versorgenden Nerven nicht beeinträchtigt. Die entsprechenden Rezeptoren stellen in erster Linie freie Nervenendigungen in der glatten Muskulatur und den Schleimhäuten der Hohlorgane sowie im Ovar und in der Tunica albuginea des Hodens dar.

Mechanische und chemische Reizung der Schleimhäute der Luftwege führen zu Hustenreiz und Schmerzen. Überall in den Luftwegen und der Lunge finden sich langsam und schnell adaptierende Dehnungsrezeptoren der glatten Muskulatur, sowie freie Nervenendigungen in den Schleimhäuten, die auf Berührung, Reizgase, sowie auf zahlreiche Schmerzstoffe reagieren; in der Lunge werden sie zusätzlich durch Lungenstauung und Lungenödem gereizt.

Während die langsam adaptierenden Dehnungsrezeptoren vermutlich nur dem Atemzentrum die Lungendehnung übermitteln und keine bewußten Empfindungen auslösen, vermitteln die Schleimhautrezeptoren Schmerzen und Atemnot. Die meisten Empfindungen aus den Atemwegen und der Lunge werden durch den Nervus vagus vermittelt; nur an der Wahrnehmung von Atemwiderstand und Lungenvolumen sind auch somatische Rezeptoren der Atemmuskulatur beteiligt.

Eine Ischämie des Herzmuskels führt in vielen Fällen zu ausgeprägten Schmerzen und Angst. Herz und herznahe Gefäße werden von vagalen und spinalen visceralen Afferenzen versorgt. Es finden sich dünne markhaltige sowie marklose Axone, deren Rezeptoren normalerweise mechanorezeptiv sind und die verschiedene Größen der Herztätigkeit messen, die vom Kreislaufzentrum bei der Regulation des Blutdrucks benötigt werden. Die Rezeptoren mit marklosen Axonen reagieren sehr empfindlich auf Ischämie sowie auf chemische Stoffe, die bei Mangeldurchblutung oder Nekrosen des Herzmuskels freigesetzt werden. Während sich ano-male Herzaktionen möglicherweise auch über die parietalen Serosaüberzüge oder über die Brustwand bemerkbar machen, werden Schmerzen aus dem Herzen ausschließlich über die spinalen visceralen Afferenzen vermittelt.

Die von Rezeptorneuronen aus den verschiedenen Körpergeweben übermittelten Signale werden im ZNS in zwei getrennten Systemen aufbereitet und zur Hirnrinde geleitet. Das Vorderseitenstrangsystem zum einen, das Schmerz- und Temperaturempfindungen vermittelt, übernimmt im Hinterhorn die Gesamtinformation aller Rezeptorneurone, verarbeitet sie, verteilt die Ergebnisse an autonome und motorische Neurone und sendet sie über den Vorderseitenstrang, den Funiculus antero- lateralis der Gegenseite, an die Formatio reticularis des Hirnstamms und an den Thalamus.

Das andere System, das Hinterstrangsystem, das taktile und propriozeptive Empfindungen vermittelt, leitet die von den dicken markhaltigen Axonen der niederschweligen Mechanorezeptoren übermittelten Signale schnell über den Hinterstrang, den Funiculus posterior, zu dessen Kernen, die sie über die mediale Schleife dem Thalamus der Gegenseite übergeben. Vom Thalamus aus erreichen beide Systeme gemeinsam den somatosensorischen Kortex. Ähnlich wie Nozizeptoren können auch nozizeptive Neurone des Hinterhorns ihre Empfindlichkeit erhöhen. Ein Fortbestehen dieser Funktionsänderung kann zur chronischen Schmerzkrankheit führen (31,87).

### 2.13 Der Stellungs- und Spannungssinn

Die Sinnesbereiche des Stellungs-, Spannungs-, Lage- und Drehbewegungssinns dienen dem Organismus zur Feststellung des Lage- und Bewegungszustandes. Abgesehen vom Spannungs- und Kraftsinn sind ihnen jedoch keine eigenen Empfindungsqualitäten zugeordnet. Zur Sinnestätigkeit dieser Organe ist keine Wahrnehmungsaktivität wie etwa beim Sehen nötig, vielmehr dienen die Propriozeptoren der Regelung der Stellung, Spannung, Lage und Bewegung des Organismus. Aufgrund der großen Anzahl von Muskeln und Gelenken im menschlichen Körper ist das propriozeptive System beinahe so ausgedehnt wie das taktile.

Da der Stellungssinn sehr genau ist und fast nicht adaptiert, ist es auch nach längerem Einhalten einer Körperhaltung möglich, sich die Stellung der einzelnen Gelenke genau bewußt zu machen.

Stellungs-, Bewegungs- und Kraftempfindungen werden über eine Fülle unterschiedlichster Mechanorezeptoren aus Muskeln, Sehnen und Gelenken vermittelt. Da die Stellung eines Gelenks über die Muskelspindeln der verschiedenen am Gelenk angreifenden Muskeln kontrolliert wird, ist es dem ZNS möglich, durch Vergleich der Ansteuerung der intrafusalen Muskulatur mit der Rückmeldung der Längen- und Spannungsdetektoren der Muskeln Informationen über die Stellung des Gelenks und über die von der Muskulatur aufgebrauchte Kraft zu gewinnen. Darüberhinaus wird die Gelenkstellung und ihre Änderung wesentlich durch Mechanorezeptoren in der Gelenkkapsel übermittelt wo sich langsam und schnell adaptierende korpuskuläre Rezeptoren mit dicken markhaltigen Axonen befinden, wie sie auch in der Haut oder in den Sehnen als Ruffini- und Pacini- Körperchen vorkommen. Darüberhinaus existieren rezeptive Endigungen mit dünnen, markhaltigen oder marklosen Axonen, von denen etwa die Hälfte nur auf stärkste mechanische Reize reagiert.

Charakteristisch für die langsam adaptierenden Gelenkrezeptoren ist, dass sie nicht den gesamten Bewegungsbereich eines Gelenks übertragen, sondern jeweils nur in einem schmalen Sektor des Gesamtbereichs aktiv sind; die Information über die augenblickliche Stellung eines Gelenks läßt sich somit aus den unterschiedlichen Aktivitätsmustern der Gesamtmenge seiner Kapselrezeptoren in den einzelnen Sektoren gewinnen. Zusätzlich zu den Rezeptoren der Muskeln und Gelenke vermitteln auch die langsam adaptierenden Mechanorezeptoren der Haut über den Gelenken Informationen über deren Stellung.

Die Stellungsrezeptoren, welche sich in den Gelenkkapseln und -bändern befinden, reagieren auf isotonische Muskelkontraktion bei gleichbleibender Spannung. Zum einen fungieren sie als Meßfühler in den Regelkreisen der Bewegungsregulation, zum anderen signalisieren sie

Stellung, Ort und Bewegung der Gliedmaßen. Dadurch wird es möglich, auch bei geschlossenen Augen die Stellung und Bewegung jedes einzelnen Körperteiles festzustellen und zu kontrollieren.

Sensorische Grundlage des Spannungssinns bilden die in den Sehnen liegenden Spannungsrezeptoren, die Sehnenspindeln oder Golgi- Organe. Im Gegensatz zu den Stellungsrezeptoren reagieren sie auf isometrische Muskelkontraktionen, bei denen bei gleichbleibender Länge des Muskels unterschiedliche Spannungen gemessen werden.

Der Spannungssinn signalisiert den Grad der Muskelspannung, das heißt den Krafteinsatz des eigenen Körpers bei unveränderter Muskellänge, und informiert folglich auch über Gewicht bzw. Druck von Objekten der Außenwelt. Durch diese Funktion des Kraftsinns gelingt es, sehr kleine Gewichtsunterschiede von Objekten in beiden Händen wahrzunehmen, was wiederum erleichtert wird, wenn der Mensch aktiv wahrnimmt und beispielsweise beide ausgestreckten Arme gegenläufig auf- und abbewegt. Andererseits besteht die Aufgabe des Spannungssinns darin, die Sensoren im Regelkreis der Haltungs- und Gleichgewichtsregulation bereitzustellen, den Körper gegenüber wechselnden physikalischen Störeinflüssen in einer relativen Ruhelage, dem dynamischen Gleichgewicht, zu halten.

Ist die Propriozeption gestört, so ergeben sich ausgeprägte Probleme immer dann, wenn das betreffende Ereignis nicht mit den Augen erfaßt werden kann (31,87).

## **2.14 Der Lage-, Bewegungs- und Drehbewegungssinn**

Manche Dinge scheinen so selbstverständlich, dass ihre Existenz lange Zeit nicht bemerkt wurde; der Bewegungssinn als eigenständige Sinnesqualität etwa wurde erst 1875 von dem Physiker Ernst Mach beschrieben. Die Perzeption der Bewegung erscheint trivial, da wir sie ja selbst verursachen, sehen und fühlen. Vielmehr konvergieren Informationen aus anderen Sinnes- und motorischen Systemen mit dem spezifischen vestibulären Eingang und führen zu einer einheitlichen Wahrnehmung von Bewegung, weshalb der Lage-, Bewegungs- und Drehbewegungssinn unter allen anderen Sinnen eine Sonderstellung einnehmen; sie verarbeiten Informationen aus mehreren Rezeptorsystemen, speziell aus dem Vestibularorgan, dem visuellen und dem propriozeptiven System (87).

Im Organismus stellt der Gleichgewichtssinn das alles vereinende Bezugssystem dar, da er die Grundbeziehungen, die ein Mensch zur Schwerkraft und seiner physikalischen Umwelt herstellt, formt. Alle anderen Arten von Empfindungen werden erst in Bezug auf diese

grundlegende vestibuläre Information verarbeitet, die das gesamte Nervensystem zu einer wirkungsvollen Funktion anzuhalten scheint.

Das Vestibularsystem ist so empfindlich, dass Richtungs- und Bewegungsänderungen einen sehr starken Effekt auf das Gehirn ausüben, der schon mit der geringsten Änderung der Richtung oder Bewegung variiert. Dieser Effekt beginnt bereits sehr frühzeitig im Fetalleben. Die vestibulären Kerne erscheinen neun Wochen nach der Konzeption und beginnen in der zehnten bis elften Woche zu funktionieren. Im fünften Schwangerschaftsmonat ist das vestibuläre System sehr gut entwickelt und zusammen mit dem Tastsinn und dem autonomen Nervensystem stellen diese Systeme nahezu die gesamte Sinneswahrnehmung des fetalen Gehirns dar. Durch die Körperbewegungen der Mutter wird das vestibuläre System des Fötus stimuliert (7,82).

Lokalisiert sind die Sinnesgebiete, die der Gleichgewichtsregulation dienen, im Labyrinth des Innenohrs. Es umfaßt zwei Makulaorgane, die durch Linearbeschleunigungen, vor allem durch die Gravitationsbeschleunigung, erregt werden. Ferner umfaßt es drei Bogengangorgane, die in drei senkrecht zueinander stehenden Ebenen angeordnet sind und auf Drehbeschleunigungen reagieren.

Das Organ des Lage- und Bewegungssinnes liegt im Sacculus und Utriculus des Vestibulärapparates, wo sich Statholithen- Kristalle in einer gallertigen Masse über den Sinneszellen der Maculae nachweisen lassen; die adäquaten Reize sind physikalischer Art. Die Trägheit der Statholithen bei linearer Beschleunigung wirkt sich als seitliche Verschiebung auf die Sinneszellen aus, wodurch zum einen die Richtung der Gravitation und damit die Lage des Körpers relativ zur Erdoberfläche festgestellt werden kann, zum anderen ist es möglich, das Vorhandensein von geradliniger progressiver Zusatzbeschleunigung, wie sie Eisenbahn oder Fahrstuhl darstellen, dem Organismus zu melden.

Parallel zur Widerspiegelung von Lage und Beschleunigung des Körpers im Bewußtsein finden automatisch ablaufende Gleichgewichtsregulationen statt, für deren Existenz ebenfalls Eisenbahn und Fahrstuhl gute Beispiele darstellen, ruft man sich die Muskeltätigkeit ins Gedächtnis, die stattfindet, wenn man sich freistehend in einem derartigen beschleunigenden oder abbremsenden Transportmittel befindet.

Das vestibuläre System mit dem Labyrinth im Innenohr als Rezeptororgan ist in der Lage, Körperbewegungen zu messen und verfügt zudem über eine schnelle Verbindung zur Motorik. Damit können Bewegungen im dreidimensionalen Raum erfaßt und die Orientierung zur Schwerkraft ermöglicht werden. Zusätzlich zur Stabilisierung von aufrechtem Gang und Stand werden von den Rezeptoren des Gleichgewichtssystems im Labyrinth reflektorisch die

Augenbewegungen gesteuert. Ohne Bewegungs- und Lagesinn wäre keine Orientierung im Raum denkbar.

Ist der Körper Störbeschleunigungen ausgesetzt, dauernden Beschleunigungen und Abbremsungen in verschiedenen Richtungen, so wirkt der Lage- und Bewegungssinn auf das vegetative Nervensystem und führt zur Seekrankheit oder Kinetose, die sich oft auf Schiffen beobachten läßt.

Das Organ des Drehbewegungssinns liegt in den drei Bogengängen des Vestibulärapparates, die in den drei Hauptraumrichtungen angeordnet sind. In den mit Flüssigkeit gefüllten Bogengängen befinden sich die Cupulae, die bei Winkelbeschleunigungen in einer der drei Ebenen durch die Trägheit der Bogengangflüssigkeit bewegt werden. Der Drehbewegungssinn dient vornehmlich der Bewegungskoordination. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Korrektur des Abbildes der Außenwelt, das sich bei drehenden Körper- oder Kopfbewegungen auf der Retina verschiebt. Als Folge wird die Außenwelt als statisch und der Körper als in Bewegung befindlich empfunden und nicht umgekehrt. Bei sehr schnellen andauernden Drehbewegungen, etwa auf einem Drehstuhl, bemerken wir nach einiger Zeit den Ausfall dieser optokinetischen Koordination, indem wir den Eindruck gewinnen, wir selbst befänden uns in Ruhe, während die Umwelt sich um uns dreht. Bei plötzlicher Abbremsung der Drehbewegung scheint sich als postrotatorisches Phänomen die Umwelt entgegen der vorangegangenen Richtung zu bewegen, was sich durch die Trägheit der sich noch einige Augenblicke weiterbewegenden Bogengangflüssigkeit erklären läßt.

Überstarke Reize der Cupulae führen, ähnlich wie beim Lage- und Bewegungssinn zu Reaktionen des vegetativen Nervensystems, die sich in Form von Übelkeit und Schweißausbrüchen, verbunden mit der Empfindung des Drehschwindels äußern.

Der Vestibularnerv projiziert in die Vestibulariskerne. Es besteht eine monosynaptische reziproke Verbindung von den vestibulären Kernen zum Kleinhirn. Wie jedes andere Sinnessystem, das zur bewußten Wahrnehmung führt, projizieren auch die vestibulären Kerne über den Thalamus zum Kortex. Die enge, vor allen Dingen schnelle Verbindung zur Motorik beruht auf einer monosynaptischen Projektion zu den Kernen der Augenmuskeln und über die vestibulospinale Bahn, die entscheidend für die reflektorische Stand- und Gangregulation ist, ins Rückenmark (40,87).

### **3. Physiologische Grundlagen der Raumwahrnehmung unter Berücksichtigung der Kindesentwicklung**

Kaspar Hauser ist das wohl berühmteste Beispiel dafür, dass Hirnfunktionen irreversible Schäden erleiden, wenn während der frühkindlichen Entwicklung Erfahrungen mit der Umwelt vorenthalten werden, eine Tatsache, die sich anhand kontrollierter Tierversuche sowie klinischer Beobachtungen am Menschen bestätigen ließ. Es gilt als gesichert, dass das Gehirn höherer Tiere und insbesondere des Menschen seine vielfältigen Leistungen nur im Wechselspiel mit der Umwelt voll entwickeln und entfalten kann; die Entwicklung der Sinnesfunktionen, allen voran die der visuellen Wahrnehmung, hängt bei Mensch wie auch Tier von Umweltfaktoren ab. So werden höhere Säugetiere und Menschen schwerwiegend beeinträchtigt, wenn sie während einer kritischen Phase der frühkindlichen Entwicklung ihren Sehsinn nicht ungestört gebrauchen können.

Den Großteil der Informationen über seine Umgebung erhält der Mensch durch das Sehen. Die Prozesse, die daran beteiligt sind, umfassen selbst bei ganz alltäglichen Wahrnehmungsaufgaben in der Regel eine sehr komplexe Informationsverarbeitung. Wahrnehmen ist von den anderen Prozessen menschlicher Informationsverarbeitung seiner Funktion nach nicht zu isolieren, sondern vielmehr in den weiteren Rahmen menschlichen Handelns einzuordnen; ohne den permanenten Informationsfluß zwischen Mensch und Umwelt ist effektives, auf die Umwelt gerichtetes Handeln nicht denkbar.

Wahrnehmen, Planen des eigenen Handelns, das Handeln selbst und das Wahrnehmen der Handlungskonsequenzen sind zu einem Kreisprozeß verbunden, daher ist Wahrnehmung in allen Funktionsbereichen menschlicher Tätigkeit von Bedeutung. Der Mensch muß sich in seiner Umgebung zielgerichtet fortbewegen, ohne die Orientierung zu verlieren, nach Gegenständen greifen oder komplizierte Werkzeuge gebrauchen, sowie soziale Kontakte herstellen. Voraussetzung für das Zustandekommen von Adaptation und Lernen im Wahrnehmungssystem sind Rückmeldungen über das eigene motorische Handeln; Wahrnehmung ist mit Wissen verbunden und wirkt mit Gedächtnisprozessen zusammen (2,7,84,88).

Im Folgenden soll näher auf die physiologischen Grundlagen der Raumwahrnehmung eingegangen werden.

### **3.1 Die Bedeutung der Wahrnehmung im Lauf der Phylo- und Ontogenese**

Das Sehvermögen der Tiere entwickelte sich durch für das Überleben in der Natur bedeutsame Anpassungsreaktionen. Für die frühen Wirbeltiere, die Fische und Amphibien, bedeutete visuelle Wahrnehmung nicht viel mehr, als die Fähigkeit, Gegenstände zu erkennen, die sich in einer bestimmten Weise bewegten.

Im Laufe der Evolution entwickelte sich dann die Fähigkeit der Raumwahrnehmung, so dass Reptilien sich effektiver umherbewegen konnten. Bei Fischen, Amphibien und Reptilien, die nur über sehr kleine Großhirnhemisphären verfügen, wird der optische Eindruck dagegen fast vollständig im Hirnstamm verarbeitet.

Mit Hilfe der Ausbildung der Fovea centralis und der Großhirnrinde entwickelten die Primaten, die sich vor die Notwendigkeit gestellt sahen, von Bäumen aus verschiedene Dinge aus allen Richtungen wahrzunehmen, ein höheres Niveau optischer Verarbeitung; dabei übernahm das optische System bei der Entwicklung des Gehirns eine Hauptrolle. Voraussetzung dafür, dass die Großhirnrinde optische Einzelheiten verarbeitet, ist jedoch, dass der Hirnstamm und niedrigere Ebenen der Großhirnhemisphären den Gesamteindruck des gesehenen Raumbilds vorordnen; die neurologischen Gegebenheiten zur Wahrnehmung feiner Einzelheiten und Symbole entwickelten sich dabei auf der Basis älterer fundamentaler Nervenprozesse.

Als Kind sieht der Mensch seine Umgebung mit ganz anderen Augen als später. Kurz nach der Geburt hatten die Dinge, die er sah, eine andere Bedeutung für ihn, als diejenige, die er später als Erwachsener in ihnen erkennt. Zuerst lernt das Kind sehr schnell, das Gesicht seiner Mutter wiederzuerkennen, da ihre Anwesenheit mit Nahrung und Wohlbefinden gleichgesetzt wird. Später durchstreift es seine Umgebung und lernt dabei die physische Natur von Raum und Gegenständen kennen. Diese körperlich gefärbte sensomotorische Kenntnis wird schrittweise in die optischen Informationen miteinbezogen, so dass im Lauf der Zeit eine visuelle Raum- und Formwahrnehmung entsteht.

Bereits im Mutterleib wird das Kind über die Erregung seiner Schwerkraftrezeptoren darüber informiert, wo oben und unten ist. Die Bewegungen seiner Mutter reizen seine Sinnesorgane für die Körperbewegung, so dass es eine Vorstellung von Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit erhält. Auch wenn es noch nichts sehen kann, hat das Kind aufgrund der Schwerkraft-empfindung bereits eine Vorstellung des Raumes, von dem es umgeben wird.

Wenn auch die Rezeptoren für die Eigenwahrnehmung der Muskeln und Gelenke zu diesem Zeitpunkt bereits dafür ausgebildet sind, Informationen an das Gehirn zu übermitteln, so

verhindert doch die Enge im Uterus die Mehrzahl der Bewegungen, die entsprechende Muskel- und Gelenkempfindungen auslösen. Mit dem Augenblick der Geburt erweitert sich plötzlich der zur Verfügung stehende Raum sodann gewaltig (7,18,82).

Im Alter von ungefähr sieben Jahren werden die Augenbewegungen besser gelenkt, die ersten logisch- mathematischen Operationen bilden sich aus und folglich kann die Wahrnehmungstätigkeit durch eine Intelligenz gelenkt werden, die die Probleme besser erfaßt. Nach Piaget tritt die Intelligenz dann zwar nicht an die Stelle der Wahrnehmung, aber indem sie das Wirkliche strukturiert, trägt sie dazu bei, die Aufnahme der Wahrnehmungsinformation zu programmieren, also auf das hinzuweisen, was mit größerer Aufmerksamkeit betrachtet werden muß.

Die Wahrnehmungstätigkeiten allgemein entwickeln sich mit dem Alter, bis sie sich den Direktiven anpassen können, die ihnen die Intelligenz in ihren operativen Fortschritten vorgibt (71,72).

### **3.2 Das zentrale Nervensystem**

Die Hirnevolution stellt einen etwa 500 Millionen Jahre dauernden Prozeß der Verbesserung von Assoziationen der sensorischen Systeme dar; beim Menschen kommunizieren sämtliche sensorischen Systeme untereinander und interagieren dabei viel intensiver, als den meisten bewußt ist. Auch heute noch beeinflußt die Ausbildung des sensorischen Systems im Rahmen der Evolution entscheidend die Entwicklung des Menschen (7).

#### **3.2.1 Der Aufbau des menschlichen Gehirns**

Bis in die molekularen Strukturen jeder einzelnen Zelle hinein ist die Gesamtpersönlichkeit des Menschen biologisch geprägt. Hierzu gehören nicht nur die vielfältigen Funktionen innerhalb der Nervenzelle und im Informationsaustausch mit anderen Nervenzellen, sondern auch ihre Verbindung mit umgebenden Gliazellen und ihre Fähigkeit, immunologisch unterschiedlichste Eiweißstrukturen erkennen zu können.

Das Nervensystem gliedert sich in ein zentrales Nervensystem (ZNS), das die übergeordneten Zentren Gehirn und Rückenmark bilden, und ein peripheres Nervensystem, zu dem alle

außerhalb dieser Zentren liegenden Nervenzellen und -bahnen zählen, die das ZNS mit dem übrigen Körper verbinden.

Kein Teil des Gehirns arbeitet isoliert oder unabhängig; das Gehirn funktioniert im Wesentlichen als Ganzes und es besteht immer eine wechselseitige Abhängigkeit. Bei den Wirbeltieren einschließlich des Menschen ist es trotz erheblicher Unterschiede in der Größe und im anatomischen Feinaufbau einzelner Teile sehr einheitlich aufgebaut. Es besteht von hinten nach vorn aus dem Hirnstamm mit dem verlängerten Mark (Medulla oblongata), dem Kleinhirn (Cerebellum), der Brücke (Pons), dem Mittelhirn (Mesencephalon), dem Zwischenhirn (Diencephalon) und dem Endhirn. Das Großhirn oder Cerebrum, das von der Großhirnrinde (Neokortex) überdeckt wird, stellt den phylogenetisch jüngsten, dabei jedoch größten Teil des menschlichen Gehirns dar. Sein Volumen macht allein etwa 85% der gesamten Hirnmasse aus. Von seiner Lage her wölbt es sich über die anderen Gehirnabschnitte. Das Großhirn wird durch eine tiefe Längsfurche, die Fissura longitudinalis, in zwei Hemisphären unterteilt, die durch den Balken (Corpus callosum) verbunden sind. Verlängertes Mark, Brücke und Mittelhirn bilden zusammen den Hirnstamm, der unterschiedliche vegetative Funktionen wie Atmung, Blutdruck, Verdauung und Schlaf steuert. Eine Brücke fehlt bei Fischen, Amphibien und Reptilien; dies stellt aber einen rein äußerlichen Unterschied dar.

Das verlängerte Mark bildet die direkte Fortsetzung des Rückenmarks; es ist der Ort des Ein- und Austritts des neunten bis zwölften Hirnnervenpaares und enthält die motorischen und sensorischen Kerngebiete dieser Nerven. Diese werden umgeben von der *Formatio reticularis*, die sich von hier über die Brücke bis zum vorderen Mittelhirn zieht und an lebenswichtigen Körperfunktionen wie Schlafen und Wachen, Blutkreislauf und Atmung beteiligt ist, sowie an Aufmerksamkeits- und Bewußtseinszuständen (*Locus coeruleus*, Raphe- Kerne, aufsteigendes aktivierendes System) (7,9,88,112).

Bewußtsein bedeutet Wissen um geistige und seelische Zustände und ist damit überwiegend Ausdruck der Funktionen des Großhirns; dabei gibt es unterschiedliche Bewußtseinsstufen. Selbstbewußtsein bedeutet volles, zur Reflexion befähigtes Bewußtsein, das sich erst im Laufe des Lebens entwickelt und das von Mensch zu Mensch individuell verschieden ist.

Das Großhirn steuert höhere psychische Prozesse wie Wahrnehmung, Gedächtnis, Lernen, Denken oder Sprache. An seiner Oberfläche liegen die übergeordneten Steuerzentralen für bewußte Bewegungsabläufe, Empfindungen von der Haut, Sehen, Hören, Riechen und Schmecken; sie unterscheiden sich in Aufbau und Funktion.

Die zwei Hemisphären der Großhirnrinde weisen eine funktionelle Asymmetrie auf: Die linke Hemisphäre besitzt die Fähigkeit, analytisch mit Einzelheiten umzugehen, z.B. einem Satz als sequentielltem Zusammenhang von Einzelheiten. Die rechte Hemisphäre dagegen rekonstruiert den Gesamtzusammenhang einer Sache, z.B. den Gesamtsinn von Gesprochenem; sie ist verantwortlich für nicht- verbale Leistungen und unter anderem auch für die Raumwahrnehmung. Bei den meisten Menschen ist die linke Hemisphäre für die Funktion der dominanten rechten Hand und der aktiven Sprache zuständig. Durch den Balken, das Corpus callosum, werden die Hemisphären miteinander verbunden; die Brücke (Pons) verbindet Großhirn und Kleinhirn (9,41,88,112).

In seiner Funktion ist das Kleinhirn aus drei Teilen zusammengesetzt: Vestibulo- Cerebellum, zuständig für die Steuerung des Gleichgewichts und der Augenfolgebewegungen, Spino- Cerebellum, das über das Rückenmark Eingänge von den Muskelspindeln erhält, und Pont- Cerebellum, das an der Steuerung der feinen Willkürmotorik beteiligt ist. Das Kleinhirn ist unter dem Einfluß der motorischen Großhirnrinde (über die Brücke) an der Feinregulierung der Muskeln beteiligt und stellt einen wichtigen Ort motorischen Lernens dar. Es handelt sich dabei keineswegs nur um ein Bewegungssteuerungszentrum, sondern vielmehr hat das Kleinhirn auch an kognitiven Leistungen und Sprache erheblichen Anteil, allerdings ohne dass dies dem Bewusstsein zugänglich wäre.

Das Zwischenhirn besteht aus Epithalamus, dorsalem Thalamus, ventralem Thalamus (auch Subthalamus genannt) und Hypothalamus. Der Thalamus, auch als Tor zum Bewußtsein bezeichnet, stellt die größte Ansammlung von Nervenzellen im Bereich der Stammganglien und zugleich die Schaltzentrale für unterschiedliche Sinnesempfindungen dar; er steuert in erster Linie die Wiedergabe der Sinnesreize an das Großhirn.

Der dorsale Thalamus ist ein Konglomerat aus funktional sehr unterschiedlichen Kernen und Kerngebieten und mit der Hirnrinde über auf- und absteigende Fasern verbunden, die das thalamo- corticale System bilden. Traditionell werden die Kerne und Kernbereiche des dorsalen Thalamus eingeteilt in pallio- thalamische und trunco- thalamische Kerne.

Die pallio- thalamischen Kerne erhalten spezifische Eingänge von subcorticalen Zentren und stehen ihrerseits mit eng umgrenzten Kortexgebieten in wechselseitiger Verbindung. Diese Kerne haben teils sensorische und motorische Funktionen (z.B. lateraler Kniehöcker visuell, medialer Kniehöcker auditorisch, laterale Kerngruppe gustatorisch, somatosensorisch, vestibulär und motorisch), teils kognitive (z.B. Pulvinar) oder limbische Funktionen (anteriore und mediale Kerngruppe).

Zu den trunco- thalamischen Kernen gehören die intralaminären Kerne sowie die Mittellinienkerne. Sie spielen bei der Regulation von Wachheits-, Bewusstseins- und Aufmerksamkeitszuständen eine entscheidende Rolle, und zwar aufgrund der Afferenzen von den retikulären Kernen und ihrer Verbindungen zum präfrontalen und parietalen Kortex.

Der ventrale Thalamus oder Subthalamus besteht u.a. aus dem Nucleus subthalamicus und dem Globus pallidus, zwei Zentren der Willkürmotorik (9,34,99,112).

Regulationszentrum für vegetative Funktionen wie Atmung, Herzschlag, Kreislauf, Nahrungs- und Flüssigkeitshaushalt, Wärmehaushalt und immunologische Reaktionen ist der Hypothalamus. Er beeinflusst in diesem Zusammenhang lebens- und überlebenswichtiges Verhalten wie Flucht, Abwehr, Fortpflanzung, Nahrungsaufnahme und Biorhythmen. Er steuert mit der Ausschüttung verschiedener Hormonsysteme die Epiphyse und somit die vegetativen Funktionen.

Das Mittelhirn dient als Koordinationszentrum, das Informationen aus verschiedenen Sinnesbereichen und aus dem Großhirn erhält. Es kontrolliert Hirnnervenreflexe wie z.B. den Blinzelreflex und Bewegungen. Darüber hinaus enthält es Zentren der Schmerzempfindung und eventuell auch Zentren, die mit Suchtzuständen in Zusammenhang stehen.

Das Endhirn gliedert sich in die Basalganglien und die Hirnrinde. Die Basalganglien umfassen das Corpus striatum und den Globus pallidus, der zum Teil auch zum Zwischenhirn gezählt wird. Beide sind für Bewegungskontrollen zuständig. Der obere Teil des Striatum und des Globus pallidus haben mit Handlungsplanung und Verhaltenssteuerung zu tun, der untere Teil, einschließlich Nucleus accumbens, mit Emotionen und Verhaltensbewertung und dabei in erster Linie mit positiven Ereignissen.

Das zwischen Großhirnrinde und Stammganglien an der medialen Oberfläche jeder Hirnhälfte gelegene limbische System ist zuständig für emotionales Verhalten und verschiedene Gedächtnisfunktionen. Einen wesentlichen Teil davon stellt der an der Innenseite des Temporallappens gelegene Hippocampus dar.

Zum limbischen System gehören Anteile der Hirnrinde, nämlich Hippocampus, Gyrus parahippocampalis und Gyrus cinguli, weitere allo- und subcorticale Gebiete, nämlich Amygdala, Septum, ventrales Striatum einschließlich Nucleus accumbens und basales Vorderhirn, außerdem diencephale Kerngebiete wie Mamillarkörper, Habenula, anteriore, mediale und intralaminare thalamische Kerne, Nucleus praeopticus und Hypothalamus, des weiteren Kerne des zentralen tegmentalen Höhlengrau im Mittelhirn, sowie Kerne der Formatio reticularis, die durch die neuromodulatorischen Transmitter Noradrenalin, Serotonin und Dopamin gekennzeichnet sind, nämlich Locus coeruleus, Raphe- Kerne und

parabrachiale Kerne. Das limbische System stellt also ein sehr ausgedehntes, das ganze Gehirn durchziehendes System dar.

Die allgemeine Funktion des limbischen Systems besteht in der Bewertung dessen, was das Gehirn leistet, wobei das Ziel immer darin besteht, es dem Organismus zu ermöglichen, zu überleben. Das Resultat dieser Leistung wird im Gedächtnissystem gespeichert. Bewertungs- und Gedächtnissystem hängen damit untrennbar zusammen, denn jede Bewertung erfolgt aufgrund des Gedächtnisses. Umgekehrt ist Gedächtnis nicht ohne Bewertung möglich, denn das Abspeichern von Gedächtnisinhalten geschieht aufgrund früherer Erfahrungen und Bewertungen und in Abhängigkeit vom aktuellen emotionalen Zustand.

Die Interaktion von Hippocampus, dem Organisator von Lernen und Gedächtnis, und Amygdala spielt eine zentrale Rolle bei diesen Vorgängen. Die Art und Tiefe der Einspeicherung und damit die Leichtigkeit des Erinnerns bzw. die Resistenz gegen das Vergessen wird ganz wesentlich vom emotionalen Begleitzustand bestimmt, insbesondere davon, ob das, was gespeichert werden soll, positive oder negative Konsequenzen hatte oder nach sich ziehen wird. Diese Bewertung durch den emotionalen Begleitzustand, insbesondere in Hinblick auf negative Erfahrungen, wird von der Amygdala geleistet.

Amygdala, Hippocampus, Septum, Hypothalamus und zentrales Höhlengrau sind wesentlich an der Kontrolle der Emotionen beteiligt und in diesem Zusammenhang an der Steuerung des Kampf-, Verteidigungs- und Fluchtverhaltens. Das zentrale Höhlengrau ist an der Schmerzempfindung und deren Regulation beteiligt. Diese vegetativ-emotionalen Funktionen verleiteten in der Vergangenheit neurobiologische Autoren dazu, das limbische System als ein primitives Säugetiergehirn anzusehen und es dem Isokortex als dem höchsten kognitiven Zentrum gegenüberzustellen, was aber nicht den anatomischen und funktionalen Tatsachen entspricht.

Teile des limbischen Systems sind mit dem Isokortex oder Neokortex der Großhirnrinde eng verbunden. Dies gilt etwa für die Verbindung zwischen präfrontalem Kortex und Amygdala und diejenige zwischen inferotemporalem und entorhinalen Kortex und Hippocampus. Überdies steht nahezu der gesamte Kortex über den Gyrus cinguli mit dem limbischen System in Verbindung. In den letzten Jahren wurde deutlich, dass neben den vegetativen und antriebhafte Funktionen das limbische System bei kognitiven Leistungen eine tragende Rolle spielt, die bisher als ausschließliche Funktion des Isokortex angesehen wurde. Allgemeine Aufbaustörungen des zentralen Nervensystems sind für die Entwicklung ungünstiger als umschriebene, die zum Teil kompensiert werden können, wenn sie früh auftreten. Zumeist sind Hirnfehlanlagen mit allgemeinen Entwicklungsstörungen vergesellschaftet (9,85,88,112).

### **3.2.2 Die intrauterine Entwicklung**

Verhalten und Bewußtsein haben ihren Ursprung im Gehirn; das menschliche Gehirn gilt als die komplexeste Struktur des gesamten Universums. Das ZNS geht aus dem Neuralrohr hervor, indem sich zwischen dem 22. und 28. Gestationstag aus dem vorderen Teil des Neuralrohrs die Hirnblase entwickelt, die sich rasch in Endhirn, Zwischen- und Mittelhirn differenziert. Mit drei Monaten, wenn die Form des ZNS weitgehend ausgebildet ist, findet die Differenzierung und innere Strukturierung statt. Aus dem Keimlager, das um die Ventrikel lokalisiert ist, wandern Neuroblasten zur Hirnrinde und den Stammganglien, doch bereits während der intrauterinen Entwicklung gehen viele der bis zur 34. Schwangerschaftswoche gebildeten mehr als 15 Milliarden Neuroblasten wieder zugrunde.

Gegen Ende der Schwangerschaft werden die Gyri, die Hirnwindungen der Großhirnoberfläche, ausgebildet, um diese zu vergrößern; die Nervenzellen werden mehr und mehr mittels ihrer Axone und Dendriten über Synapsen miteinander verbunden.

Bei der Geburt wiegt das Gehirn etwa 300 Gramm und wächst, verglichen mit dem Körper, im ersten Lebensjahr überproportional. Am Ende des ersten Lebensjahres beträgt sein Gewicht etwa 900 Gramm, beim Erwachsenen schließlich 1300- 1500 Gramm.

Nach der Geburt verlieren die Nervenzellen ihre Teilungsfähigkeit; möglicherweise können jedoch nicht benötigte Nervenzellen als Reservezellen fungieren, so z.B. bei umschriebenen Schädigungen.

Das Größenwachstum des Gehirns während des ersten Lebensjahres ist vor allem durch die Myelinisierung, die Ausbildung der Markscheiden um die Axone und Dendriten bedingt, die einer rascheren Informationsübermittlung dienen. Es kommt zur Ausbildung von für die Informationsverarbeitung zuständigen Zellverbänden, sogenannten Modulen, und Nervenbahnen, die sowohl durch endogene, überwiegend genetische, als auch exogene Einflüsse bestimmt sind. Die Module des Großhirns entladen gleichzeitig (9,85,88).

Schon im vorgeburtlichen Stadium durchläuft das menschliche Gehirn eine rasche Entwicklung; am Ende des dritten Schwangerschaftsmonats bereits sind Großhirn, Kleinhirn und Mittelhirn deutlich zu unterscheiden. Die Entstehung der Gehirnzellen durch fortwährende Teilungsvorgänge vollzieht sich noch im vorgeburtlichen Stadium; ab der 22.

Schwangerschaftswoche sind alle Nervenzellen vorhanden, das weitere Wachstum des Gehirns beruht auf der Entwicklung der Nervenfortsätze und der Synapsen. Die Neuronen können beginnen, sich zu differenzieren und Verbindungen untereinander aufzubauen. Die Verknüpfungen der Gehirnzellen sind die Grundlage aller Wahrnehmungs-, Denk- und Gedächtnisleistungen.

Die frühe Embryonalentwicklung des zentralen Nervensystems wird von lokalen Wechselwirkungen zwischen Zellen bestimmt. Erkennungsmoleküle in der Zellmembran und humorale Botenstoffe steuern die Differenzierung von Zellverbänden. Zur normalen Entwicklung des ZNS gehören auch Zelltod und Rückbildung überschüssiger Verbindungen, da sie die Selektivität neuronaler Verschaltungen erhöhen. Die Auswahl beruht dabei auf dem Prinzip des Wettbewerbs. Dieser wird zunächst nur von Wachstumsfaktoren, später auch von der elektrischen Aktivität der Nervenzellen bestimmt (82,85,88).

Während der frühen Embryonalentwicklung gelten für die strukturelle Differenzierung des Zentralnervensystems die gleichen Selbstorganisationsprinzipien wie für andere Organe. Nervenzellen werden durch Zellteilung von Neuroblasten gebildet, die in der Nachbarschaft der Hohlräume des Neuralrohrs, der späteren Ventrikel, liegen. Um an ihre Bestimmungsorte zu gelangen, müssen diese noch undifferenzierten Nervenzellen wandern, wobei ihnen die langgestreckten Fortsätze von Gliazellen als Leitstruktur dienen. Im Zielgebiet angelangt, gruppieren sich die Nervenzellen zu Verbänden, wobei membranständige Glykoproteine, die zusammengehörige Nervenzellen durch einen Schlüssel- Schloß- Mechanismus vernetzen, als Erkennungsmechanismus fungieren. Die endgültige strukturelle Ausprägung der Nervenzellen erfolgt, wie in anderen Organen auch, durch die Expression zellspezifischer Genprodukte.

Welcher Nervenzelltyp jeweils ausgebildet wird, richtet sich nach der Umgebung, in welche die ausreifende Zelle eingebettet ist. Der Differenzierungsprozeß einzelner Zellen verändert seinerseits das lokale zelluläre Milieu und wirkt damit zurück auf die Genexpression in benachbarten Zellen. Infolge solcher lokaler Wechselwirkungen entstehen schließlich die Grundstrukturen des Zentralnervensystems.

Im Zuge der Differenzierung bilden die Nervenzellen ihre Fortsätze aus, Dendriten und Axone, und treten miteinander über synaptische Kontakte in Verbindung. Dabei orientieren sich die auswachsenden Axone vorerst über mechanische Wechselwirkungen an Leitstrukturen, später dann an chemischen Signalsystemen; die entstandenen Verbindungen weisen zunächst nur eine begrenzte Selektivität auf.

Über die Innervation der eigentlichen Zielstrukturen hinaus kommt es zur Ausbildung überschüssiger, fehlerhafter Verbindungen. Solche Fehlinnervationen sind während der

Hirnentwicklung die Regel. Etwa ein Drittel der zunächst gebildeten Nervenzellen geht bis zum Abschluß der Hirnentwicklung wieder zugrunde. Nervenzellen, die mit ihren Fortsätzen auf die gleiche Zielstruktur konvergieren, treten miteinander in Wettstreit und nur die funktionell besser angepaßten Verbindungen bleiben erhalten.

Die elektrische Aktivität von Nervenzellen ist über die Vermittlung durch Transmitter Signalträger für die Rechenoperationen im ZNS. Die einzigartige Fähigkeit von Nervennetzen, logische Operationen an großen Datennetzen durchzuführen, wird somit für die Steuerung der Hirnentwicklung nutzbar. Das sich entwickelnde Gehirn kann seine Rechenleistung einsetzen, um die Ausdifferenzierung und das Zusammenspiel seiner Komponenten zu optimieren. Erst dieser Selbstorganisationsprozeß macht es möglich, dass sich so komplexe Strukturen wie das menschliche ZNS trotz der relativen Beschränktheit der im Genom speicherbaren Instruktionen entwickeln können.

Auch die Feinabstimmung der Verbindungen zwischen den Sinnesorganen und den zentralen Zielstrukturen im ZNS wird durch neuronale Aktivität gesteuert. In den meisten Sinnessystemen vollziehen sich diese Selektionsprozesse erst nach der Geburt und somit unter dem Einfluß sensorischer Umweltreize (7,41,82,85,88).

### **3.2.3 Der Kortex**

Die entwicklungsgeschichtlich wesentlichen Merkmale, die den Menschen von anderen Säugern unterscheiden, sind die Größenzunahme des Kortex, seine Zell- und Synapsendichte, sowie die Komplexität seiner Verbindungen. Die volle Funktionstüchtigkeit des Kortex ist Voraussetzung für bewußte Wahrnehmung, Planen, Handeln und Willkürmotorik. In der aufsteigenden Säugetierreihe bis hin zu den Menschenaffen nimmt das Gehirn deutlich an Volumen zu; dabei zeigt der Kortex im Vergleich zu anderen Gehirnteilen die massivste Größenzunahme.

Der in seinem Grundaufbau gleichförmige Kortex ist eine relativ dünne Schicht von Zellen, die durch Faltung das immense Ausmaß von 2500 cm<sup>2</sup> erreicht. Die Spezifität einzelner Kortexareale ergibt sich aus afferenten und efferenten Verbindungen und aus Variationen im quantitativen Verhältnis der einzelnen Zelltypen. Differenziertes persönliches Verhalten wie auch intellektuelle Leistungen sind an einen intakten Kortex gebunden. Bei völligem Ausfall ist der Patient gegenüber seiner Umgebung reaktionslos, während die vom Hirnstamm gesteuerten vegetativen Funktionen noch intakt sein können.

Bei der Großhirnrinde unterscheidet man den sechsschichtigen Isokortex oder Neokortex und den heterogen aufgebauten Allokokortex. Zum Allokokortex zählen die Riechrinde, der Mandelkernkomplex (Amygdala) und die Hippocampus-Formation. Die Amygdala hat mit der Steuerung von Emotionen und Affekten und mit Verhaltensbewertung, in erster Linie von negativen Ereignissen, zu tun. Der Hippocampus organisiert das deklarative Gedächtnis. Die mit Amygdala und Hippocampus eng zusammenhängenden Septumkerne und das basale Vorderhirn gehören zum limbischen System und sind an der Aufmerksamkeitssteuerung beteiligt. Der Neokortex mit seiner stark gefalteten Oberfläche macht beim Menschen etwa die Hälfte des gesamten Hirnvolumens bzw.-gewichtes aus. Unterteilt wird er in vier Lappen, nämlich den Hinterhaupts- oder Okzipitallappen, den Schläfen- oder Temporallappen, den Scheitel- oder Parietallappen und den Stirnlappen (Frontallappen).

Aufgrund von Unterschieden in der Zellkörpergröße, der Zelldichte und der Gesamtdichte des Kortex wird der Neokortex des Menschen in ca. 50 unterschiedliche Hirnrindengebiete (sog. Brodmann-Areale) eingeteilt, die zum Teil auch funktionale Unterschiede kennzeichnen. Der somatosensorische Kortex umfasst die vorderen Teile des Parietallappens, der visuelle Kortex nimmt den Okzipitallappen ein, der auditorische Kortex liegt am oberen Rand des Temporallappens, der motorische Kortex im hinteren Bereich des Frontallappens, unmittelbar vor der Zentralfurche.

Den größten Teil des Neokortex macht der sogenannte Assoziationskortex aus, wobei der parietale Assoziationskortex den hinteren Teil des Parietalkortex umfasst und mit Raumwahrnehmung, Raumorientierung und Raumvorstellung zu tun hat, außerdem mit abstraktem Denken, Erfassen von Symbolen, Musik, Lesen und Schreiben. Der temporale Assoziationskortex ist für die Integration und Bewertung nicht-räumlicher visueller und auditorischer Aspekte von Objekten und Prozessen zuständig.

Im mittleren temporalen Kortex wird komplexe auditorische Information verarbeitet; hier findet sich - meist in der linken Hemisphäre - das Wernicke'sche Sprachzentrum, das für das Sprachverständnis zuständig ist; im unteren Bereich wird komplexe visuelle Information verarbeitet.

Der frontale Assoziationskortex, auch präfrontaler Kortex genannt, hat mit zeitlich-räumlicher Strukturierung von Sinneswahrnehmungen zu tun, mit planvollem und kontextgerechtem Handeln und Sprechen und allgemein mit Verhaltensbewertung. Der präfrontale Kortex spielt neben dem parietalen Kortex auch bei der Aufmerksamkeitssteuerung eine große Rolle. Im linken präfrontalen Kortex befindet sich auch das Broca'sche Sprachzentrum, das im Zusammenhang mit der Sprachsyntax steht.

Die zentralen anatomischen Verbindungen der Sinnesorgane projizieren, nach erfolgter Umschaltung im Thalamus, letztlich zum sensorischen Kortex, einer notwendigen Station für die bewußte Wahrnehmung. Vom motorischen Kortex entspringt die kortikospinale oder Pyramidenbahn als entscheidende Bahn für die Willkürbewegung. Die Aufgabe des prämotorischen Kortex liegt in der Planung einer Bewegung.

Bei der Planung und Durchführung von Bewegungen sind große Teile des Kortex simultan aktiv, was Abgrenzungen relativiert, die rein nach anatomischen oder klinischen Gesichtspunkten erfolgen. Doch nur ein kleiner Teil der Kortexoberfläche ist direkten sensorischen oder motorischen Funktionen zuzuordnen. Der größere Teil erfüllt assoziative Funktionen, wobei die Weiterverarbeitung sensorischer Informationen und die Vorbereitung von motorischen Abläufen im Gegensatz zu höheren kortikalen Funktionen relativ gut beschreibbar sind. Unter letzteren versteht man nicht nur intellektuelle Leistungen, sondern auch die Fähigkeit, soziale Normen zu erkennen und diese auch in Handlungen zu integrieren. Als visueller Assoziationskortex werden die Gebiete bezeichnet, die der Weiterverarbeitung visueller Informationen dienen und diese mit Informationen anderer Sinnesmodalitäten verknüpfen.

Gesteuert werden visuelle Wahrnehmungen und Raumwahrnehmung, aber auch Berührungsempfindungen in erster Linie von der rechten Hemisphäre, die linke dagegen hat bei Rechtshändern eingehender mit der Sprache zu tun. Für umfassendere Funktionen werden beide Hemisphären benötigt und arbeiten zusammen.

Eine gute Funktionsspezialisierung führt zu einer zufriedenstellenden Wirksamkeit der Hirnprozesse, während eine schlechte Spezialisierung oft Sprachentwicklung und Lernvermögen behindert. Ein sehr exaktes Handeln der beiden Gehirnhälften erfordern Sprache, Sprechvermögen, kognitives Denken und auch die detailreiche Raumwahrnehmung, die mit zu den umfassendsten Gehirnfunktionen zählt.

Die Bezirke, die keine direkte Verbindung zur Sensorik oder Motorik haben, sind Teile des frontalen, parietalen und temporalen Kortex. In der aufsteigenden Tierreihe nimmt der assoziative Kortex quantitativ am stärksten zu. Während bei der Ratte noch über 90% des Kortex direkte sensorische Eingänge oder motorische Ausgänge haben, ist dieser Anteil beim menschlichen Kortex auf weniger als 10% reduziert.

Teile des orbitofrontalen Kortex und der vordere Anteil des Temporallappens werden zum limbischen Kortex gerechnet, der mit den subkortikalen Strukturen des limbischen Systems eine funktionelle Einheit bildet. Dort lokalisierte Läsionen führen zu einer Verflachung der

Emotionen. Der temporale Anteil des limbischen Kortex erfüllt eine wesentliche Funktion bei der Speicherung und beim Abruf von Gedächtnisinhalten.

Voraussetzung dafür, dass der Mensch sich normalerweise in seiner gewohnten Umgebung sehr gut zurechtfindet, ist eine interne Vorstellung des ihn umgebenden Raumes; fällt diese interne Repräsentation bei einer parietotemporalen Läsion der nichtdominanten Hemisphäre aus, so hat der Patient größte Schwierigkeiten, sich im Raum zu orientieren.

Als kognitive Funktionen werden unter anderem Aufmerksamkeit, Erkennen, Orientierung, Sprache, abstraktes Denken und die Fähigkeit zur sozialen Interaktion zusammengefaßt. Sie können nicht punktförmig im Kortex lokalisiert werden, sind aber an die normale Funktion bestimmter Kortexareale gebunden. Analog zur Agnosie auf der sensorischen Seite können sich Ausfälle auf der motorischen Seite in diesem Bereich als Apraxie äußern (9,34,38,41,85,88,112).

### **3.3 Die Integration der Sinne**

Das Zentrum jeglicher Integration der Sinne bei den niederen Tieren, Vorfahren der heute lebenden Tiere wie auch des Menschen, stellte die *Formatio reticularis* dar, die alle anderen Teile des Gehirns in ihrer Funktion zu einem Ganzen vereint. Es bestand Kontakt zu allen anderen Neuronen des Nervensystems, jede Körperinformation erreichte die *Formatio reticularis*, wie sich auch umgekehrt reticuläre Impulse diffus im ganzen Organismus ausbreiteten; auf diese Weise waren einige wenige Neuronen in der Lage, vielerlei verschiedene Aufgaben zu erfüllen.

Für die Entwicklung entsprechender Anpassungsreaktionen wurde sehr bald das Gleichgewichtssystem ausgebildet und es setzte seine Entwicklung in Verbindung mit dem reticulären System bis zum Erscheinen des Menschen fort. Aus diesem Grund verfügt das menschliche vestibuläre und reticuläre System auch zum jetzigen Zeitpunkt noch über diese weit verzweigten nervösen Verflechtungen, die sich bei den niederen Tieren entwickelt hatten (7,18).

Ein Teil der Sinneswahrnehmungen wird zur weiteren Verarbeitung dem Thalamus zugeleitet und die sensorische Integration in den Großhirnhemisphären vollendet, wo alle Informationen der Sinnesrezeptoren, etwa von Augen und Ohren, zusammenkommen und zu eindeutigen Wahrnehmungen und Vorstellungen weiterverarbeitet werden. Ohne entsprechende vestibuläre Stimulation während der Kindheit käme beispielsweise eine richtige Entwicklung

des Sehvermögens gar nicht erst zustande, da das Sehzentrum in der Hirnrinde unzählige Impulse seitens des vestibulären Systems empfängt.

Einfache vestibuläre und reticuläre Tätigkeiten konnten bereits lange vor der Entwicklung der entsprechenden Systeme für Muskeln und Gelenke und der komplexeren auditiven und visuellen Wahrnehmungssysteme verrichtet werden. Diese jüngeren Systeme gingen aus der entwicklungsgeschichtlich älteren *Formatio reticularis* hervor. Das vestibuläre System übte dabei großen Einfluß auf die Evolution der jüngeren Systeme aus, was einen der Gründe darstellt, warum vestibuläre Stimulierung zu einer Verbesserung der Sprach- und Leseleistungen führen kann (7,18,82).

Eine Hauptaufgabe der Neuronen ist darin zu sehen, den Menschen mit Informationen über seinen Körper und seine Umgebung zu versorgen, Handlungen und Gedanken entstehen zu lassen und sie dann in die richtigen Wege zu leiten. Rückenmark, Hirnstamm, Kleinhirn und die Großhirnhemisphären benutzen den sensorischen Input, die durch Sinneseindrücke entstandene Nervenerregung in Form eines Stromes von elektrischer Energie, die von den Rezeptoren in den einzelnen Organen ausgeht, um Bewußtsein, Wahrnehmung und Wissen zu entwickeln, darüberhinaus die Körperhaltung und die Körperbewegungen aufrechtzuerhalten, sowie um die Planung und Koordination von Bewegungen, von Gefühlen und Gedanken, aber auch die Erinnerung und Lernfähigkeit zu steuern.

Über 80% des Nervensystems sind an der Verarbeitung oder Gliederung der sinnlichen Wahrnehmung oder des sensorischen Inputs beteiligt, weshalb Jean Ayres das menschliche Gehirn als „Verarbeitungsmaschine“ sinnlicher Eindrücke bezeichnet (7, S 46). Da die unterschiedlichen Arten sensorischer Wahrnehmung sich untereinander über das ganze Gehirn verteilt mischen, stellt die Verarbeitung von Sinneswahrnehmungen einen extrem komplexen Vorgang dar.

Veranlaßt von den elektrischen Impulsen in den Motoneuronen, die die im Gehirn entsprechend der Wahrnehmungsverarbeitung produzierte Informationsreaktion zu den betreffenden Organen im Körper übertragen, kontrahiert sich in der Folge zum Beispiel ein Muskel. Um beispielsweise Augen oder Kopf in eine bestimmte Richtung zu bringen, um etwas sehen oder Gegenstände geschickt handhaben zu können, müssen zahlreiche Muskelkontraktionen kombiniert werden. Für eine harmonische und somit wirksame Zusammenarbeit müssen die Aktivitäten im Gehirn geordnet ablaufen; dieser Prozeß des Ordners und Verarbeitens sinnlicher Eindrücke zu einer vollständigen und umfassenden Hirnfunktion wird als sensorische Integration bezeichnet (7,9,18,88).

### **3.4 Die Entwicklung der Sehfunktion**

H. Berger, der Entdecker des EEG's, stellte um die Jahrhundertwende fest, dass die Sehrinde bei neugeborenen Hunden und Katzen in ihrer Entwicklung gestört wurde, wenn in den ersten Monaten nach der Geburt die Augenlider zugenäht wurden und schloß daraus, dass Außenreize bleibende morphologische Veränderungen am ZNS herbeiführen.

Dies erklärt, warum bei Wildtieren verschiedene Großhirnbereiche wie z.B. die Sehrinde stärker ausgebildet sind als bei Haustieren. Fehlt bei der Katze bis zur 16. Lebenswoche die visuelle Stimulation, so wird der Aufbau der Sehrinde irreversibel gestört und es resultiert eine zentrale Erblindung; man spricht von der Prägungsphase. Außer der Lichtreizung zwischen der 4. und 16. Lebenswoche ist für das Sehvermögen zuvor eine Triggerphase mit unterschwelligem Stimulationen notwendig.

Weiter konnte festgestellt werden, dass äußere Reize die lokale Hirndurchblutung steigern, die Zahl der Synapsen erhöhen und die Proteinsynthese der Nervenzellen anregen. Sie steigern die Konzentration von Transmittern und fördern die Aussprossung von Dendriten (88).

Nachfolgend soll näher auf die Entwicklung der Sehfunktion unter besonderer Berücksichtigung von Umweltfaktoren, deren Bedeutung, wie oben genanntes Beispiel zeigt, keinesfalls unterschätzt werden darf, eingegangen werden.

#### **3.4.1 Der Einfluß von Umweltfaktoren auf die Entwicklung der Sehfunktion**

Experimente haben bewiesen, dass Kinder vom ersten Tag an sehen und hören können. Aufgrund der noch mangelhaft entwickelten Struktur der Sinnesorgane nach der Geburt wird es sich jedoch wohl um vage, vorgestaltliche, konturlose Eindrücke handeln. Bereits ein Neugeborenes ist in der Lage, Gegenstände im Abstand von 25-50 cm wahrzunehmen, dem Abstand, in dem das Baby beim Füttern das Gesicht seiner Mutter vor sich sieht. Schon mit 2 Wochen betrachtet ein Baby das Gesicht seiner Mutter länger, als das einer fremden Frau, von

der es sich eventuell sogar abwendet. Der Blick ist zunächst noch starr und bewegt sich nur ruckweise (82).

### **Visuelle Deprivation**

Bei höheren Säugetieren beeinträchtigt der Entzug visueller Erfahrung während der Frühentwicklung die Wahrnehmungsleistung bleibend. Wie beim Menschen ist die visuo-motorische Koordination, etwa das Greifen nach Objekten, gestört und die Sehschärfe ebenso wie das Unterscheidungsvermögen für Muster deutlich herabgesetzt. Bei Katzen beträgt die Dauer der kritischen Phase, in der das Sehsystem unter dem Einfluß von Umweltreizen zur vollen Funktionstüchtigkeit ausreift, etwa drei Monate, bei Primaten circa ein Jahr. Kommt der Gesichtssinn bis dahin nicht normal zur Anwendung, so sind die aufgetretenen Schäden weitgehend irreversibel. Während der kritischen Phase genügt bereits eine Deprivation von 12-24 Stunden Dauer, um zu einer meßbaren Verschlechterung der Sehleistung des deprivierten Auges zu führen, wird die visuelle Erfahrung jedoch erst nach Ablauf der kritischen Phase entzogen, so bleiben die bereits entwickelten Sehfunktionen erhalten (84).

### **Orientierungs- und Richtungsselektivität der Sehrinde**

Bei jungen Katzen unterscheiden sich die Sehrinden- Neuronen unmittelbar nach dem Öffnen der Augen in der zweiten Lebenswoche, also zu Beginn der kritischen Phase, in ihren funktionellen Eigenschaften noch deutlich von denen visuell erfahrener, erwachsener Tiere, was in erster Linie daran liegt, dass den meisten Neuronen die für die ausgereifte Sehrinde so charakteristische Orientierungs- und Richtungsselektivität noch fehlt. Nur etwa ein Siebtel besitzt sie schon von Anfang an; die Zellen gehören vermutlich einer Klasse von Neuronen an, die direkt von den thalamischen Fasern erregt werden. Wenn die Tiere in normaler Umgebung aufwachsen, entwickeln sämtliche Sehrinden- Neuronen innerhalb weniger Wochen ihre typischen funktionellen Eigenschaften, werden die Tiere jedoch im Dunkeln und somit ohne visuelle Erfahrung aufgezogen, reifen keine normalen rezeptiven Felder aus. Zudem nimmt der vorhandene Prozentsatz orientierungsselektiver Neuronen ab, und bei

fortdauerndem Erfahrungsentzug verschlechtert sich auch die Erregbarkeit der Sehrinden-Zellen allgemein. Nach einigen Monaten reagieren nur noch 30- 40% auf Licht.

Auch in ihrem Sehvermögen sind die Tiere stark eingeschränkt. Kommen sie erst nach Ablauf der kritischen Phase in eine normale Umwelt, so reagieren ihre Sehrinden- Zellen zeitlebens anomal und auch die Sehleistung verbessert sich kaum, was die These widerlegt, dass frühkindliche Erfahrung angeborene Leistungen lediglich erhält und stabilisiert. Volle Funktionstüchtigkeit stellt sich nicht von Anfang an ein, wie auch die Strukturen im Gehirn sie nicht etwa nur mangels Gebrauch - einer Muskelatrophie vergleichbar - einstellen. Erfahrungsentzug bringt vielmehr den Entwicklungsprozeß selbst auf einer unreifen Stufe zum Stillstand (84,85).

### **Beeinträchtigungen der Sehfunktion**

Als Folge von Infektionen und Verletzungen des Auges trüben sich Hornhaut und Linse oft so stark, dass davon betroffene Kinder vollständig ihre Sehfähigkeit einbüßen. Das Sehsystem erhält dann keine Eingänge; man spricht von visueller Deprivation. Wenngleich sich durch mikrochirurgische Techniken der optische Teil des Auges weitgehend instandsetzen läßt, führt die Wiederherstellung nahezu normaler optischer Verhältnisse dennoch nicht zur Sehfähigkeit, wenn die Trübung seit der Geburt oder den ersten Lebenswochen bestanden hatte und die Patienten erst nach Erreichen des Schulalters operiert worden waren, da das Gehirn dieser Patienten unfähig bleibt, die von den Augen wieder einwandfrei übermittelten Signale zu verarbeiten. Vielmehr empfinden sie visuelle Signale als laut oder gar schmerzhaft und bleiben unfähig, die aus den Augen kommenden Signale zu bildhaften Eindrücken zu ordnen. Diese Störungen beruhen auf Fehlverschaltungen der Hirnrinde, denn sowohl die Netzhaut des Auges als auch die Übertragungsverhältnisse im visuellen Thalamus, dem Corpus geniculatum laterale, sind unbeeinträchtigt. Grundlage dieser Störung ist die fehlende Optimierung der kortikalen Verschaltungen innerhalb der hierfür vorgesehenen Entwicklungsphasen.

Aus dem Vergleich zahlreicher Krankengeschichten geht hervor, dass die für die Ausbildung der Sehfunktionen kritische Phase etwa bis zum Schulalter reicht. Sehleistungen, die sich bis dahin nicht entwickelt haben, können auch später nicht mehr erworben werden. Was sich im Erwachsenenalter wahrnehmen läßt, hängt also ganz entscheidend von der Art frühkindlicher Erfahrung ab.

Bei Fehlstellungen der Augen, beim Schielen etwa, geht die Beidäugigkeit der Sehrinden-Neuronen völlig verloren, da sich die beiden Netzhautbilder nicht mehr in Deckung bringen lassen; die meisten Neuronen in der Sehrinde werden dann einäugig. Eine annähernd gleich große Zahl von Neuronen ist entweder nur noch vom rechten oder vom linken Auge aus erregbar, weshalb auch die Signale von beiden Augen nicht gleichzeitig verarbeitet werden. Wird also bei schielenden Kindern die Fehlstellung nicht schon während der ersten Lebensjahre chirurgisch oder durch intensive Sehschulung behoben, so lernen die Kinder nie mehr, mit beiden Augen gleichzeitig zu sehen (82,83,84,85).

### **Entwicklungsfaktoren**

Wie sich gezeigt hat, ist die Verschaltung zwischen den Augen und den zuständigen Nervenzellen in der Sehrinde im Wesentlichen genetisch festgelegt ist, wenn auch zunächst relativ ungenau. Den epigenetischen, also außergenetischen Faktoren kommt hierbei vorwiegend die Aufgabe zu, in diesem genetisch vorgegebenen Repertoire geeignete, also adäquat aktivierte Verbindungen auszuwählen und zu festigen, andere hingegen abzukoppeln. Diese erfahrungsabhängigen Entwicklungsprozesse haben, zumindest auf einer deskriptiven Ebene, alle Eigenschaften eines Lernvorgangs. Während der Entwicklung des Nervensystems werden in aller Regel weit mehr neuronale Verbindungen angelegt, als im ausgereiften System letztendlich übrigbleiben. Viele der ursprünglich angelegten Verbindungen werden im Laufe der normalen Entwicklung wieder abgekoppelt; die entsprechenden Nervenzellen sterben bisweilen ab.

Der Augenabstand wie auch die Größe der Bulbi ändern sich während der postnatalen Entwicklung fortlaufend und in der Folge auch die Korrespondenzverhältnisse zwischen den beiden Netzhäuten. Voraussetzung für räumliches Sehen ist, dass Nervenzellen in der Hirnrinde hochselektiv nur mit jeweils denjenigen Ganglienzellen in beiden Augen verbunden werden, die in korrespondierenden Netzhautbereichen liegen und somit Signale vom gleichen Ort im Gesichtsfeld erhalten. Die Selektion dieser Verbindungen erfolgt nach der Geburt unter dem Einfluß visueller Signale aus der Umwelt. Von den vielen im Überschuß angelegten zentralnervösen Verbindungen werden selektiv nur jene konsolidiert, die ähnliche Aktivierungsmuster aufweisen, die anderen werden wieder aufgelöst. Sensorische Signale führen jedoch nur dort zu selektiven Veränderungen, wo sie den vorgegebenen Antwortigenschaften der betroffenen Nervenzellen entsprechen. Angeborene, durch die

jeweilige Verschaltung festgelegte Reaktionsweisen der Zellen werden mit der Aktivität von der Netzhaut verglichen und, sofern die sensorischen Signale der „Erwartung“ der Sehrinden-Neuronen entsprechen, die betreffenden Bahnen gefestigt; ist dies nicht der Fall, so bleiben selektive Änderungen in der Verschaltung, abgesehen von einer allgemeinen Verschlechterung der synaptischen Übertragung, aus. Eine Modifikation von Verbindungen zur Sehrinde ist allerdings nur dann möglich, wenn die Stellung der Augen und der Aufmerksamkeitszustand dies zulassen; Verschaltungsänderungen treten nur auf, wenn das Gehirn wach ist und seine Aufmerksamkeit auf die Sinnessignale lenkt (7,17,82,83,84,85,88).

### **Kontrollsysteme**

Überwacht werden Veränderungen in der neuronalen Verschaltung von global organisierten Kontrollsystemen, für die Noradrenalin und Acetylcholin die Überträgersubstanzen darstellen. Die cholinergen Afferenzen stammen hierbei in erster Linie vom Meynert- Kern im basalen Vorderhirn, während die noradrenerge Projektion ihren Ursprung im Locus coeruleus nimmt. Im Falle einer Inaktivierung dieser beiden Projektionssysteme vermögen Sinnessignale keine Verschaltungsänderung mehr zu induzieren.

Rückmeldungen über die Position der Augäpfel beispielsweise üben eine wichtige Kontrollfunktion bei der erfahrungsabhängigen Optimierung der Sehrinden- Verschaltung aus, wie auch zentrale Kontrollsysteme den Wachheits- und Aufmerksamkeitszustand regulieren. Deren Aktivität spiegelt zentrale Zustände wie Wachheit, Aufmerksamkeit und Motivationslage wider. Zu ihnen gehört eine Vielzahl kompliziert organisierter Strukturen im Mittel- und Zwischenhirn, die über ein weitverzweigtes Netz von Bahnen die Erregbarkeit der thalamischen Schaltkerne und der Hirnrinde modulieren (85).

### **Assoziation von Neuronengruppen**

Letztlich handelt es sich um 3 Kriterien, die die erfahrungsabhängige Assoziation bestimmter Neuronengruppen bestimmen. Dies sind zum einen die genetisch vorgegebene Grundverschaltung der Nervennetze und die dadurch festgelegten Antworteigenschaften der einzelnen Nervenzellen, zum anderen die Struktur der visuellen Umwelt, mit welcher das Gehirn über seine motorischen und sensorischen Organe in Wechselwirkung tritt, und

schließlich der jeweilige Aktivitätszustand des Gehirns während seiner Interaktion mit der Umwelt. Die Rolle epigenetischer Faktoren beschränkt sich darauf, aus einem genetisch vorgegebenen Repertoire auszuwählen. Da diese aktivitätsabhängigen Selektionsvorgänge ganz bestimmte Neuronengruppen auf Dauer miteinander assoziieren, können sie als Speichervorgänge bzw. Lernprozesse aufgefaßt werden, die mittels struktureller Änderungen Wissen über die statistischen Eigenschaften vorangegangener Aktivierungsmuster konservieren (17,84,85).

### **3.4.2 Die Auswirkung aktiver Bewegung auf die Entwicklung der Sehfunktion**

In einem Experiment wurden neugeborene Kätzchen in einem geräumigen Käfig an ein Gerät angeschlossen. Dabei konnten einige von ihnen sich im Käfig frei bewegen und die Geräte dabei mit sich herumziehen, während es den anderen nur möglich war, passiv auf den Geräten zu sitzen. Zwar wurden sie getragen, aktiv im Käfig umher liefen sie jedoch nicht. Innerhalb des Käfigs hatten zwar beide Versuchsgruppen die gleichen optischen Eindrücke, jedoch zeigte sich, dass diejenigen Kätzchen, die passiv bewegt wurden, Sehvermögen zwar entwickelten, aber dieses nicht zum sinnvollen Einsatz ihrer Bewegungen nutzen konnten. Die jungen Katzen hingegen, die sich aktiv bewegten, entwickelten sich völlig normal.

Dies legt den Schluß nahe, dass passive Bewegungen und Sehvermögen allein nicht ausreichen; vielmehr muß das Individuum seine eigenen Bewegungen vollführen, damit es den Sehvorgang mit der Reizverarbeitung durch Bewegungen kombinieren kann. Von ihren Geräten befreit, begannen nämlich auch diejenigen Kätzchen, die passiv herumgetragen worden waren, sich völlig normal zu bewegen und alle nötigen Funktionen zu entwickeln (39).

Raumwahrnehmung, die sehr präzise und über längere Zeit hinweg stabil ist, und visuell gesteuertes Handeln sind auf längere Sicht nicht von endgültig fixierten optischen Regelmäßigkeiten bei der Abbildung von Gegenständen im Auge abhängig, weshalb sich auch das beim Aufsetzen einer Brille zunächst verzerrte Sehen innerhalb von ein bis zwei Tagen gibt; das Zentralnervensystem paßt sich an die neue Situation an. Bereits im 19. Jahrhundert untersuchte Hermann von Helmholtz erstmals Richtungsverschiebungen in der visuellen Abbildung durch Prismen, anhand derer sich experimentell eine Transformation im Sinne einer visuellen Verzerrung hervorrufen läßt.

Ebenso kann die wahrgenommene Richtung von Geräuschen apparativ verschoben oder verzerrt werden. Können während eines derartigen Versuchs die willkürlich gesteuerten Muskeln eingesetzt werden, so ist die Testperson in der Lage, sich relativ schnell an genannte

Verzerrungen anzupassen, was veranschaulicht, dass die Wahrnehmungsadaptation nicht nur Veränderungen der Art beinhaltet, wie die sensorischen Teilsysteme des Gehirns von Auge oder Ohr zugeleitete Informationen verarbeiten, sondern dass die motorischen Teilsysteme in den Anpassungsprozeß integriert sind. Die Anpassung fällt dabei stärker aus, wenn die Probanden sich selbst aktiv bewegen, schwächer dagegen, wenn sie passiv bewegt werden (39,42,94).

In einem Experiment wurden Versuchspersonen aufgefordert, Prismengläser zu tragen, durch die sie alle Gegenstände als auf dem Kopf stehend wahrnahmen. Nach einiger Zeit konnte sich das Gehirn an diese verkehrten Seheindrücke adaptieren, die Umwelt schien wieder richtig herum zu stehen. Hierzu in der Lage waren aber, wie sich zeigte, nur diejenigen Versuchspersonen, die, indem sie sich während dieser Zeit aktiv bewegten, das, was sie sahen, mit dem, was sie berührten und fühlten, durch ihre Bewegungen in Beziehung zueinander setzen konnten.

Eine entscheidende Rolle bei aktiver Bewegung spielt also die Korrelation zwischen Signalen aus dem motorischen Nervensystem und solchen, die durch die dabei erzeugte sensorische Rückmeldung entstehen. Diese Korrelation beruht einerseits auf der kausalen Verknüpfung zwischen einer Bewegung und ihrer Rückmeldung, andererseits auf der Tatsache, dass in einer konstanten Umgebung für jede Bewegung auch ein Rückmeldesignal existiert; in einer unbeständigen Umgebung, in der sich Objekte bewegen, oder der Betrachter passiv bewegt wird, reduziert sie sich, da mehrere Rückmeldungssignale mit einer einzelnen Bewegung verbunden sein können (24,39,94).

### **3.5 Die Blicksteuerung**

Das menschliche Auge kann von den Bildern, die es aufnimmt, nur wenig mehr verstehen als eine Kamera. Erst im Gehirn werden diese Bilder in vielen Verarbeitungsschritten analysiert, interpretiert und verstanden, weshalb auch bei intakten Augen Wahrnehmungsschwierigkeiten auftreten können.

Rund 40% der Hirnrinde sind mit der Verarbeitung der Signale der ca. 120 Millionen Sinneszellen pro Auge und mit der Steuerung der Augenbewegung beschäftigt. Daher können auch experimentell aus den Augenbewegungen Rückschlüsse auf die Arbeit verschiedener Hirnareale gezogen werden.

René Descartes entwickelte im Jahre 1626 eines der frühesten Modelle des Steuerungssystems der Augenbewegungen indem er erkannte, dass für die Bewegungen des Auges die koordinierte Bewegung von mindestens zwei Muskeln erforderlich ist, nämlich die eines Agonisten, der sich zusammenzieht und die Drehkraft für die Bewegung der Augen liefert, und die eines Antagonisten, der sich entspannt und dabei verlängert. Sein Prinzip der reziproken Innervation eines Muskelpaares wurde allerdings erst im Jahre 1963 am Massachusetts Institute of Technology wieder aufgegriffen und für die Modellbildung benutzt (8,34,40,41).

Die Blicksteuerung, und dabei vor allem die willentliche Komponente, die von höheren Hirnfunktionen gesteuert wird, zeigt eine deutliche Altersentwicklung, besonders während der ersten Schuljahre, denn bei einigen Kindern entwickeln sich manche Komponenten der Blicksteuerung langsamer oder schwächer als bei gleichaltrigen Kontrollpersonen.

Besonders betroffen ist die vom Frontalhirn gesteuerte willentliche Komponente. Ca. 20-50% der legasthenischen Kinder, etwa 50% der rechenschwachen Kinder und der Kinder mit einem Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom zeigen Schwächen bei der Blicksteuerung, doch auch Kinder mit anderen Entwicklungs- und Lernstörungen sind auf diesem Gebiet von Rückständen betroffen.

Hier muß mittels eines Trainings der Blicksteuerung und mit Hilfe nachfolgender pädagogischer Förderung angesetzt werden, um beispielsweise das Lesenlernen und das Erlernen der Rechtschreibung zu vereinfachen bzw. erst zu ermöglichen. Schulische Lernprozesse können darüber hinaus auch durch Instabilitäten der Blickrichtung und der beidäugigen Koordination durch unkontrollierte kleine Augenbewegungen, Schwächen in der visuellen Simultanerfassung und der sprachfreien auditiven Hörverarbeitung beeinträchtigt werden (30,88,99).

## **Der Blickpunkt**

Beim aktiven Abtasten der Umwelt bewegt der Mensch seine Augen jeweils so, dass das zu analysierende Objekt auf die Fovea centralis, die sich in der Mitte des gelben Flecks befindet und die Stelle schärfsten Sehens darstellt, projiziert wird, wobei der Punkt, auf den die Augen gerichtet sind, als Blickpunkt bezeichnet wird. Da berücksichtigt werden muß, dass sich die Umwelt auch räumlich in die Tiefe erstreckt, ist der Blickpunkt nicht nur durch die

Winkelbewegung des Auges in der Richtung, sondern auch durch die Akkomodations- und Konvergenzbewegung in der Tiefe determiniert (8,97).

### **Konvergenzbewegungen**

In vergleichsweise langsamen, gleitenden Konvergenzbewegungen, die erfolgen, wenn zwischen nahen und entfernten Zielen hin- und hergesehen wird, drehen sich beide Augen so gegeneinander, dass sich ihre optischen Achsen im betrachteten Gegenstand schneiden. Sie entstehen, indem die Motoneurone, die die Augenmuskeln innervieren, die Häufigkeit der Signale, die zum Agonisten laufen, erhöhen und im Gegenzug die Signalfrequenz für den Antagonisten verringern. Von den Sakkaden, auf die weiter unten eingegangen werden soll, unterscheiden sich die Konvergenzbewegungen in der Art, in der ihre Maximalgeschwindigkeit und ihre Dauer vom Ausmaß der Bewegung abhängen (8,40).

### **Akkomodationsbewegungen**

Akkomodationsbewegungen entstehen durch Verformungen der Augenlinse mittels der Ciliarmuskeln und dienen der Nah- bzw. Ferneinstellung des Auges in einem Abstandsbereich, der beim Normalsichtigen zwischen 10 cm und 5-6 m beträgt. Da sich die Blicklinien der beiden Augen immer im angeblickten Punkt schneiden, muß sich bei unterschiedlicher Distanz zwischen dem angeblickten Objekt und dem Auge die Konvergenz der Blicklinien ändern; Abweichungen von den gesetzmäßigen Bewegungen werden dabei als Schielen bezeichnet. Bei der Einstellung der Augen auf ein Objekt im Gesichtsfeld werden die erforderlichen Akkomodations- und Konvergenzbewegungen automatisch geregelt; es gelingt nur bei hoher Konzentration, die Augen unabhängig von einem Sehobjekt zu bewegen, das heißt, den Blickpunkt in den freien Raum zu verlagern, was als willkürliches Schielen bezeichnet wird (8,40).

### **Sakkaden**

Da die Augen nur in einem Bruchteil des Gesichtsfeldes scharf sehen können, tastet der Mensch seine Umgebung mit 2-5 Blicksprüngen pro Sekunde ab, die vom Gehirn, das auch die Einzelbilder zu einem Gesamteindruck verschmelzen lässt, gesteuert werden.

Die eigentlichen „willkürlichen“ Augenbewegungen verlaufen in den beiden Hauptraumrichtungen des Gesichtsfeldes nicht kontinuierlich, sondern sprunghaft oder sakkadisch über drei Muskelpaare. Für die gerade foveal abgebildeten Dinge stehen sehr viele Nervenzellen zur Verfügung, für weiter entfernt in der Peripherie liegende Dinge dagegen vergleichsweise wenige. Aus diesem Grund werden sie nur schlecht gesehen oder erkannt, weshalb die Augen ständig mit mehr oder weniger großen Blicksprüngen, den Sakkaden, hin- und herbewegt werden müssen, wenn das gesamte Gesichtsfeld erfasst werden soll. Beim Abtasten komplexer Objektbereiche verlaufen diese Augenbewegungen weder systematisch noch beliebig, sondern sie werden durch die Struktur der Objekte gesteuert. Ebenso erfolgt beim Lesen das Abtasten einer Zeile nicht kontinuierlich, sondern die Augen erfassen in Sprüngen weiter laufend immer kurze Satzabschnitte simultan, damit die Abbildung stets auf die Fovea centralis trifft.

Ein optischer Reiz, der eine Sakkade auslöst, aktiviert vor allem den Colliculus superior, das neben dem motorischen Kortex gelegene frontale Augenfeld und den hinteren Parietalkortex, der an der Steuerung der visuellen Aufmerksamkeit beteiligt zu sein scheint. Die verstärkte Aktivität, die sich dort beim Fixieren eines Punktes beobachten läßt, deutet einen neuronalen Prozeß an, mit dessen Hilfe Gegenstände der visuellen Welt ausgewählt und zum Ziel von Sakkaden gemacht werden

### **Pro-, Anti- und Express- Sakkaden**

Unterschieden werden Pro- Sakkaden, die auf ein visuelles Ziel gerichtet sind, Anti-Sakkaden, die in die Gegenrichtung des Reizes gerichtete Blicksprünge darstellen, im Alltag allerdings nicht auftreten, sondern im Experiment erzeugt werden, und reflexive Sakkaden, die auch als Express- Sakkaden bezeichnet werden, da sie Pro- Sakkaden von extrem kurzer Reaktionszeit darstellen.

Am schnellsten sind die Express- Sakkaden, die, anders als die „gewöhnlichen“ Sakkaden, ohne Mitwirken des frontalen Blickfeldes vom Colliculus superior erzeugt werden. Anti-Sakkaden können nicht der Gruppe der Express- Sakkaden angehören; sie benötigen darüber hinaus einen intakten frontalen Kortex. Reflexive Blicksprünge auf überraschend

auftauchende Dinge werden von anderen Hirnstrukturen erzeugt als bewusste willentliche Blicksprünge.

Normalerweise dauert jede dieser Sakkaden, von denen eine normalsichtige Person etwa 2-5 pro Sekunde durchführt und deren Größe zwischen 2 und 10 Grad variiert, weniger als 50 Millisekunden, was etwa 20.000 Blicksprüngen pro Tag entspricht. Dabei erreicht das Auge je nach Sprungweite Geschwindigkeiten von bis zu 600 Winkelgrad pro Sekunde, wobei sich jedesmal das Bild auf der Netzhaut verschiebt. Dennoch wird diese Verschiebung nicht wahrgenommen, die Welt erscheint als ruhend.

In der Zeit zwischen zwei Sakkaden, während der Blick das gewählte Ziel fixiert, müssen alle Informationen aufgenommen werden, die zum bewußten Sehen führen. So wird das Gesamtbild gleichsam durch viele nacheinander von der Netzhaut aufgenommene Teilbilder im Gehirn zu einer einheitlichen Wahrnehmung zusammengesetzt, die kontinuierlich erfolgt, indem jeder weitere Blicksprung und dessen Folge für das Netzhautbild berücksichtigt wird.

Auf diese Weise entsteht der Eindruck des Raumes um uns, in dem wir die Dinge nicht nur erkennen, sondern auch lokalisieren und ihre relative Lage zueinander und in Bezug auf uns selbst feststellen. Dies stellt die Voraussetzung dafür dar, dass wir uns im Raum bewegen können.

### **Fixationsprozesse**

Natürlich muß der Reflex auch kontrolliert und in den Dienst eines gesamten sensomotorischen Programms gestellt werden, Folge wäre sonst ein zwanghaftes Hin- und Herblicken. Gehemmt wird der Reflex durch den Fixationsprozess, mit dessen Hilfe der Blick auf einen bestimmten Reiz gerichtet und stabilisiert bleibt. Freigegeben zur nächsten Augenbewegung wird der Blick erst dann wieder, wenn der Fixationsprozess unterbrochen bzw. aufgehoben ist. Darüberhinaus muß der Blick auch dann stabil gehalten werden können, wenn gerade kein sichtbares Ziel existiert. Durch die Reflexkontrolle mittels der Sakkaden bleiben Dinge, die zumindest in die Nähe der Fovea und damit in den Vorzug der entsprechenden ausführlichen kortikalen Bearbeitung gekommen sind, dort auch für eine bestimmte Zeit, wohingegen Dinge, die noch zu weit entfernt sind, möglichst schnell weitertransportiert werden können.

Die Aufrechterhaltung der aktiven Fixation stellt eine Funktion des parietalen Kortex und des rostralen Teils des Colliculus superior dar, ein weiteres im wesentlichen subcorticales System

dient der reflektorischen Sakkadensteuerung (reflexive Blicksprünge) und ein frontales System der Erzeugung willentlich gesteuerter Blicksprünge. Dazu kommen die Kontrollfunktionen der Aufmerksamkeit, eine Funktion des parietalen Kortex.

Aktive Fixation und gerichtete Aufmerksamkeit hemmen die reflexhaften Blicksprünge. Für die Aufrechterhaltung und Steuerung der Fixation sind intakte tektale und parietale Strukturen notwendig, für die korrekte Funktion der Reflexe werden außer dem Hirnstamm die primäre Sehrinde und das Tektum benötigt, frontale Strukturen dagegen sind es, die die Willkürmotorik der Augen steuern.

Aus der Gesamtheit aller experimentellen und klinischen Beobachtungen ergibt sich das Bild eines Zyklus von Fixationen und Sakkaden, der allerdings in den Zusammenhang sinnvoller Handlungen eingebaut sein muß und kein Eigenleben entwickeln darf. Die dazu nötige Kontrolle übt das Frontalhirn aus. Ausfall oder mangelhafte Funktion eines oder mehrerer dieser Prozesse, sei es durch eingeschränkte Entwicklung, Verletzungen, Erkrankungen, Degenerationen, durch Medikamente oder Drogen, bewirken charakteristische Veränderungen der Blicksteuerung.

### **Korrekturbewegungen**

Sakkaden können über ihr Ziel hinausschießen. Der Augapfel wird dann durch eine anschließende zweite Sakkade oder durch eine als Glissade bezeichnete langsame, gleitende Korrekturbewegung, die über zweihundert Millisekunden dauern kann, in die richtige Position gebracht.

Besonders wenn es ermüdet ist, kann das Auge sein Ziel statt mit einer großen auch mit zwei kleineren, unmittelbar aufeinanderfolgenden Bewegungen, von denen jede den Charakter einer Sakkade hat, erreichen. Eine Sakkade verläuft ruckartig; entsprechend bestehen die Signale, die sie auslösen, aus zwei Teilen: Die Motoneurone, die den Agonisten versorgen, steigern ihre Signalfrequenz für kurze Zeit sehr stark und kehren dann zu einem, gemessen am Ausgangszustand nur noch leicht erhöhten Wert zurück; der Antagonist hingegen erhält für kurze Zeit überhaupt keine Signale mehr und dann, nach Ablauf des Impulses im Agonisten, Signale mit einer gegenüber dem Ausgangszustand verringerten Frequenz. Der Signalimpuls sorgt für die ruckartige Bewegung des Auges aus einer Stellung in die andere, und die danach leicht erhöhte Signalfrequenz im Agonisten hält das Auge in seiner neuen Position.

Es hat sich in Versuchen gezeigt, dass Kinder noch sehr wenig effektive willkürliche Kontrolle mittels Anti-Sakkaden über ihre Blickrichtung haben; sie scheinen ihren Reflexen noch sehr stark ausgeliefert zu sein. Vergleichsweise früh entwickelt ist dagegen das System zur Fixation. Schon Säuglinge im Alter von wenigen Monaten zeigen Anzeichen, dass sie ihren Blick fixieren können (8,10,21,26,34,48,76,96,112).

### **Pupillenbewegungen**

Eine weitere Form von Augenbewegungen sind die Pupillenbewegungen, wobei die Pupillen als "Blende" des Auges der konstanten Beleuchtung der Retina dienen. Die Regelung der Pupillenbewegung geschieht unwillkürlich nach Art eines Regelkreises. Dabei melden die entsprechenden Rezeptoren Abweichungen von der durchschnittlichen Beleuchtung der Retina an das Pupillenregulationszentrum, das wiederum über den Musculus dilatator pupillae und den Musculus sphincter pupillae, die als Stellglieder fungieren, solange die Pupillenweite korrigiert, bis sie dem Sollwert wieder entspricht (23).

### **Störungen der Blicksteuerung**

Patienten mit Läsionen im Bereich der frontalen Augenfelder fehlt die Fähigkeit zur Ausführung prädiktiver Augenbewegungen in Reizsituationen, wo der Ort des visuellen Reizes und damit auch die Richtung der bevorstehenden Augenbewegung vorhersagbar sind. Befindet sich die Läsion im Bereich des parietalen Kortex, so treten dagegen Schwierigkeiten auf, sich vom Fixationsziel zu lösen, wenn dieses sichtbar bleibt, während das Blickziel für die Sakkade erscheint. Die frontale Kontrolle der Reflexfunktion des Tektum erfolgt über die Stammganglien.

Die Augen von Legasthenikern weisen beim Lesen ungewöhnliche Muster auf. Heute weiß man, dass diejenige Komponente der Blicksteuerung, die durch das Frontalhirn bewerkstelligt wird, bei einer Großzahl der Legastheniker nicht altersgerecht entwickelt ist. Die reflexartigen Sakkaden und die Haltefunktion des Blicks dagegen sind nicht systematisch betroffen (8,30,97).

Für eine Beteiligung des hinteren Parietalkortex am Vorgang der visuellen Aufmerksamkeit und der Raumwahrnehmung sprechen klinische Befunde, die darlegen, dass Patienten, bei

denen diese Region auf der rechten Hirnseite verletzt ist, ganz deutlich dazu neigen, Gegenstände auf der linken Seite ihres Gesichtsfeldes nicht zu beachten. So können sie die Gegenstände zwar sehen, nicht jedoch ihre Aufmerksamkeit darauf richten. Der deutsche Maler Anton Räderscheidt hat diesen Ausfall auf eindrucksvolle Art und Weise in einer Serie von Selbstportraits dokumentiert. Nach einem Schlaganfall, der die Scheitelrinde auf der rechten Hirnseite geschädigt hatte, malte er sich auf dem ersten Selbstportrait am Anfang seiner Erholung ohne die linke Gesichtshälfte; später ergänzte er sie vollständig (38,41,97).

Die Arbeitsgruppe Optomotorik der Freiburger Albert- Ludwigs- Universität entwickelte ein Verfahren zur Prüfung der Blicktätigkeit, bei dem verschiedene einfache Einzelaufgaben so kombiniert werden, dass in einem Zeitraum von etwa 45 Minuten die 3 grundlegenden Blickfunktionen Fixation, Reflexe und willentliche Blicksteuerung im Hinblick auf standardisierte Normdaten getrennt überprüft werden können. Dazu müssen die Bewegungen der Augen mit einer zeitlichen Genauigkeit von 1/1000 Sekunde und einer räumlichen Auflösung von etwa 0,1 Grad gemessen werden. Die Messung erfolgt mittels Infrarotlicht durch Analyse des von den äußeren Augenmedien reflektierten Lichts.

Besonders bei teilleistungsgestörten Kindern hat sich dieses Verfahren als äußerst bedeutsam erwiesen, da andere neurophysiologische Untersuchungsmethoden in diesen Fällen kaum Auskünfte über die zugrunde liegenden sehr subtilen sensomotorischen Auffälligkeiten geben können. Auf die individuelle Untersuchung kann im Anschluß mit der gezielten Förderung der Kinder in entsprechenden Institutionen aufgebaut werden.

Interessanterweise nehmen die Versuchspersonen etwa die Hälfte der bei der Testung gemachten Fehler, sowohl der korrigierten, als auch der unkorrigierten, gar nicht bewusst wahr (122).

### **3.6 Grundlagen der Tiefenwahrnehmung**

Räumliches Sehen beruht darauf, dass beide Augen die sichtbare Welt aus leicht unterschiedlichen Blickwinkeln wahrnehmen. Die Augen konvergieren etwas, so dass sich ihre Sehachsen an einem Punkt der betrachteten Umwelt treffen; sie fixieren diesen Punkt, dessen Bild jeweils auf die Fovea centralis der Netzhaut fällt. Zu jedem Ort auf einer Netzhaut gibt es eine entsprechende korrespondierende Stelle auf der anderen Netzhaut.

Zusätzlich zum Fixationspunkt wird eine bestimmte Klasse von Sehobjekten, die auf einer geometrischen Figur im Raum, die als Horopter bezeichnet wird liegt, auf korrespondierende

Netzhautstellen abgebildet. Definitionsgemäß verläuft der Horopter durch den Fixationspunkt und durch die Knotenpunkte beider Augen und hat, je nach Entfernung des jeweils fixierten Punktes, einen unterschiedlichen Radius. Genauer betrachtet sind aber nicht Punkte, sondern korrespondierende Netzhautflächen einander zugeordnet, sogenannte Panum- Fusionsareale, in deren Bereich zwei Punkte auf den verschiedenen Netzhäuten zu einem bestimmten Sinneseindruck verschmolzen werden können. Jenseits dieser Areale beginnt der Bereich des Doppelsehens, der Diplopie. Innerhalb des Fusionsgebietes werden zwei Punkte auf der Netzhaut einerseits verschmolzen wahrgenommen, dienen aber andererseits funktionell als querdisperate Punkte dem verarbeitenden neuronalen System in der Hirnrinde als Grundlage zur Tiefenwahrnehmung.

Dabei wird ein Gegenstand als näher im Vergleich zum Horopter interpretiert, wenn die horizontale Abweichung, die Querdisparation, auf der Netzhaut nach temporal gerichtet ist, und als entfernter, wenn die Querdisparation nach nasal gerichtet ist. Zur Tiefenwahrnehmung ist die Fusion allerdings nicht unbedingt notwendig; so reicht der Bereich der Stereoskopie über das Panum- Areal in den Bereich des Doppelsehens.

In der primären Sehrinde existieren Zellen, die bei binokulärer Reizung auf bestimmte räumliche Disparitäten, genauer die Querdisparation, optimal abgestimmt sind und sich so als Tiefendetektoren eignen. Auch zeitliche Disparitäten können zur stereoskopischen Analyse verwendet werden. Ein in der Fixationsebene bewegtes Objekt erregt korrespondierende Netzhautstellen beider Augen zugleich; befindet sich jedoch ein nach links bewegtes Objekt vor dem Horopter, dann werden die Netzhautstellen in zeitlicher Reihenfolge rechts vor links erregt. Bewegt sich das Objekt hinter dem Horopter, so erfolgt die Erregung in umgekehrter Reihenfolge links vor rechts. Anhand richtungsspezifischer Zellen kann damit eindeutig entschieden werden, wo sich das bewegte Objekt im Raum relativ zum Horopter befindet.

Die primäre Sehrinde enthält Zellen mit der Fähigkeit zur Analyse zeitlicher Disparitäten der beschriebenen Art. Im Nahbereich sind die binokularen Mechanismen des Tiefensehens besonders wirksam, da dort bei entsprechenden Entfernungsunterschieden für das Gehirn meßbare Querdisparitäten auftreten, bei größeren Entfernungen dagegen werden die Disparitäten zu klein und monokulares Tiefensehen ist erforderlich. Dabei werden u.a. mit Hilfe der Verdeckung entfernter durch nähere Gegenstände und durch Erfahrungswerte über die Größe bekannter Objekte Rückschlüsse über deren Lage im Raum gezogen. Die monokulare Tiefenwahrnehmung kann jedoch im Vergleich zur binokularen leicht getäuscht werden.

Jeder benachbarte Punkt im Gesichtsfeld wird auf eine etwas vom Zentrum des schärfsten Sehens entfernt liegende Stelle der Netzhaut projiziert, wobei sich dieser Abstand im Allgemeinen in beiden Augen unterscheidet. Der Unterschied in den Abständen wächst dabei mit der Tiefe des Punktes im Gesichtsfeld relativ zum Fixationspunkt, was als binokulare Disparität bezeichnet wird.

Untersuchungen an Makaken und Katzen haben gezeigt, dass bestimmte Neuronen der Hirnrinde binokulare Disparitäten melden; für das Stereosehen ist es dann erforderlich, daraus auf die dreidimensionale Struktur zurückzuschließen. Diese Aufgabe besteht aus vier Einzelschritten: Zunächst muß in einem Netzhautbild eine Stelle im Raum gewählt werden, dann muß im anderen Netzhautbild dieselbe Stelle gefunden werden. Im Anschluß daran gilt es, die Positionen der beiden Punkte auf der Netzhaut zu vermessen und schließlich muß aus der Differenz zwischen den beiden Meßwerten die Entfernung zu der ausgewählten Stelle im Raum berechnet werden.

Für die beiden ersten Schritte ist es erforderlich, die Projektion desselben Punktes der realen Welt in beiden Augen zu finden. Blickt eine zusammenhängende Gruppe von Photorezeptoren in einem Auge längs der Sichtlinie auf einen bestimmten Fleck auf der Oberfläche des Objekts, so sind jene Photorezeptoren aufzuspüren, die im anderen Auge denselben Fleck im Blick haben. Aufgrund der binokularen Disparität befinden sie sich relativ zur Fovea centralis keineswegs an der gleichen Stelle, worin auch die Schwierigkeit liegt. Die sichtbare Welt zeichnet sich nämlich durch Oberflächen aus, die gut markiert sind, da sie zu charakteristischen Formen der Gegenstände gehören, die in bestimmten räumlichen Beziehungen zueinander stehen. Am Beginn des Sehens stehen jedoch lediglich Felder aus punktweise gemessenen Helligkeiten. Zunächst muß ein bestimmter Fleck auf einer Oberfläche nicht unbedingt von beiden Augen als gleich hell wahrgenommen werden. Entscheidender ist, dass auch Flecke, die weit auseinanderliegen, zufällig gleich hell erscheinen können. Auf diese Weise wäre leicht eine falsche Zuordnung möglich (23,49,74,76,77).

### **3.7 Die Verarbeitung von Tiefenbewegungen**

#### **Bewegung im Raum**

Es stellt sich die Frage, wie die in den Bildern enthaltene Information vom visuellen System verarbeitet wird, so dass es möglich wird, dass der Mensch durch Bewegungen seiner Gliedmaßen exakt und unverzüglich auf die Wahrnehmungen seiner Augen reagieren kann.

Darüber, wie die koordinierte Zusammenarbeit zwischen Augen und Gliedmaßen bei Bewegung durch den dreidimensionalen Raum zustande kommt, und ganz besonders darüber, wie eine in die Tiefe des Raumes gerichtete oder aus ihr kommende Bewegung, die offenbar im zweidimensionalen Netzhautbild nicht enthalten sein kann, wahrgenommen wird, liegt noch vieles im Unklaren, jedoch enthält auch ein zweidimensionales Bild Hinweise auf solche Bewegungen. So wird beispielsweise ein Objekt, das sich vom Beobachter entfernt, immer kleiner. Diese Begleiterscheinungen oder Reizkorrelate der Bewegung stellen die eigentlichen Reize für jene neuronalen Strukturen im Gehirn dar, die für die Wahrnehmung von Bewegung zuständig sind.

Das Gehirn zerlegt das auf der Netzhaut erzeugte Bild in eine Anzahl abstrakter Merkmale und verarbeitet diese getrennt und in parallelen Kanälen; verschiedene Gruppen von Nervenzellen reagieren dabei jeweils auf ganz spezifische Reizmerkmale optimal.

Im Sehfeld der Hirnrinde der Katze wurden richtungsempfindliche Nervenzellen nachgewiesen, die sich auch bei anderen Tierarten fanden und mit denen auch das visuelle System des Menschen ausgerüstet zu sein scheint. Solche Nervenzellen reagieren mit einer großen Signalfrequenz, wenn sich ein Objekt in einer bestimmten Richtung durch das Gesichtsfeld bewegt und feuern wesentlich schwächer, wenn der visuelle Reiz aus einer Bewegung in der entgegengesetzten Richtung besteht. Diese Beobachtungen stützen die Vorstellung von einem visuellen Sinneskanal, der vorzugsweise auf seitliche Bewegungen reagiert (38,77,91).

## **Größenänderungen**

Bei intaktem Sehvermögen werden die Informationen über eine Tiefenbewegung zu einem großen Teil aus dem Vergleich der Bilder, die auf der Netzhaut des rechten und des linken Auges entstehen, bezogen. Manche Personen jedoch sind in der Lage, auch nach dem Verlust eines Auges noch hervorragende dreidimensionale Leistungen zu erbringen, eine Tiefenbewegung also offenbar mit nur einem Auge wahrzunehmen.

Die mit einem bzw. mit beiden Augen wahrgenommenen Merkmale einer Tiefenbewegung werden anscheinend durch zwei verschiedene, wenngleich nicht unabhängige Mechanismen

verarbeitet. Beispielsweise kann die sich verändernde Größe eines Bildes auf der Netzhaut automatisch zur Wahrnehmung einer Tiefenbewegung führen, ein Phänomen, das etwa in Filmen ausgenutzt wird, wenn der Eindruck entstehen soll, ein Raumschiff oder Ähnliches bewege sich mit großer Geschwindigkeit durch die Tiefen des Weltraums.

Im visuellen System des Menschen existieren verschiedene Sinneskanäle, die vorwiegend auf Größenänderungen reagieren, wobei Helligkeitsunterschiede keinen Einfluß auf die Wahrnehmung der Größenveränderung nehmen. Diese Kanäle sprechen ausschließlich dann an, wenn sich gegenüberliegende Seiten eines Netzhautbildes in entgegengesetzte Richtungen bewegen und dies bis zu einem Sehwinkel von eineinhalb Grad. Anscheinend verarbeitet das Gehirn die Information über eine Größenänderung dadurch, dass, wenn zum Beispiel die Größe eines Bildes auf der Netzhaut anwächst, die Bewegungen gegenüberliegender Seiten Paare von neuronalen Systemen erregen, Filter, die auf Bewegungen in entgegengesetzter Richtung reagieren.

Immer wenn beide Systeme gleichzeitig erregt werden, kommt ein Untersystem in Gang, das auf Größenänderungen reagiert. Das Signal kann einer höheren Ebene des Gehirns als Größenänderung gemeldet, oder aber an ein System weitergegeben werden, das den Eindruck einer Tiefenbewegung hervorruft. Wie das visuelle System entscheidet, welche dieser beiden Interpretationen zutrifft, ist noch nicht vollständig geklärt, doch läßt sich mit Sicherheit sagen, dass, obwohl grundsätzlich sowohl die Möglichkeit besteht, dass ein Objekt größer wird, als auch, dass es sich nähert, im Alltag die letztere Deutung die wahrscheinlichere ist und darüber hinaus diejenige, die zu einer rascheren motorischen Reaktion führen wird. Solange also ein Objekt seine Gestalt nicht verändert, interpretiert das visuelle System eine Größenänderung offenbar dahingehend, dass sie durch eine Tiefenbewegung zustande gekommen ist.

In der Natur ist dieses Prinzip sehr sinnvoll, ja lebensnotwendig, denn ein Mensch oder Tier hätte kaum eine Überlebenschance, könnte sein visuelles System die Frage, ob ein Raubtier näher kommt oder nur sehr rasch dicker wird, nicht in kürzester Zeit beantworten (38,77).

## **Binokulares Sehen**

Sowohl Größenänderungen als auch Fließmuster stellen zwingende Hinweise für Tiefenbewegungen dar; sie können auch von einem Auge allein wahrgenommen werden, was die weiter oben bereits angesprochene Tatsache erklärt, dass manche Menschen, Piloten oder Ballspieler etwa, auch nach dem Verlust eines Auges oft noch herausragende Leistungen

vollbringen können. Nichtsdestotrotz spielen bei der Wahrnehmung von Tiefenbewegungen auch die Informationen, die uns nur mit Hilfe beider Augen zugänglich sind, eine bedeutende Rolle. Binokulares Sehen ist insbesondere für die Wahrnehmung der Position eines nahen Objekts in der Tiefe des Raums bedeutend. Reize, die von beiden Augen empfangen werden und zur Wahrnehmung einer Tiefenbewegung führen, werden durch einen anderen neuronalen Mechanismus verarbeitet, als diejenigen Reize, die die Wahrnehmung der Position eines Gegenstandes im Raum hervorrufen.

Zu Leonardo da Vincis Zeiten bereits war bekannt, dass in beiden Augen des Menschen, deren Pupillen ungefähr 6,5 cm voneinander entfernt sind, leicht unterschiedliche Bilder der Umgebung entstehen und dass aus diesem Grund ein Bild von einem dreidimensionalen Objekt nie ganz realistisch sein kann. Dennoch verstand man erst im neunzehnten Jahrhundert, wie das Gehirn den geometrischen Unterschied zwischen linkem und rechtem Netzhautbild nutzt.

1838 demonstrierte der englische Physiker Sir Charles Wheatstone der Royal Society in London die Rolle dieses Unterschiedes, der sogenannten Querdisparation oder binokularen Disparität, bei der visuellen Ortsbestimmung im Raum, indem er Bildpaare räumlicher Szenen erstellte, die den im linken und rechten Auge erscheinenden Bildern der Szenen entsprachen. Mit einem von ihm als Stereoskop bezeichneten Instrument brachte er die Zeichnungen eines Paares vor die „zugehörigen“ Augen. Für die meisten Betrachter, die durch das Stereoskop blickten, verschmolzen die Zeichnungen zu einem Bild, das sich in der Tiefe auszudehnen schien, womit bewiesen war, dass der geometrisch bedingte Unterschied zwischen den Bildern auf den Netzhäuten des rechten und des linken Auges ausreicht, um eine Ausdehnung in die Tiefe wahrnehmen zu können.

Im gleichen Jahr erfand der französische Maler Jacques Daguerre das erste praktisch anwendbare Verfahren zur Herstellung von Photographien, die von etwas verschiedenen Positionen aus aufgenommen worden waren; man bezeichnete sie ihm zu Ehren als Daguerreotypen. Mit ihrer Hilfe konnte Wheatstone zeigen, dass seine Entdeckung nicht nur für Strichzeichnungen galt. In den letzten Jahren schließlich wurden Wheatstones Arbeiten erweitert und es wurde nachgewiesen, dass das visuelle System die Netzhautbilder eines Gegenstandes Punkt für Punkt vergleicht, um das räumliche Objekt als Ganzes zu erfassen. Der Kanal, der die Wahrnehmung von Tiefe und Räumlichkeit vermittelt, reagiert somit stark auf den Unterschied zwischen den Bildern auf beiden Netzhäuten (77).

## **Bewegungsrichtungen und -geschwindigkeiten**

Das visuelle System des Menschen bezieht auch aus dem Verhältnis der Geschwindigkeiten, mit denen die Teilbilder eines Objekts über die Netzhäute der beiden Augen wandern, Informationen über die Richtung, in der sich das Objekt bewegt. So kann die Flugbahn eines Gegenstandes, der sich in der Tiefe bewegt, schnell und exakt anhand der unterschiedlichen Geschwindigkeiten bestimmt werden, mit denen die Bilder des Objekts über die Netzhaut des linken und rechten Auges wandern. Haben beispielsweise beide Bilder des Objekts die gleiche Richtung, so wird das Objekt am Kopf des Beobachters vorbeifliegen. Dagegen fliegt es direkt auf eines der beiden Augen zu, wenn sich nur ein Bild bewegt und das andere stehenbleibt. Verschieben sich die Bilder mit gleichen Geschwindigkeiten in entgegengesetzte Richtungen, so zeigt die Flugrichtung des Objekts zwischen die Augen. Bewegt sich ein Bild langsamer als das andere, so zielt die Bewegung des Objekts auf die linke oder rechte Seite des Beobachters. Die Unterschiede zwischen den Geschwindigkeiten und den Bewegungsrichtungen der Netzhautbilder zeigen somit die Tiefenbewegung des Objekts zuverlässig an. Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Bilder auf den beiden Netzhäuten und nicht die Änderung der Querdissipation, also des geometrisch bedingten Unterschieds zwischen den beiden Netzhautbildern, dienen vermutlich als Reiz für einen speziellen Kanal für die stereoskopische Wahrnehmung von räumlicher, also stereoskopischer Bewegung, unabhängig von den Kanälen, die bei der Betrachtung mit zwei Augen auf seitliche Bewegungen reagieren (38,77).

## **Verarbeitungskanäle**

Für stereoskopische, zum Kopf gerichtete Bewegungsreize sind im visuellen System vier Kanäle vorhanden, die jeweils für zwei entgegengesetzte Bewegungsrichtungen besonders empfindlich sind, da die Adaptation an stereoskopische Bewegung davon abhängt, in welcher Richtung sich der Adaptationsreiz bewegt. Versuchspersonen, die an eine Bewegung längs einer links an ihrer Nase vorbeiführenden Linie adaptiert waren, konnten Objekte, die sich auf der linken Seite bewegten, weniger gut wahrnehmen, als Objekte auf der rechten Seite. Vermutlich reagieren diese Kanäle selektiv auf das Verhältnis der Geschwindigkeiten, mit denen sich das rechte und das linke Netzhautbild bewegen, und weniger auf die absoluten Geschwindigkeiten.

Die selektive Empfindlichkeit der Kanäle hängt stark von der Richtung ab, aus der der Reiz kommt. Kanäle, die empfindlich sind für Bewegungen, die zwischen beide Augen zielen, reagieren nur auf Bahnen, die innerhalb eines Schwinkels von eineinhalb Grad liegen. Diese Kanäle decken also insgesamt 6 Grad des Sehraumes ab. Die Kanäle für Bewegungen, die am Kopf vorbeiführen und die übrigen 354 Grad des Sehraumes erfassen, werden in verschiedenen Kanälen verarbeitet, die in viel größeren Bereichen empfindlich sind.

Informationen über Positionen in der Tiefe und über Tiefenbewegungen besagen, dass bei manchen Personen Gebiete im Gesichtsfeld existieren, in denen Tiefenbewegungen nicht, Positionen in der Tiefe dagegen normal wahrgenommen werden. Ebenso gibt es Personen, die den umgekehrten Effekt zeigen (77,91).

### **Einflußfaktoren**

In der Hirnrinde der Katze entsprechen einige der Nervenzellen des primären Sehfeldes den für stereoskopische Bewegung spezifischen Kanälen des Menschen, wie auch sämtliche Erkenntnisse über den visuellen Kortex der Katze sich ebenso bei Untersuchungen am Affen bestätigten.

Reaktionen der für stereoskopische Bewegung empfindlichen Nervenzellen sind, anders als die Reaktionen von Nervenzellen, mit deren Hilfe Positionen im Raum wahrgenommen werden, relativ unabhängig von der Entfernung des Objekts.

Normalerweise wirken eine Größenänderung und eine Querdiparationsänderung nicht gegeneinander; die Geschwindigkeit, mit der sich die Größe des Bildes von einem bewegten Objekt und die geometrisch bedingte Ungleichheit der Netzhautbilder ändern, stehen in einem festen Verhältnis, das von der Größe des Objekts und vom Abstand der Augen des Beobachters abhängt, von der Entfernung des Objekts jedoch nahezu unabhängig ist.

Der Vergleich des Reizes, der von der Größenänderung ausgeht, mit demjenigen, der aus der Ungleichheit der Netzhautbilder resultiert, zeigt, dass es von der Geschwindigkeit, mit der sich ein Objekt in der Tiefe bewegt, und von der Beobachtungsdauer abhängt, welcher der beiden Reize wirksamer ist. Blickt eine Person beispielsweise kurze Zeit, etwa 0,2 Sekunden, auf ein langsam bewegtes Objekt, so ist der Reiz der Größenänderung wirkungsvoller, während bei einem rasch bewegten Objekt und längerer Betrachtung, etwa eine Sekunde, jener Reiz wirksamer ist, der von den unterschiedlichen Netzhautbildern ausgeht. Diese Eigenschaft des visuellen Systems läßt sich nicht aus den geometrischen Verhältnissen

ableiten, außerdem unterscheiden sich verschiedene Menschen hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit für die beiden Reizarten. Es gibt Personen, die gegenüber der Ungleichheit der Netzhautbilder bis zu neunmal empfindlicher sind als gegenüber Größenänderungen, während die Ungleichheit der Netzhautbilder für andere Personen einen praktisch unwirksamen Reiz darstellen kann.

Die Empfindlichkeit für den monokularen Reiz der Größenänderung und für den binokularen Reiz der Veränderung der beiden Netzhautbilder hängt von der Größe des Objekts, seiner Geschwindigkeit, der Betrachtungszeit und nicht zuletzt auch von individuellen Faktoren ab. Letztendlich lösen Größenänderungsreize und stereoskopische Bewegungsreize im visuellen System Signale aus, die bei der gleichen „Instanz“ für die Wahrnehmung von Tiefenbewegungen zusammenlaufen. Auf eine komplexe visuelle Szene erfolgt als Antwort oft nur eine einfache motorische Reaktion; die von einer Vielzahl verschiedener sensorischer Eingänge erzeugten Signale laufen zusammen, um zu einem einzigen motorischen Ausgang zu führen (23,38,77).

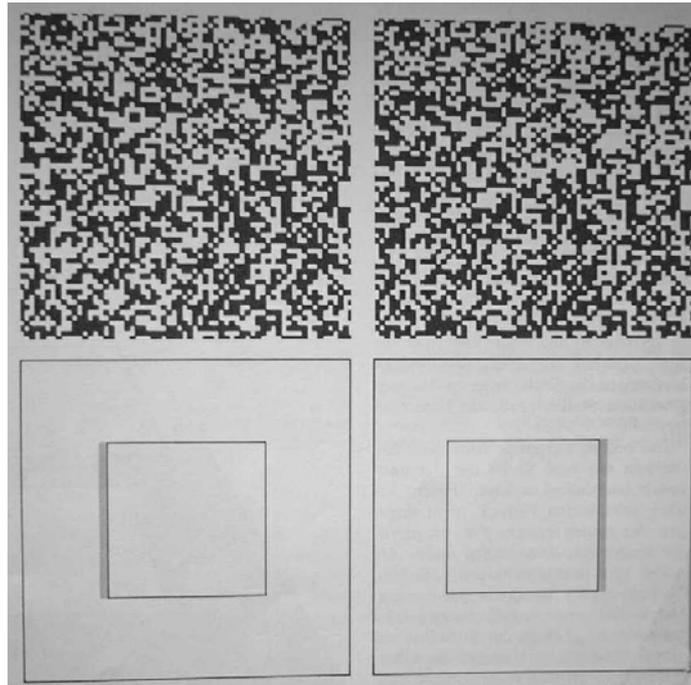
### **3.8 Grundlagen des Stereosehens**

#### **Zufallsstereogramme**

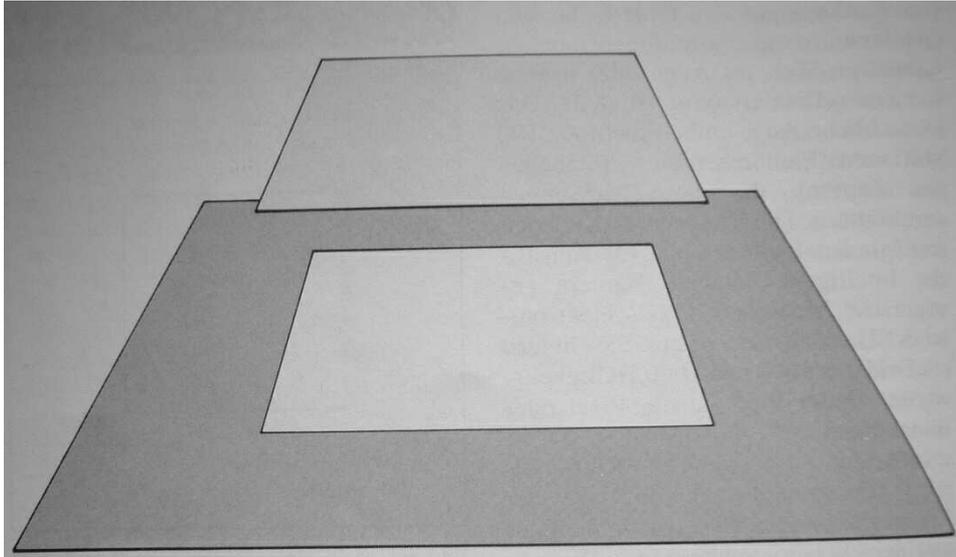
Es scheint, als ergebe sich beim Stereosehen das Verarbeitungsproblem, jene Elemente in den beiden Bildern, die jeweils derselben Stelle im Raum entsprechen, einander zuzuordnen, ohne Objekte oder Teile davon erkennen zu müssen.

Experimentell läßt sich dieses Problem näher beleuchten anhand sogenannter Zufallsstereogramme, die abgesehen von binokularen Disparitäten keinerlei Anhaltspunkte für die Wahrnehmung von Formen enthalten und entstehen, indem ein zufälliges Muster aus weißen und schwarzen Punkten bzw. kleinen Quadraten erzeugt wird, von denen zwei Kopien erstellt werden. Wird in der einen Kopie ein quadratischer Ausschnitt des Musters leicht nach links, in der anderen leicht nach rechts verschoben und das entstehende Loch nach Zufall wieder mit Punkten gefüllt, so sieht jedes Muster isoliert betrachtet gleichförmig zufällig aus, betrachtet man das Paar jedoch durch ein Stereoskop, so dass jedes Auge nur eines der beiden Muster wahrnimmt und das Gehirn beide verschmelzen kann, dann scheint das Quadrat

plötzlich über oder unter der Bildfläche zu schweben. Anscheinend setzt Stereosehen also nicht unbedingt voraus, dass vorher Objekte erkannt oder Formen erfaßt wurden.



**Abbildung 1: Zufallsstereogramme (...) sind visuelle Muster, die außer binokularen Disparitäten keine Anhaltspunkte für das Stereosehen enthalten. Die Stereogramme bestehen aus dem gleichen zufälligen Muster mit vielen kleinen schwarzen und weißen Quadraten (oben). In einem der beiden ist jedoch ein quadratischer Ausschnitt etwas nach links, im anderen nach rechts verschoben (unten). Die entstehende Lücke wird je mit weiteren zufällig verteilten Punkten aufgefüllt (graue Bereiche).**



**Abbildung 2: Betrachtet man die in Abbildung 1 gezeigten Zufallsstereogramme durch ein Stereoskop, so dass jedes Auge nur eines der beiden Teilbilder sieht und das Gehirn beide miteinander zur Deckung bringt, entsteht ein echter räumlicher Eindruck: Das verschobene Quadrat scheint über oder unter der Bildebene zu schweben. Offensichtlich setzt räumliches Sehen also nicht unbedingt voraus, dass im Gesichtsfeld Gegenstände oder Formen erkannt werden.**

In Bezug auf Größe, Helligkeit und Form sind die schwarzen Punkte in Zufallsstereogrammen alle gleich; jeder einzelne von ihnen kann grundsätzlich jedem anderen im Partnerbild zugeordnet werden. Dennoch läßt sich das Gehirn nicht täuschen, sondern trifft schnell und sicher die passenden Zuordnungen. Hirnrinden- Neuronen signalisieren die richtigen binokularen Disparitäten selbst in Zufallsstereogrammen, in denen es viele falsche Zuordnungsmöglichkeiten gibt, wozu das Gehirn mehr als die Punkte selbst benutzen muß.

Aufgrund zweier Eigenschaften physikalischer Oberflächen kann das Problem eingeschränkt werden, zum einen nämlich mittels der Eindeutigkeit des Ortes, was bedeuten soll, dass ein gegebener Punkt auf einer physikalischen Oberfläche zu einer bestimmten Zeit nur eine einzige dreidimensionale Position hat, jedes Zeichen also in einem der beiden Bilder, beispielsweise jeder Punkt in einem Zufallsstereogramm, eine eindeutige Disparität hat und genau einem Zeichen im anderen Bild entspricht. Zum anderen handelt es sich um die Kontinuität und Undurchsichtigkeit physikalischer Objekte, die zusammenhängend und gewöhnlich undurchsichtig sind.

Deshalb nehmen die räumliche Tiefe und damit auch die Disparität entlang einer Oberfläche in der Regel kontinuierlich zu, nur an den Grenzlinien des Objekts bestehen sprunghafte

Änderungen. Da die sichtbare Welt jedoch im Gegensatz zu einem Zufallsstereogramm nicht nur aus schwarzen und weißen Punkten besteht, muß geklärt werden, welche Zeichen nun einander zugeordnet werden sollen; verschlüsselt ist die vom Gehirn benötigte Information dabei im von den Photorezeptoren gemessenen Grautonbild (74).

### **Räumliches Sehen**

Eine entscheidende Rolle beim Prozeß der Raumwahrnehmung spielt das räumliche Sehen. Die zu Beginn des Sehprozesses vorliegende Information besteht in einem zweidimensionalen Feld mit Meßwerten über die Intensität des Lichtes, das von Punkten auf der Oberfläche von Objekten in der dreidimensionalen, sichtbaren Welt ins Auge oder in eine Kamera reflektiert wird; durchgeführt werden diese Messungen von den Stäbchen und Zapfen der Netzhaut. Zunächst ist die gesamte visuelle Information, die dem Gehirn zur Verfügung steht, in den beiden verschwommenen zweidimensionalen Bildern enthalten, die von den Augenlinsen auf den Netzhäuten erzeugt werden und anhand derer es die Positionen und Richtungen von Objekten im Raum abschätzen und seinen eigenen Standort in Beziehung zu der sich dauernd ändernden dreidimensionalen Umwelt setzen muß (38,74).

### **Grautonbilder**

Die Kluft, die zwischen dem vom Auge oder von der Kamera erzeugten riesigen Zahlenfeld, dem Grautonbild, und dem wirklichen Sehen, also dem Wissen, was sich wo befindet, besteht, kann nicht in einem einzigen Schritt überbrückt werden, sondern es sind verschiedene Prozesse erforderlich, welche das Grautonbild parallel verarbeiten und Zwischenbilder erzeugen, die als Ausgangspunkt für weitere Verarbeitungsschritte dienen. An der Rekonstruktion der dreidimensionalen Geometrie der Welt scheinen mehrere visuelle Module, etwa solche, die aus Schattierungen, visueller Textur, Bewegung, Konturen, Verdeckungen und stereoskopischen Informationen die Gestalt eines Objekts herleiten können, beteiligt zu sein. Einige gehen möglicherweise direkt vom Grautonbild aus, häufiger jedoch scheint ein Modul besser mit einem Zwischenbild operieren zu können.

Eine weitere Eigenschaft physikalischer Oberflächen besteht darin, dass dort, wo sich die Oberfläche physikalisch ändert, ihr Bild gewöhnlich abrupte Variationen in der Helligkeit

aufweist, die durch Markierungen auf der Oberfläche oder durch Kanten hervorgerufen werden und für eine Zuordnung verlässlicher wären als die rohen Graustufenwerte.

Besser als diese Werte eignet sich also eine abstraktere und kompaktere Darstellung der visuellen Welt, in der die elementaren Symbole, die die sichtbare Welt verschlüsseln, aus Intensitätsänderungen bestehen. Grundsätzlich handelt es sich dabei um die Umsetzung der Grautonfelder, die von den Photorezeptoren geliefert werden, in eine Darstellungsform, aus der die Position, Richtung, Ausdehnung und Größe der entscheidenden Helligkeitsgradienten hervorgeht, wodurch es dem Gehirn möglich wird, richtige Zuordnungen zu treffen und die dreidimensionale Geometrie der sichtbaren Welt zu rekonstruieren (38,74).

### **Intensitätsänderungen**

Grundsätzlich können Intensitätsänderungen in einem Bild durch den Vergleich benachbarter Intensitätswerte festgestellt werden; eine große Differenz spiegelt sich dabei in einer starken Änderung der Intensität wider. Im mathematischen Sinn wird die erste Ableitung gebildet, die angibt, in welchem Ausmaß sich eine mathematische Funktion jeweils ändert, in diesem Fall, wie rasch die Helligkeit längs einer Linie über das Grautonfeld variiert. Ein Maximum oder Minimum in der ersten Ableitung gibt an, wo ein Sprung in der Helligkeit auftritt, der in vielen Fällen der Kante einer realen Oberfläche entspricht. Die zweite Ableitung, die gebildet wird, indem benachbarte Werte in der ersten Ableitung voneinander abgezogen werden, zeigt, wie stark sich die Änderung einer Funktion verändert. Ein Sprung in der Helligkeit entspricht hier im Grautonfeld einer Nullstelle, einer Stelle, an der die zweite Ableitung die Nulllinie passiert, während sie von positiven zu negativen Werten oder umgekehrt wechselt.

In einem realen Bild treten Intensitätsänderungen kaum als saubere und scharfe Sprünge von einem Intensitätswert zum anderen auf; deshalb muß im Experiment das Bild durch räumlich begrenztes Mitteln über benachbarte Intensitätswerte zunächst angeglichen werden und erst im Anschluß kann durch Differenzieren die erste und zweite Ableitung gebildet werden (74).

### **Laterale Hemmung**

Bereits im Jahre 1865 wurde erkannt, dass bei der visuellen Wahrnehmung die räumlichen Schwankungen in der Lichtintensität verstärkt werden, was auf eine laterale Hemmung

zurückgeführt wurde, also einen neuronalen Mechanismus, bei dem die Erregung eines Axons durch beispielsweise einen hellen Lichtfleck im Gesichtsfeld die Erregung benachbarter Axone unterdrückt. Dadurch wird der Kontrast zwischen dem hellen Fleck und seiner Umgebung verstärkt (74).

### **An- und Aus- Zentrum**

In den fünfziger und sechziger Jahren dann ergaben sich Hinweise, dass bei bestimmten Sehnervenzellen das rezeptive Feld in Zentrum und Umkreis unterteilt ist: Helligkeit im Zentrum des rezeptiven Feldes erregt die Sehnervenzelle, Helligkeit in einem umgebenden Ring dagegen hemmt deren Erregung; das rezeptive Feld enthält also ein An- Zentrum und einen Aus- Umkreis. Andere Sehnervenzellen haben, im Gegensatz dazu, ein Aus- Zentrum und einen An- Umkreis; sie melden das Gegenteil dessen, was die Zellen mit An- Zentrum signalisieren. Neurone können jedoch negative Signale nicht ohne weiteres übermitteln, denn diejenigen, die nach dem Alles- oder- Nichts- Prinzip funktionieren, feuern entweder, oder aber sie sind stumm. Wahrscheinlich braucht die Natur daher neuronale Gegenspieler.

In der Netzhaut von Katzen sind die Sehnervenzellen mit An- und Aus- Zentrum in zwei getrennten Schichten angeordnet (23,74).

### **Kontrastwahrnehmung und Raumfrequenz**

Der Menschen ist in der Lage, Einzelheiten von Gegenständen und Szenen wahrzunehmen, eine Fähigkeit, die vor allem dadurch bestimmt wird, wie gut das visuelle System Kontraste, also Helligkeitsdifferenzen zwischen benachbarten Flächen, zu unterscheiden vermag. Darüberhinaus spielt die Größe des Netzhautbildes bei der Wahrnehmung von Details eine bedeutende Rolle. Details mit geringem Kontrast sind schwerer erkennbar, wenn sich ein Objekt entfernt und dabei immer kleiner wird, was aber nicht etwa darauf beruht, dass sich die relative Helligkeit benachbarter Flächenelemente verschlechtert hätte; vielmehr reagiert das visuelle System weniger stark auf Kontraste, wenn diese in Mustern mit verkleinerten Flächenelementen dichter zusammengerückt sind. Folgen unterschiedlich helle Flächenelemente in einem regelmäßigen Abstand, so kann man diese Ordnung als Raumfrequenz beschreiben, wobei das visuelle System für bestimmte Raumfrequenzen eine

viel größere Kontrastempfindlichkeit zeigt als für andere, ähnlich wie das Ohr für bestimmte Tonfrequenzen besonders empfindlich ist.

Die reine Sinuswelle stellt das einfachste akustische Signal dar; ihr entspricht bei der visuellen Wahrnehmung ein Streifengitter, dessen Helligkeit sich sinusförmig ändert. Definiert ist der Gitterkontrast durch die Änderung seiner Helligkeit gemessen an der mittleren Helligkeit des gesamten Musters, die Raumfrequenz kann man als Anzahl der vollständigen Hell- Dunkel- Wechsel bzw. Perioden innerhalb eines Bildabschnittes mit einer bestimmten Größe angeben. Untersucht man das visuelle System, so sollte die Raumfrequenz eines Streifengitters über die Anzahl von Helligkeitsmaxima oder -minima innerhalb eines Seh winkels von einem Grad definiert werden. Durch Addition können aus mehreren sinusförmigen Wellenformen komplexe Wellenmuster aufgebaut werden.

Das visuelle System besitzt mehrere getrennte Kanäle, von denen jeder auf einen relativ schmalen Raumfrequenzbereich abgestimmt ist und zudem seine eigene Variationsbreite für die Kontrastempfindlichkeit besitzt. Am empfindlichsten ist das visuelle System des Menschen für Kontraste, wenn diese bei einfachen Sinuswellengittern mit einer Raumfrequenz von etwa drei Perioden pro Seh winkelgrad auftreten. Wird die Raumfrequenz über dieses Optimum erhöht, so sinkt die Kontrastempfindlichkeit ab, ebenso wenn die Raumfrequenz unter das Optimum von drei Perioden pro Seh winkelgrad fällt. Das visuelle System ist also für Streifengitter umso weniger empfindlich, je größer diese sind.

Wird beim Augenarzt die Sehschärfe mittels der Präsentation von schwarzen Buchstaben auf weißem Hintergrund gemessen, so ergibt sich nur die Sehschärfe für sehr hohe Kontraste. Demgegenüber haben aber die meisten Dinge, die der Mensch im täglichen Leben sieht, einen viel geringeren Kontrast, der sogar auf einen Wert sinken kann, bei dem Muster oder Objekte nicht mehr zu erkennen sind, was verdeutlicht, dass es sich bei der Kontrastempfindlichkeit um eine Funktion der Raumfrequenz handelt.

Neben der Methode, Personen nach der Sichtbarkeit von Streifenmustern zu befragen, gibt es noch eine andere, die darin besteht, kleine elektrische Signale, sogenannte evozierte Potentiale, zu registrieren, die im visuellen Kortex des Gehirns entstehen. Dabei steigt die Höhe des evozierten Potentials mit der Stärke des Kontrastes an. Darüberhinaus ergibt sich ein linearer Zusammenhang, wenn bei einer gegebenen Raumfrequenz die gemessenen evozierten Potentiale zum Logarithmus des Kontrastes in Beziehung gesetzt werden (15,23,38,91).

## **Fixationspunkt**

Die Güte der Auflösung beim Sehen nimmt im visuellen Feld mit dem Abstand vom Fixationspunkt kontinuierlich ab. Allerdings gilt dies nicht für alle Richtungen in gleichem Maße. In der Regel fällt die Auflösung in der horizontalen Richtung des visuellen Feldes langsamer ab als in der vertikalen, und dies auch nicht so schnell unterhalb des Fixationspunktes wie oberhalb von ihm. Ebenso werden Hell- Dunkel- Streifenmuster schlechter aufgelöst, wenn die Streifen feiner und dichter werden, ihre räumliche Frequenz also zunimmt (15).

### **3.9 Die Simultanerfassung**

Unter Simultanerfassung versteht man die Fähigkeit, mehrere Dinge bezüglich ihrer Anzahl auf einen Blick zu erfassen; sie stellt die Grundlage, zumindest aber eine bedeutende Hilfe für die Entwicklung des Zahlbegriffs dar. Vermutlich ist eine funktionierende Simultanerfassung auch eine wichtige Voraussetzung für das Erlernen von Rechnen im Sinne der Ausbildung des Mengenbegriffs und Zahlenverständnisses, sowie von Lesen und Rechtschreibung, denn beim Lesen berechnet der Mensch unbewußt die Blicksprünge in Abhängigkeit von der Wortlänge. Die Sehfähigkeit entwickelt sich nach Beginn des Schulalters noch deutlich weiter. Auch im Alter von 13 Jahren ist der Wert für Erwachsene noch nicht erreicht. Ab einem Alter von 35-40 Jahren ist die Entwicklung dann wieder rückläufig.

Kinder mit Rechenschwäche (Dyskalkulie) haben Schwierigkeiten, die Anzahl von Symbolen auf einem nur kurz betrachteten Bild zu nennen. Vermutlich aus dem Grund, dass sie kaum einen Zahlenbegriff entwickeln konnten, ist es ihnen allenfalls durch Abzählen möglich, diese Aufgabe zu lösen, während andere Kinder die Anzahl auf Anhieb angeben können; da sie über den Begriff der Zahl eins nie hinausgekommen sind, sind sie nicht in der Lage, Gruppen zu bilden, um sie dann zu addieren, sondern stattdessen können sie immer nur eins dazuzählen. Es fehlt die Vorstellung der Menge, die eine Zahl darstellt; mit Ziffern und Zahlwörtern dagegen gibt es keine Probleme.

Auch bei etwa 50% der Legastheniker finden sich die Simultanerfassung betreffende Entwicklungsrückstände. Die Anzahl der Buchstaben, die zu einem Wort bzw. einer Silbe zusammengefügt werden sollten, können diese Kinder weniger gut einschätzen als die

Kontrollgruppe. Die den betroffenen Kindern mangelnde Sehfähigkeit greift wohl auf parietale oder inferotemporale kortikale Funktionen zurück; die Augenmuskeln legasthenischer Kinder dagegen sind in aller Regel gesund (29,99,112).

### **3.10 Unterschiede in der Kontrastempfindlichkeit von Mensch und Katze**

Der Vergleich mit dem Tierreich, insbesondere die Anwendung der Technik der evozierten Potentiale bei Katzen zeigte, dass, werden die Kontrastschwellen für Katzen und für Menschen graphisch dargestellt, der Verlauf der Kurven sehr ähnlich ist, so dass man darauf schließen könnte, dass die extrapolierten Kontrastwerte die Schwelle sowohl für Katzen als auch für Menschen darstellen; die Kontrastschwellenkurve der Katze ist dabei lediglich zu niedrigeren Raumfrequenzen hin verschoben.

Dennoch gibt es beachtliche Unterschiede: Während die Kontrastempfindlichkeit für Menschen bei etwa drei Perioden pro Sehwinkelgrad am höchsten ist, liegt dieser Wert für Katzen bei etwa 0,3 Perioden pro Sehwinkelgrad. Bei Raumfrequenzen oberhalb von 0,5 Perioden pro Sehwinkelgrad haben Katzen eine geringere Kontrastempfindlichkeit als Menschen, können also bei höheren Raumfrequenzen nur Details mit hohem Kontrast sehen. Bei niedrigen Raumfrequenzen unterhalb von 0,5 Perioden pro Sehwinkelgrad sieht die Katze bereits Details, die der Mensch bei diesem geringen Kontrast noch nicht wahrnehmen kann, woraus sich ergibt, dass die Katze an das Sehen von Raumfrequenzen angepaßt ist, die zehnmal niedriger sind als die Raumfrequenzen, die der Mensch sieht. Bei niedrigen Raumfrequenzen sieht die Katze Details mit geringem Kontrast, die ein Mensch überhaupt nicht wahrnehmen kann.

Im visuellen Kortex von Katzen und Affen wurden Zellen entdeckt, die besonders stark auf Kanten oder Streifen bestimmter Orientierung oder bestimmter Bewegungsrichtung reagieren. Ebenso zeigte sich, dass der visuelle Kortex der Katze über einzelne Zellen verfügt, die auf einen ziemlich engen Bereich von Raumfrequenzen ansprechen. Jede getestete Zelle war auf einen Bereich des Raumfrequenzspektrums abgestimmt und reagierte innerhalb dieses Bereiches auf eine bestimmte Raumfrequenz optimal. Bei Raumfrequenzen, die ober- oder unterhalb des Maximums lagen, nahm die Reaktion rasch ab. Auch auf der Retina und im Corpus geniculatum laterale finden sich einzelne Zellen, die auf bestimmte Raumfrequenzen ansprechen.

Da die Kontrastempfindlichkeit der Katze im Vergleich zu jener des Menschen um den Faktor 10 zu niedrigeren Raumfrequenzen hin verschoben ist, könnte man meinen, dass die Katze zum Erkennen eines kleinen Objektes, beispielsweise aufgrund der geringeren Größe ihrer Augen verglichen mit dem Menschen, zehnmal näher herangehen müsste. Da das Netzhautbild eines gegebenen Objektes in einer bestimmten Entfernung jedoch bei der Katze nur 1,3 mal kleiner ist als beim Menschen, können die Unterschiede in der Wahrnehmung der Raumfrequenz jedoch nicht in der unterschiedlichen Größe der Augen begründet sein.

Letztlich kann daher angenommen werden, dass die Katze genauso scharf und klar sieht, wie der Mensch, nur mit dem Unterschied, dass sie im Nahbereich am besten sieht. Bei niedrigen Raumfrequenzen nämlich kann sie Details bereits bei geringem Kontrast unterscheiden (15,25).

### **3.11 Das Zustandekommen optischer Täuschungen**

#### **Auslösende Komponente und Testkomponente**

Ein weiteres die visuelle Wahrnehmung betreffendes Phänomen stellen geometrisch- optische Täuschungen dar, deren Ursachen zu ergründen man bereits seit etwa hundert Jahren versucht. Die meisten der über zweihundert Figuren, die optische Täuschungen hervorrufen, wurden in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts entdeckt. In jeder dieser Figuren sind zwei Komponenten am Zustandekommen der optischen Täuschung beteiligt, nämlich die, die die Täuschung hervorruft, also die auslösende Komponente, und die, über die man sich täuscht, die Test- Komponente. In manchen Fällen vereinfacht diese Unterscheidung die tatsächlichen Verhältnisse jedoch zu sehr, denn die Verzerrung der Testkomponente ist manchmal nur der deutlichste Täuschungseffekt unter einer Reihe von anderen, die auch die auslösende Komponente betreffen.

#### **Größenkonstanz**

Beim normalen räumlichen Sehen können zwei unterschiedlich lange Linien, die vom Betrachter verschieden weit entfernt sind, auf den Netzhäuten seiner Augen als gleich lang abgebildet werden. Dennoch wirken sie auf ihn nicht gleich lang, da sein visuelles System

berücksichtigt, dass sie in verschiedenen Entfernungen liegen. Die Linien erscheinen ungefähr in der Länge, die sie im dreidimensionalen Raum in Wirklichkeit haben. Dieser Wahrnehmungsmechanismus der Größenkonstanz macht die Wirkung des Entfernungsunterschiedes wieder rückgängig, indem er die entferntere Linie als größer und die näher liegende als kleiner erscheinen läßt.

Als Ursache von geometrisch- optischen Täuschungen betrachtete man aus diesem Grund lange Zeit die Größenkonstanz von Objekten. Wenn nämlich das visuelle System die Linien einer geometrischen Abbildung so verarbeitet, als ob sie in verschiedenen Entfernungen lägen, so entsteht eine optische Täuschung. Die Tatsache, daß aber fast alle geometrischen Täuschungen gar keine räumliche Tiefe haben, weder eine tatsächliche, noch eine scheinbare, widerlegt diesen Erklärungsversuch. Geometrisch- optische Täuschungen lassen sich also nicht auf wahrgenommene räumliche Tiefe, sondern vielmehr auf Informationen über die Größe und die Größenverhältnisse der Gegenstände in der normalen Umwelt sowie auf die lineare Perspektive und auf perspektivische Verkürzungen zurückführen.

### **Charakteristika optischer Täuschungen**

Drei Punkte sind bezüglich optischer Täuschungen erwiesen. Erstens betrifft die Täuschung nicht das Denken, sondern die Wahrnehmung. Trotz des Bewußtseins, dass der Eindruck falsch ist, verschwindet die Täuschung nicht, allenfalls kann sie schwächer werden, wenn eine Täuschungsfigur innerhalb kurzer Zeit wiederholt dargeboten wird. Zweitens lassen sich die Täuschungen nicht durch Vorgänge auf der Netzhaut erklären. Sie sind fast in voller Stärke wahrnehmbar, wenn das eine Auge nur die auslösende Komponente sieht und das andere nur die Test- Komponente. Offenbar entstehen sie im visuellen System erst auf einer Stufe nach den Corpora geniculata lateralia, in denen die Informationen aus den beiden Augen zum erstenmal zusammentreffen. Drittens lässt sich festhalten, dass die Augenbewegungen am Zustandekommen der Täuschung nicht beteiligt sind. Auch wenn die Figuren nur so kurze Zeit dargeboten werden, dass die Augen sie nicht abtasten können, oder wenn mit einer speziellen Vorrichtung dafür gesorgt wird, dass sie stets auf der gleichen Stelle der Netzhaut abgebildet werden, lösen sie gewöhnlich die vollständige Täuschung aus.

## **Erklärungsmodelle**

Es gibt verschiedene Gruppen von Theorien, die das Zustandekommen von optischen Täuschungen zu erklären versuchen und sich dabei zumeist nicht gegenseitig ausschließen, sondern lediglich verschiedene Gesichtspunkte der gleichen Erscheinung betonen.

Die Kontrast- und Assimilationstheorie schreibt die Täuschung der Überbewertung (im Sinne eines Kontrastes) oder der Unterbewertung beziehungsweise Assimilation eines Unterschieds, beispielsweise eines Größenunterschieds, zwischen der auslösenden und der Test-Komponente zu. Diese Theorie hilft jedoch nur, Ordnung in die Vielfalt der täuschenden Figuren zu bringen; eine wirkliche Erklärung liefert sie nicht und läßt sich darüberhinaus auf einige Täuschungen überhaupt nicht anwenden.

Die Aktivitätstheorien und die physikalischen Theorien gehen über die einfache Klassifikation der Täuschungen nach Kontrast und Assimilation hinaus; ihnen zufolge sind Täuschungen auf Randeffekte oder Fehler der normalen Wahrnehmung zurückzuführen. Die Aktivitätstheorien lassen als Ursache vorbereitende Prozesse vermuten, welche die Wahrnehmung der Täuschung einleiten, die Art und Weise etwa, wie im visuellen System die Augen auf die durchzuführenden Bewegungen vorbereitet werden. Nach dieser Theorie richtet sich der Blick nicht auf die ganze Figur, sondern den Teil mit den meisten entscheidenden Details.

Es ist bekannt, dass bei mehrmaligem Betrachten die Stärke der Täuschung verringert wird und dass dies von einer höheren Genauigkeit der Augenbewegungen begleitet ist. Allerdings klärt auch dieser Zusammenhang wenig im Hinblick auf die Ursache der Täuschung.

Viele der physiologischen Theorien verwenden den Prozeß der lateralen Hemmung, durch welchen neuronale Vorgänge örtlich begrenzt und gehemmt oder verstärkt werden können, als Basis. Physiologische Theorien, die auf dem Prinzip der lateralen Hemmung basieren, lassen sich am besten auf Täuschungen mit einem Winkelkontrast anwenden, wobei bei extrem kleinen Winkeln eine Assimilations- und bei größeren Winkeln eine Kontrastwirkung zum Tragen kommt. Durch Bedingungen, die die laterale Hemmung vergrößern, etwa durch den Helligkeitskontrast oder die Zahl der induzierenden Linien, wird die Täuschung noch verstärkt.

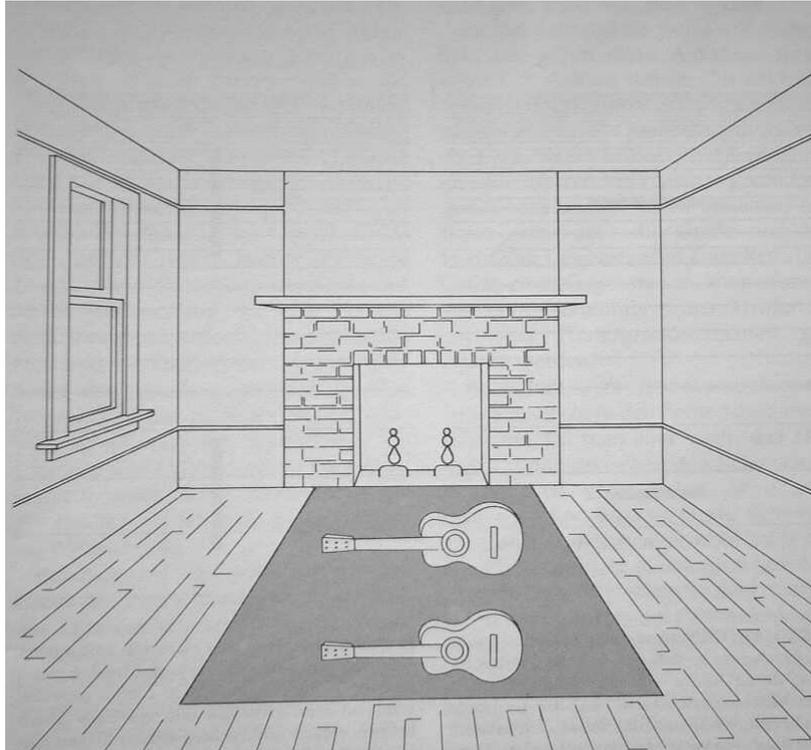
Die meisten Täuschungen, die auf einem Winkelkontrast beruhen, bleiben erhalten, wenn man die Linien der Test- Komponente durch Punktereihen oder durch sich bewegende Punkte ersetzt. Sie können also durch die Theorien der lateralen Hemmung nicht erklärt werden. Möglicherweise sprechen jedoch die richtungsspezifischen Neurone auch auf Ersatzzeichen für Linien wie Punktereihen oder bewegte Punkte an. Einige Täuschungen, die auf Winkelkontrasten beruhen, lassen sich auch gar nicht mit dem Verhalten richtungsspezifischer Nervenzellen erklären.

Eine weitere physiologische Theorie ist die Filtertheorie, welcher die Annahme zugrunde liegt, dass es im visuellen System Kanäle gibt, welche nicht auf Linienreize, sondern auf bestimmte räumliche Frequenzen sinusförmiger Hell- Dunkel- Wechsel ansprechen. Die räumliche Frequenz ergibt sich daraus, wie viele helle und dunkle Streifen in einem Bereich von einem Grad Sehwinkel liegen.

Allein Theorien, die die optischen Täuschungen nicht als Irrtümer, sondern als Resultate normaler Wahrnehmungsvorgänge behandeln, können jedoch zur Klärung der Tatsache herangezogen werden, dass eine Täuschung für eine Dauer von Tagen weitgehend verschwinden kann, wird die betreffende Figur wiederholt betrachtet.

Die meisten optischen Täuschungen kommen in zweidimensionalen Abbildungen dreidimensionaler Szenen vor. Was in solchen Bildern die Täuschungen hervorruft, fördert bei der Betrachtung der dreidimensionalen Welt den realistischen Eindruck.

Prinzipiell sind Theorien, die die Funktion in den Vordergrund stellen, mit solchen kompatibel, die auf der Ebene der Verarbeitungsmechanismen formuliert sind. Die auf der Entschlüsselung perspektivischer Elemente beruhende funktionale Theorie der optischen Täuschungen wird gestützt durch die Beobachtung, dass Figuren, die perspektivische Elemente enthalten, auf Menschen, die nicht an rechtwinklig gebaute Räume, Häuser und Städte gewöhnt sind, weniger täuschend wirken. Bemerkenswert sind neuere Resultate, die belegen, dass ähnliche Täuschungen auftreten, wenn Reliefs einiger bestimmter Täuschungsfiguren mit den Fingern abgetastet werden. Möglicherweise besteht zwischen Täuschungen des Gesichts- und des Tastsinnes ein - wenn auch noch ungeklärter - Zusammenhang.



**Abbildung 3: Diese Zeichnung eines Zimmers enthält einige der bekanntesten Täuschungsfiguren: Die hintere Gitarre wirkt größer als die vordere (Ponzo-Täuschung), die Hinterkante des Teppichs sieht kürzer aus als seine Länge (Vertikalentäuschung), die Sockellinien an den Längswänden erscheinen zu schräg, um mit den Simslinien der jeweils gegenüberliegenden Wände kollinear zu sein (Poggendorff- Täuschung), und die Vorderkante des Teppichs scheint kürzer zu sein als die Bodenkante der hinteren Wand (Müller- Lyer- Täuschung).**

### **Wahrnehmungskonflikte**

Bezogen auf die zweidimensionale Ebene der Abbildung 3 handelt es sich, von den Gitarren abgesehen, bei diesen Erscheinungen um Täuschungen, die sich aber auflösen, sobald man das Bild in eine dreidimensionale Szene übersetzt. Sie dienen gerade dazu, einen wirklichkeitsgetreuen dreidimensionalen Eindruck des abgebildeten Raumes hervorzurufen. Beim normalen räumlichen Sehen ist es nämlich ohne Belang, ob ein Sockel mit einer Simslinie retinal in einer Linie liegt, oder ob eine Türkante retinal dieselbe Länge hat wie ein Eckvorsprung. Solche Eigenheiten des Bildes werden, vorwiegend weil sie von der jeweiligen Betrachtungsposition abhängig sind, vom Betrachter nicht bemerkt.

Der Wahrnehmungsprozess verarbeitet die wechselnden retinalen Bilder, um daraus mit Hilfe der Konstanzleistungen eine stabile Repräsentation der Umgebung aufzubauen. In Abbildung 3 erfüllen u.a. die „Verzerrungen“ diese Aufgabe. Erst wenn man den Kontext, der für den räumlichen Eindruck wichtig ist, wegläßt, erscheinen die Wahrnehmungsantworten auf die einzelnen Gegenstände und Formen unangemessen und werden dann als Täuschungen bezeichnet.

Die Größe eines Gegenstandes kann oftmals aus dem Verhältnis seiner Größe zu der von Hintergrundelementen geschätzt werden. Hierbei handelt es sich um das bereits weiter oben erwähnte Phänomen der Größenkonstanz. Es scheint, dass Täuschungen durch Konstanzleistungen in einem Kontext hervorgerufen werden, der nicht ausreicht, um den Verzerrungen eine Bedeutung zu verleihen, weil er keine räumliche Tiefe vermittelt. Damit soll jedoch nicht bestritten werden, dass zwischen der wahrgenommenen Größe eines Objekts und der scheinbaren Entfernung, in der es sich befindet, eine Beziehung besteht. Ein Beispiel dafür ist der Mond, der größer wirkt und daher vom Betrachter weniger weit entfernt zu sein scheint, wenn er den Horizont gerade überschritten hat, als wenn er hoch am Himmel steht. Normalerweise beeinflussen sich die primären und die abgeleiteten Wahrnehmungen der Größe und Entfernung eines Gegenstandes. In einer nur aus Linien bestehenden Zeichnung aber ist weniger Information für das Auslösen der primären Wahrnehmung der Größe als für das der räumlichen Tiefe erforderlich. Dies ist vermutlich eine Folge des Wahrnehmungskonfliktes, der dadurch entsteht, dass die Bilddarstellung den Eindruck räumlicher Tiefe vermittelt, das Bild selbst aber flach ist.

Vermutlich sind Täuschungen, deren Umfang sich bei wiederholter Darbietung um vieles verringert, in hohem Maße erlernt, während Täuschungen, die nur eine geringe Abschwächung erfahren, als angeborene Wahrnehmungsleistungen gelten. Obwohl Konstanzleistungen traditionsgemäß auf durch Lernen entwickelte Auswertungsregeln zurückgeführt werden, gibt es keinen Grund zur Annahme, dass nicht einige Teilprozesse angeboren sein könnten, welche die Konstanzvorgänge erst möglich machen (37,110).

### **3.12 Mechanismen der statischen Wahrnehmung**

#### **Visuelle Umwelt**

Das Auge wird häufig mit einer Kamera verglichen, jedoch existiert zwischen den beiden ein ganz bedeutender Unterschied. Während jeder gewöhnliche Photoapparat einen Verschluss hat, mit dessen Hilfe das Bild gleichsam „eingefroren“ werden kann, verfügen die Augen aller Lebewesen über keine derartige Vorrichtung. Dennoch ist die Welt, wie wir sie durch unsere Augen sehen, nicht verwischt. Geht man eine Straße entlang, so erscheinen die Gebäude, an denen man vorbeikommt, vollständig unbewegt und keinesfalls als das Bündel von Strichen, das sie optisch auf der Netzhaut erzeugen. Bei Fußgängern und umherfahrenden Fahrzeugen entsteht der Eindruck, dass sich alle durch den gleichen statischen Sehraum bewegen und dabei scharfe Umrisse haben, obwohl sie sich in verschiedene Richtungen und mit ganz unterschiedlichen Geschwindigkeiten fortbewegen. Egal, ob wir ruhig stehen, oder umhergehen, ohne Mühe unterscheidet das Auge die sich bewegenden Objekte von den ruhenden, und ebenso mühelos setzt es den optischen Fluß auf der Netzhaut in eine perfekt strukturierte Welt von Objekten um.

Für jegliche Art der Fortbewegung stellt die Umwelt das Bezugssystem dar; wir nehmen die Umwelt als stationär und uns selbst als in Bewegung befindlich wahr. Wenn der Mensch sich bewegt, verschiebt sich die Welt um ihn. Nähert er sich einem Objekt, so dehnt es sich innerhalb seines Gesichtsfeldes aus; geht er an ihm vorüber, so dreht es sich relativ zu seiner sich verändernden Position. Mit jedem Drehen oder Nicken des Kopfes richtet sich die Umgebung anders aus; beim Umherblicken verschiebt sich auch das Netzhautbild von der Außenwelt. Dennoch dringt normalerweise nicht ins Bewußtsein, wie durch eigenes Tun die Umwelt hin- und herbewegt wird. Im Folgenden soll auf Mechanismen eingegangen werden, die uns in die Lage versetzen, ungeachtet unserer Eigenbewegung unsere Umgebung als statisch wahrzunehmen.

Dreht ein Betrachter bei ruhender Umgebung den Kopf, nimmt er sie als ruhend wahr; rotiert dagegen seine Umgebung, während sein Kopf ruht, so nimmt er sie als bewegt wahr. Die Umgebung wird also realitätsgerecht als unbewegt bzw. bewegt gesehen, obwohl ihre Abbildung auf der Netzhaut gleichartige Bewegungsmuster hervorruft. Über Mechanismen, die sie mit den körpereigenen vergleichen, werden visuelle Informationen über die relative Verschiebung der Umgebung kompensiert. Stehen die visuellen und die körpereigenen Daten in einer bestimmten festen Beziehung zueinander, so wird die Umwelt als unbewegt

wahrgenommen, als bewegt dagegen wird sie wahrgenommen, wenn diese Relationen sich verändern.

Experimentell wurde untersucht, wie groß der Unterschied zwischen der Körperbewegung des Betrachters und der Bewegung seiner Umgebung sein muß, bis er meint, seine Umgebung bewege sich, wie groß also der Bereich wahrgenommener Stabilität beim Drehen des Kopfes ist. Dreht eine Person den Kopf um 20 Grad, so verschiebt sich das Erblickte normalerweise um 20 Grad in die entgegengesetzte Richtung und erscheint als unbewegt.

Experimentell wurde, ausgehend von objektiver Unbeweglichkeit ein Unbeweglichkeitsbereich, gemessen als Verschiebungsindex, von 0,015 bis 0,030 in jeder Richtung gemessen, was aussagt, dass die Versuchspersonen Verschiebungen erst bemerkten, wenn sie 1,5-3% ihrer Kopfdrehung überschritten. Dabei spiegelt jeder Unbeweglichkeitsbereich, unabhängig davon, ob es sich um visuelle, auditive oder andere Reize handelt, einen Kompensationsprozeß wider, der von körpereigenen Reizen gesteuert wird.

Bei der Klärung der Fragestellung, um welchen Winkel ein Objekt rotieren muß, damit ein vorbeigehender Betrachter die Drehung bemerkt, ergab sich, dass besagter Winkel mehr als 40% des Bewegungswinkels des Probanden betragen muß.

Sehr genau funktioniert der Mechanismus, der die Folgen von Kopfbewegungen ausgleicht. Bereits seit mehr als hundert Jahren ist bekannt, dass der Mensch auch eine anomale Beziehung zwischen Kopfdrehung und Verschiebung der Außenwelt kompensieren kann. 1896 trug George Stratton von der University of California in Berkeley eine Umkehrbrille, die seine visuelle Umwelt gleichsinnig mit einer Kopfdrehung verschob und nicht entgegengerichtet wiedergab, wie es normal wäre. Zunächst bemerkte Stratton die ungewöhnlichen Bewegungen ganz deutlich; nachdem er die Brille allerdings zwei Tage lang aufgehört hatte, stabilisierte sich die sichtbare Welt für ihn. Seine Wahrnehmung schien sich somit an die neue Relation zwischen Eigenbewegung und Objektverschiebung angepaßt zu haben. Diese Annahme bestätigte sich, als er die Brille nach acht Tagen abnahm und feststellte, dass seine Umgebung nun bei den wiederhergestellten normalen Verhältnissen zu schwanken schien, und zwar seinen Kopfbewegungen entgegengerichtet, da sich im Laufe des Experiments Strattons Unbeweglichkeitsbereich verschoben hatte.

## **Anpassungsmechanismen an die Umwelt**

Zur Untersuchung dieser Anpassungsmechanismen wurden Versuchspersonen in eine Umgebung versetzt, in der das normale Eins- zu- eins- Verhältnis von Kopfbewegung und Verschiebung der Umwelt nicht mehr galt. Dazu trugen sie Weitwinkelbrillen, die die visuelle Umgebung um 34%, was einem Verschiebungsindex von 0,34 entspricht, verlagerten. Nach sechs Stunden wurde die Anpassung untersucht. Ohne Brille erschien den Versuchspersonen die Umgebung nur noch dann als feststehend, wenn sie sich synchron zur Kopfbewegung mit einem durchschnittlichen Verschiebungsindex von 0,175 drehte. Somit hatten sie sich teilangepaßt; ihr Unbeweglichkeitsbereich war so weit verändert, dass etwa die Hälfte der anomalen Verschiebungen ausgeglichen wurde. Erstaunlich ist dabei, wie stark das Ausmaß der Anpassung von Individuum zu Individuum variiert. Eine der Versuchspersonen hatte sich nach sechs Stunden sogar vollständig angepaßt und nahm bei einem Verschiebungsindex von 0,34 die Umgebung als stabil wahr.

## **Augenfolgebewegungen und Feldanpassung**

Im Anpassungsprozeß an eine neue Beziehung der Bewegungen von Kopf und Umgebung spielt das Ausmaß der Augenbewegungen eine Rolle, wie auch die Verschiebung des Gesichtsfeldes insgesamt, unabhängig von irgendwelchen anomalen Augenfolgebewegungen. Dieser zweite Effekt wird als Feldanpassung bezeichnet. Das Fixieren eines einzelnen Punktes bei einer Kopfdrehung bewirkt eine Anpassung an anomale Verschiebungen der gesamten visuellen Umwelt. Es ist nahe liegend, dass es die Anpassung der Augenbewegung ist, die der normalen Anpassung zugrundeliegt, die experimentell erzeugt wurde. Bei der Feldanpassung dagegen scheint es sich um ein eigenständiges Phänomen zu handeln, das wahrscheinlich auf einer höheren Ebene des Wahrnehmungsprozesses stattfindet; hierbei werden bereits Augenposition und Augenbewegung eingerechnet und die Verschiebungen des gesamten visuellen Feldes berücksichtigt.

Augenfolgebewegungen, welche eine Kopfdrehung kompensieren, kommen zum einen vor, wenn die Umgebung dem Sehorgan einen statischen Fixationspunkt bietet, zum anderen im Dunkeln, wenn visuelle Reize fehlen. Die automatischen kompensatorischen Bewegungen im Dunkeln sind als Dodge- Reflex bekannt, benannt nach dem amerikanischen Experimentalpsychologen Raymond Dodge (1871-1942), und scheinen genau auf das normale

Verhältnis zwischen Kopfdrehung und Suchbewegung des Auges abgestimmt zu sein, das heißt auf die normale Relation von Kopfbewegung und Positionsänderung der Umgebung.

Damit eine Person die Umgebung als statisch wahrnimmt, wenn die Weite der Augenbewegung kürzer ist als normal, muß das Nervensystem die Folgebewegungen überschätzen. In einer solchen Situation wird das Ausmaß der Augenbewegung falsch eingeschätzt. Offenkundig bringt die Anpassung an anomal geringe Relativverschiebungen der Umwelt mit sich, dass die notwendigen Augenfolgebewegungen überbewertet werden und so die tatsächliche Verschiebung der Außenwelt überschätzt wird.

Wenn auch die Feldanpassung im Experiment keine Rolle spielt, so heißt das nicht, dass unter gewöhnlichen Umständen die Augenbewegungen allein das Ausmaß signalisieren, in dem sich die Umgebung bei einer Kopfdrehung verlagert. Die Alltagswelt unterscheidet sich von den Laborbedingungen vor allem darin, dass der Blick eines Menschen nicht immer auf einen einzelnen Punkt der Umgebung fixiert bleibt, wenn er den Kopf dreht. Unter komplizierteren und somit realeren Versuchsbedingungen werden die Verschiebungen der Umgebung nicht nur auf der Ebene der Augenbewegungen, sondern auch auf einer höheren Wahrnehmungsebene erfaßt. Wahrscheinlich nutzt der Kompensationsprozeß, der vermutlich aus zwei gleichzeitig ablaufenden Prozessen besteht, unter normalen Bedingungen beide Arten von Eingangssignalen und vergleicht sie mit körpereigenen Informationen, um so die Umgebung als ruhend wahrzunehmen. Beide Mechanismen, die sich unter Feld- und Augenbewegungsanpassung verändern, gehören zur alltäglichen Wahrnehmung; als Folge der Kompensationsprozesse nehmen wir die Welt trotz unserer Eigenbewegung als ruhend wahr.

## **Entwicklungsgeschichte und visuelle Wahrnehmung**

Das Auge hat sich in der Evolution vor allem als ein System für das Bewegungssehen entwickelt, denn das Entdecken von Bewegung ist lebenswichtig. Bei vielen niederen Tieren scheint die rasche und sichere Wahrnehmung von sich bewegenden Objekten die wichtigste Funktion des Sehens zu sein. Ein Frosch beispielsweise kann seine Beute nur dann fangen, wenn sie sich bewegt. Eine still verharrende Fliege wird selbst dann nicht bemerkt, wenn sie sich in unmittelbarer Reichweite befindet.

Eine ähnliche Abhängigkeit von Veränderungen im visuellen Reizmuster läßt sich auch beim Menschen nachweisen. Wird experimentell dafür gesorgt, dass sich das Bild auf der Netzhaut einer Versuchsperson nicht verschieben kann, wird es sehr rasch immer schwächer

wahrgenommen, bis es schließlich ganz verschwindet. Im Grunde ist das Auge eher ein Instrument zur Analyse von zeitlichen Änderungen im Lichtfluß als zur Erfassung von statischen Mustern. Ohne Veränderungen im Licht, das auf den Rezeptor trifft, gäbe es keine Veränderung im Ionenfluß und dementsprechend auch keine neuronale Antwort (47,94).

#### **4. Grundlagen der Raumwahrnehmung aus entwicklungspsychologischer Sicht**

Der Mensch ist in der Lage, Ansichten aus gänzlich verschiedenen Perspektiven ein und demselben Objekt zuzuordnen, eine Tatsache, die besonders augenfällig macht, dass dieses beim Sehen auch im Kopf repräsentiert sein muß. Die Fähigkeit, Objekte der visuellen Umwelt relativ unabhängig von ihrer Lage im Raum zu identifizieren, kommt nicht von ungefähr. Kleinkinder besitzen sie noch nicht und Erwachsenen kann sie infolge von Hirnverletzungen wieder abhanden kommen.

Da der Schluß nahe liegt, dass die relative Unabhängigkeit des Erkennens vertrauter Objekte von ihrer räumlichen Lage eine Folge von Lernvorgängen ist, geht man in der Entwicklungspsychologie davon aus, das Kleinkind erlerne das Erkennen von visuellen Objekten dadurch, dass es sie zugleich mit den Händen befühlt, dreht und wendet. Der Tastsinn wäre demnach, wie bereits von Bischof Berkeley behauptet, der Lehrmeister des Gesichtssinns.

Tatsächlich zeigte sich in Experimenten, dass diejenigen Probanden, welche die körperlichen Objektmodelle durch motorisches Begreifen erkundet hatten, signifikant besser in der Lage waren, ihnen unvertraute Ansichten den gelernten Objekten richtig zuzuordnen. Zudem besaßen die haptisch vorerfahrenen Probanden deutliche Vorteile beim Erkennen der spiegelbildlichen Objekte. Darüberhinaus führt die zusätzliche Erfahrung mit den körperlichen Objektmodellen auch zu einem vertieften Wissen über die räumliche Objektstruktur (47,49).

Im Folgenden soll näher auf die Entwicklung der Raumwahrnehmung aus entwicklungspsychologischer Sicht eingegangen und es sollen zwei Modelle der Kindesentwicklung vorgestellt werden.

##### **4.1 Lernprozesse und Gedächtnisleistungen**

Bei Mensch und Tier ist das Gehirn das zentrale Organ zur Steuerung überlebensfördernden Verhaltens. Zu diesem Zweck nimmt es über die Sinnesorgane Reize aus der Umwelt auf und erstellt verhaltenssteuernde Programme. Selbst bei sehr einfachen Tieren handelt es sich bei diesem Vorgang keineswegs um ein reines Reiz- Reaktionsschema, innerhalb dessen einem bestimmten Reiz stets eine bestimmte Verhaltensweise zugeordnet wird. Vielmehr wird bei allen Tieren, wenn auch in sehr unterschiedlichem Maße, bei der Erstellung von

Verhaltensprogrammen die einlaufende Information zusammen mit angeborener oder individuell erworbener Vorerfahrung verarbeitet. Hieraus entstehen interne Repräsentationen, nur aufgrund derer Tiere in einer Umwelt überleben können, die nicht trivial einfach ist (7,112).

## **Lernen**

Der Begriff, dem für die Entwicklungspsychologie die größte Bedeutung zukommt, ist der des Lernens als Sammelbegriff für eine Vielzahl verschiedener Prozesse, durch die es zu Verhaltensänderungen kommt.

„Lernen kann als Erwerb neuen Wissens bzw. als Entwicklung von Zusammenhängen zwischen Reizeingabe, Reizverarbeitung und daraus folgenden neuen bzw. anderen Verhaltensweisen verstanden werden. Lernen bedeutet die Fähigkeit, das angeborene Verhaltensprogramm zu komplettieren oder zu ändern. Lernen ist damit die Individualisierung von angeborenem Verhalten“ (88, S 39).

Im allgemeinen Sprachgebrauch versteht man unter Lernen das Erreichen eines Leistungsfortschritts aufgrund gezielter Anstrengung und Übung. Der psychologische Lernbegriff ist weiter gefaßt. Unter ihn fallen alle mehr oder weniger überdauernden Verhaltensänderungen aufgrund von Erfahrung, Übung oder Beobachtung, unabhängig davon, ob diese Veränderungen mit einem Leistungszuwachs verbunden sind oder absichtlich herbeigeführt wurden. Demnach fällt nicht nur der Zuwachs an Fertigkeiten und Kenntnissen unter den Begriff des Lernens, sondern auch Veränderungen von Gewohnheiten, Motiven, Einstellungen usw. Lernen kann dabei sowohl zur Aneignung neuer Verhaltensmuster führen als auch zur Veränderung von im Verhaltensrepertoire bereits vorhandenen Merkmalen (1,83,88,90).

Für den Schweizer Psychologen Jean Piaget ist Lernen kein blindes Probieren bereits gegebener Verhaltensmuster im Sinne von Versuch und Irrtum und deren mechanischer Verknüpfung mit Stimulus- Situationen, sondern immer der gezielte Versuch zur Problembewältigung vor dem Hintergrund biologischer Anpassungsfunktionen, wobei der Organismus nicht bloß passiver Empfänger von Umweltreizen ist; Erfahrung ist nicht ohne die organisierende und konstruktive Aktivität eines handelnden und denkenden Subjekts möglich.

Für Piaget hat ein angemessener Lernbegriff zu erklären, wie ein Individuum die Wirklichkeit aufbaut und erfindet, nicht bloß wie die Wirklichkeit wiederholt und abgebildet wird. Seine Position bezüglich der Steuerung von Entwicklungsprozessen, speziell hinsichtlich der Rolle von Erfahrung und sozialem Lernen, läßt sich zusammenfassend dahingehend charakterisieren, dass Entwicklung im wesentlichen durch die biologisch fundierten und selbstregulierten Anpassungsaktivitäten des Organismus an die Umwelt zustande kommt. Dabei wechseln Zustände des Gleichgewichts mit solchen des Ungleichgewichts. Letzteres entsteht laut Piaget aufgrund der mangelnden Assimilierbarkeit oder Integration von Erfahrungen, was zu Akkomodationsversuchen führt, die auf höherer Ebene wieder ein Gleichgewicht herstellen. Durch die Erfahrung des Ungleichgewichts als Ausdruck der Unzulänglichkeit wird Lernen zwar angeregt, greift aber darüberhinaus nicht steuernd in den Entwicklungsprozeß ein.

Die Abfolge aufeinanderfolgender Gleichgewichtszustände, die aus der Interaktion des Organismus mit seiner Umwelt resultiert, ist logisch notwendig, Erfahrung hingegen ist beim Aufbau der Erkenntnis nicht primär gegeben, sondern entsteht aus der intellektuellen Aktivität des Individuums. Soziale Anleitung und Unterweisung kann das spontane Lernen in der natürlichen Umwelt nur unwesentlich beschleunigen, nicht aber steuernd in die Entwicklung eingreifen (63,72).

Das Gehirn befindet sich in Ruhe und bei Aktivität nicht in zufälligen, sondern vielmehr in chaotischen Zuständen, einer „geordneten Unordnung“ mit der Fähigkeit zur Selbstorganisation in einem nichtlinearen System. Sehr schwache Reize können dabei genügen, um grundlegende Zustandsänderungen herbeizuführen, weshalb das Chaos immer neue Aktivitätsmuster produzieren kann. Jede Hirnzelle hat eine ganzheitliche Potenz, aber nur in ihrer Gesamtheit sind die differenzierten Funktionen, vor allem Phantasie, Kreativität und Emotionalität zu verwirklichen. Die verschiedenen Hirnareale werden unterschiedlich synchronisiert, wobei die richtige Verschaltung des Gehirns von einer spezifischen Stimulation in frühen Entwicklungsphasen abhängt (88).

Erfahrungsabhängige Entwicklungsprozesse und Lernvorgänge ähneln sich in vielerlei Hinsicht; ihre Übergänge sind fließend und es ist kaum möglich, zu entscheiden, wo Entwicklung endet und Lernen beginnt. Während der Embryonalentwicklung dienen aktivitätsabhängige Prozesse dazu, die Bauteile des Zentralnervensystems sowohl einander als auch den Effektoren anzupassen, in der frühen Ontogenese nehmen sie unter dem Einfluß von Umweltgegebenheiten die Feinabstimmung der Verschaltungen in sensorischen und motorischen Zentren vor und im ausgereiften System schließlich vermitteln sie die Fähigkeit

zu lernen. Lernprozesse beruhen auf aktivitätsabhängigen Veränderungen neuronaler Wechselwirkungen. Dabei ist allen Lernvorgängen im Gehirn gemeinsam, dass neuronale Aktivität zu lang andauernden Veränderungen im System führt, die ihrerseits Modifikationen des Verhaltens bewirken. Lernen kann demnach als eine nachhaltige aktivitätsabhängige Veränderung von Funktionsabläufen im Gehirn gesehen werden.

Die Fähigkeit des Nervensystems, die Aktivitäten eines sinnlichen Wahrnehmungssystems in eine größere Ordnung zu überführen oder verschiedene Wahrnehmungssysteme auf einer höheren Stufe miteinander zu verknüpfen, stellt ein Funktionieren in einer ganzheitlichen Art und Weise dar. Die Empfindungen, die von den im ganzen Körper ablaufenden Anpassungsreaktionen geliefert werden, erzeugen ein wohlgeordnetes und ausgeglichenes Aktivitätsmuster im Großhirn (7,85,88,90).

Damit das Gehirn eine angemessene Körperreaktion und ebenso sinnvolle Wahrnehmungen, Gefühlsreaktionen und Gedanken erzeugen kann, bedarf es der sensorischen Integration, das heißt der Ordnung und Verarbeitung des sensorischen Inputs, also der sinnlichen Eindrücke. In dem Moment, wo die Hirnfunktionen vollständig und ausgewogen ablaufen, solange der Körper mit all seinen Sinnen als ein Ganzes zusammenwirkt, erreichen beispielsweise die Körperbewegungen ihr höchstes Maß an Anpassung; Lernen stellt dann für das Gehirn eine relativ einfache Aufgabe und richtiges Verhalten einen ganz natürlichen Zustand dar (7,18).

Das Programm, nach welchem Funktionsabläufe im Gehirn koordiniert werden, beruht auf den spezifischen Wechselwirkungen zwischen einzelnen Nervenzellen, welche wiederum bestimmt sind vom Verschaltungsmuster und von der jeweiligen Wirksamkeit der einzelnen Verbindungen. Entscheidend ist also die Architektur des Gesamtsystems, woraus folgt, dass jeder Lernvorgang auf einer Modifikation der Wechselwirkungen zwischen Nervenzellen beruhen muß. Im erwachsenen Gehirn kann die Kopplung von Nervenzellen allein dadurch verstärkt bzw. abgeschwächt werden, dass bestehende Verbindungen in ihrer Wirksamkeit modifiziert werden.

Mit Ende der frühen Kindheit ändert sich die physische Struktur der meisten Neuronen nicht mehr nennenswert, die Fähigkeit der Synapsen, nervöse Impulse zu vermitteln, dagegen schon. Die Änderungen in der Leitfähigkeit der Synapsen stellen die Basis für jede Form des Lernens dar.

Lernen stellt eine Funktion des gesamten Nervensystems dar. Je intensiver daher alle sensorischen Systeme eines Kindes zusammenarbeiten, desto mehr kann es quantitativ lernen und desto leichter fällt es ihm. Mit der Schwerkraft und ihren Wirkungen auf den Körper beginnt das Lernen: Aufrecht zu sitzen, eine Rassel zu schütteln, Treppen aufwärts zu steigen

oder aber einen Stift zu halten, fördert die Aufnahmefähigkeit des Gehirns, um darauf aufbauend komplexe Dinge zu lernen. Während ein Kind spielt, geschieht etwas ganz entscheidendes: es lernt, *wie* man lernt. Auch in der lebenswichtigen Situation der Nahrungsaufnahme zeigt sich die Lernfähigkeit des Kindes. Es lässt sich beobachten, wie die Saugreaktion allmählich durch Übung an Sicherheit gewinnt, die Bewegungen gezielter und kräftiger werden (7,18,82,83,85,88).

## **Gedächtnis**

„Gedächtnis wird als Fähigkeit angesehen, das Wissen wiederfindbar zu speichern. Gedächtnis ist über das ganze Gehirn verteilt. Es werden unterschiedliche Gedächtnissysteme, z.B. für verschiedene Arbeiten wie Lesen, Schreiben, Rechnen und Musik differenziert. Von besonderer Bedeutung ist die Ausblendung unwichtiger Ereignisse. Kurzzeitiges Lernen kann durch Veränderungen der neuronalen Verschaltung und der Membranfunktion erklärt werden; Langzeiterinnerung verlangt eine Neusynthese von Proteinen in den Nervenzellen“ (88, S 39). Gedächtnisleistungen sind bereits im Uterus möglich. Als früheste Manifestation der Lernfähigkeit treten bedingte Reflexe in der Nahrungssituation auf, die jedoch später, sobald die Situation als Ganzes für das Kind überschaubar wird, wieder verschwinden. Als weitere Gedächtnisleistungen gelten Verhaltensweisen wie das Nachblicken nach einem verschwundenen Gegenstand, die in verschiedenen Situationen auftretende Erwartung, das Wiedererkennen von Objekten, sowie das Erstaunen bei Fremdheitseindrücken. Sobald die Fähigkeit zur sprachlichen Formulierung von Vorstellungen einsetzt, zeigt sich das Erinnerungsvermögen des Kindes am häufigsten beim Ausbleiben erwarteter Ereignisse oder Begegnungen, bei Verlusten, bei emotional stark besetzten einmaligen Ereignissen oder beim Wiedererkennen von Orten. Die bedeutendsten Gedächtnisleistungen vollbringt das Kind im Zusammenhang mit seiner Sprachentwicklung, wobei es ein starkes Übungsbedürfnis an den Tag legt.

Durch Reizung der Sinnesorgane und Bewegungsaktivität während der frühen Kindheit werden die Neuronen und Synapsen angeregt, sensorische und motorische Verarbeitungsprozesse aufzunehmen, die für den Rest des Lebens der betreffenden Person relativ konstant erhalten bleiben. Da das Kleinkind noch über genügend Kapazitäten verfügt, um neue Nervenverbindungen aufzubauen, ist es auch sehr beweglich in seinen Wahrnehmungen und Verhaltensweisen und lernt relativ rasch und leicht. Das Ausbilden

neuer Verbindungen entwickelt zusätzliche Möglichkeiten für neuronale Kommunikation (1,7,18,82,85,88).

## **Intelligenz**

Über je mehr Nervenverbindungen eine Person verfügt, desto größer ist ihr Lernvermögen und somit auch ihre Intelligenz, die vielfach als die Fähigkeit zur Anpassung des Individuums an neue Situationen und ebenso zur Einflußnahme auf die Umwelt definiert wird. Darin sieht Mc Call (62) die wichtigste Funktion der Intelligenz. In beiden Fällen geht es darum, die Beziehung der Elemente der Umwelt zueinander und zu sich selbst zu erfassen. Voraussetzungen von Intelligenzleistungen bilden kognitive Stützfunktionen wie Wahrnehmung, Gedächtnisleistungen und in Bezug auf verbale Leistungen Sprachbeherrschung. Jean Ayres definiert Intelligenz als „die Fähigkeit, Beziehungen mit der physikalischen Umwelt oder mit Gedanken und Ideen aufzunehmen“ (7, S 89).

Im Alter von 4-5 Jahren beginnt das teilinhaltliche Erfassen mit der meßbaren Intelligenz zu korrelieren. Die Leistung wird wahrscheinlich durch das Ausmaß der willkürlichen Aufmerksamkeit sowie durch den Grad der erreichten Realitätszugewandtheit bestimmt. Auch beim Schulanfänger stellt der Grad der Fähigkeit zum teilinhaltlichen Erfassen einen Hinweis auf die Art der kognitiven Umweltbewältigung dar.

Die sensorischen und motorischen Anteile des Nervensystems bleiben während der ganzen Kindheit annähernd gleich elastisch. Im Alter von 10 Jahren ist das Wachstum sensorischer Verbindungen im Gehirn ganz oder beinahe ganz abgeschlossen, weshalb es später nicht mehr so einfach ist, neue sensorische Verbindungen im Gehirn aufzubauen (82,83,88,90).

## **Plastizität**

Unter Plastizität verstand die Physiologie des vorigen Jahrhunderts das Phänomen, dass nach einer Verletzung des zentralen und peripheren Nervensystems oft wieder ähnliche Bewegungsabläufe wie vor der Schädigung beobachtet wurden, was zu der Theorie führte, dass nicht ein einzelnes Zentrum für die Bewegungssteuerung zuständig sein könne, ein

Ansatz, der im Gegensatz stand zur Lokalisationstheorie definierter Funktionen. Der russische Physiologe I. P. Pavlov erweiterte den Begriff der Plastizität und verstand hierunter die Anpassung der Großhirnrindenfunktionen an die Umweltbedingungen, wonach Plastizität die Voraussetzung für jegliche Art von Lernvorgängen darstellt.

Heute versteht man unter Plastizität hauptsächlich alle die Phänomene, die die Funktionsfähigkeit des Gehirns trotz eingetretener Schädigungen aufrechterhalten bzw. verbessern können.

1986 wurde der Nobelpreis für die Entdeckung des Nervenwachstumsfaktors, es handelt sich hierbei um insulinähnliche Polypeptide, die zum Verständnis der ZNS- Plastizität von wesentlicher Bedeutung sind, an R. Levy- Montalcini verliehen. Nach umschriebenen Schädigungen können lokal erhöhte Konzentrationen festgestellt werden.

Werden bei einem jungen Tier experimentell umschriebene Großhirnareale entfernt, so kommt es zum Aufbau kompensatorischer Funktionsstrukturen in anderen Hirngebieten und zur Ausbildung alternativer Nervenbahnsysteme, wobei Fischen und Amphibien andere Regenerationsmöglichkeiten zur Verfügung stehen als Vögeln und Säugetieren.

Beim Menschen gibt es sicher keine einfache Beziehung zwischen der Ausprägung einer anatomisch- strukturellen Veränderung des Gehirns und hieraus ableitbaren Funktionsstörungen. Schädigungen eines umschriebenen Hirnareals können unter Umständen durch Umstrukturierungen von neuronalen Funktionen im Bereich der Dendriten und Synapsen ausgeglichen werden, durch kleine Defekte können aber auch ausgeprägte bleibende Fehlfunktionen entstehen; dabei spielen der Zeitpunkt der Schädigung und das Einsetzen von Reparaturmechanismen eine große Rolle.

Die im Gehirn angelegten neuronalen Verbindungen und synaptischen Verschaltungen werden in hohem Maße durch die jeweiligen individuell vorgefundenen Nutzungsbedingungen herausgeformt und stabilisiert. Vor allem mit Hilfe bildgebender Verfahren konnte sogar bei Erwachsenen gezeigt werden, dass es durch veränderte Nutzungsbedingungen zu bis dahin unvorstellbaren Reorganisationsprozessen, zu unerwarteten morphologischen Anpassungen (z.B. nutzungsabhängige Vergrößerung des Hippocampus), zu Änderungen der synaptischen Dichte, der neuronalen Konnektivität und der globalen metabolischen Aktivität in einzelnen Verarbeitungszentren kommt, wenn diese besonders häufig und intensiv aktiviert, das heißt benutzt werden.

Derartige adaptive Modifikationen neuronaler Verschaltungen sind umso leichter auslösbar, werden umso rascher stabilisiert und strukturell verankert und beeinflussen die weitere Nutzung und Ausformung anderer neuronaler Netzwerke umso nachhaltiger, je weniger

ausgereift, gefestigt und gebahnt die im Gehirn bereits angelegten Verschaltungen sind. Sehr früh während der Individualentwicklung auftretende Störungen oder Veränderungen der bisherigen Nutzungsbedingungen können daher zu ganz erheblichen funktionellen, strukturellen, ja sogar morphologischen Anpassungen der neuronalen Matrix führen, die im späteren Verlauf des Entwicklungsprozesses oftmals nur schwer durch nunmehr entsprechend modifizierte Nutzungsbedingungen korrigierbar sind (39,82,85,88,112,126).

## **Prägung**

Ein weiteres Phänomen menschlichen Lernens ist das der Prägung. Eine seit langem bekannte praktische Konsequenz, die sich daraus ergibt, ist die frühzeitige Erkennung und Behandlung des Schielens ab der Säuglingszeit, mit dem Ziel, bleibende Sehstörungen zu vermeiden. Auch die intrauterinen Bewegungen des Feten, die intrauterine Reizaufnahme, die Ausbildung eines harmonischen Schlaf- Wach- Rhythmus und die Vermeidung von Streß sind nachgewiesenermaßen Faktoren, die über das Phänomen der Prägung die Gehirnentwicklung wesentlich beeinflussen (88).

## **Synaptische Übertragung**

Die Fähigkeit, Sinneseindrücke festzuhalten und bei wiederholtem Erleben als bekannt wiederzuerkennen, beruht auf der selektiven aktivitätsabhängigen Verstärkung bzw. Abschwächung synaptischer Wechselwirkungen. Bei Wiederauftreten einer bereits gespeicherten Musterkonstellation werden die gebahnten Verbindungen bevorzugt aktiviert, das Muster wird wiedererkannt. Selbst wenn nur Teilaspekte angeboten werden, kann das gesamte Muster reaktiviert werden, ebenso, wenn ein neues Muster lediglich gewisse Ähnlichkeiten mit bereits gespeicherten Inhalten aufweist.

Lernfähige Nervennetze mit ihrer Fähigkeit, von Teilaspekten ausgehend zu generalisieren, verhalten sich also wie assoziative Speicher, deren Funktion vorwiegend in der Großhirnrinde realisiert wird. Die Veränderungen der neuronalen Wechselwirkungen erfolgen dabei gleichzeitig in all den Strukturen, die bei dem jeweiligen Wahrnehmungsvorgang aktiviert wurden. Das neuronale Substrat für einen bestimmten Gedächtnisinhalte bilden also in der

Regel gleichzeitige Veränderungen zahlreicher neuronaler Verbindungen in weit verteilten, aber miteinander in Wechselwirkung stehenden Hirnrindenarealen.

Starke und gleichzeitige Aktivierung von Afferenzen und deren nachgeschalteten Zellen führt zu einer lang anhaltenden Verbesserung der synaptischen Übertragung, der Langzeitpotenzierung. Schon wenige Sekunden hochfrequenter Aktivierung afferenter Bahnen können ausreichen, um die Wirksamkeit der Synapsen über mehrere Stunden hinweg zu verstärken. Grundlage der synaptischen Plastizität sind molekulare Mechanismen, die durch den Einstrom von Calciumionen induziert werden.

Andererseits kann neuronale Aktivität nicht nur zur Potenzierung, sondern auch zur Depression der synaptischen Übertragung führen, was bei Lernvorgängen eine ebenso wichtige Rolle zu spielen scheint wie die Langzeitpotenzierung. Zur Depression kommt es immer dann, wenn die Aktivität einer präsynaptischen Faser nicht hinreichend gut mit der Aktivität der nachgeschalteten Zelle korreliert. Auch hier erfolgt ein Anstieg der intrazellulären Calciumkonzentration, allerdings vorwiegend über spannungsabhängige Kanäle. Zur Induktion der Langzeitpotenzierung sind wesentlich höhere Calciumkonzentrationen erforderlich, als zur Induktion der Langzeitdepression.

Nicht jede Aktivierung neuronaler Verbindungen führt zu bleibenden Veränderungen der synaptischen Übertragungseigenschaften; dazu bedarf es zusätzlicher, vom Hirn selbst erzeugter Steuersignale. Nur wenn diese verfügbar sind, können Veränderungen induziert werden. Ähnlich wie die Optimierung der neuronalen Verschaltung während der Entwicklung wird auch die Engrammbildung im ausgereiften Gehirn von global organisierten Kontrollsystemen überwacht, die ihre Information aus Strukturen des limbischen Systems beziehen und deren Aktivität zentrale Zustände wie Wachheit, Aufmerksamkeit und Motivation widerspiegelt.

Der Hippocampus und der Mandelkern nehmen hierbei eine Schlüsselrolle ein, da Inhalte nur dann gespeichert werden, wenn ihnen Aufmerksamkeit geschenkt wird und sie als verhaltensrelevant identifiziert wurden. Amygdala und Hippocampus sind aufgrund ihrer vielfältigen Verbindungen zu anderen Hirnregionen in der Lage, die Bedeutung der jeweils verarbeiteten Signale zu bewerten; sie projizieren ihrerseits über weitverzweigte Bahnsysteme auf die Großhirnrinde zurück.

In dieses Projektionssystem miteinbezogen sind der Gyrus cinguli, der Fornix, die rostralen Thalamuskern, die Habenula- und Mamillarkern und die cholinergen Neurone im Meynert-Kern im basalen Vorderhirn, limbische Strukturen, die vor allem bei deklarativen oder episodischen Gedächtnisfunktionen eine tragende Rolle spielen. Hierbei handelt es sich um

das Vermögen, Wissen über bestimmte Ereignisse im richtigen zeitlichen und räumlichen Kontext abzuspeichern und diese Erinnerungen auch ohne direkten, auf sie verweisenden Auslösereiz zu reaktivieren.

Typische Funktionen des deklarativen Gedächtnisses sind die Fähigkeit, sich an einmal erlebte Situationen zu erinnern und über sie berichten zu können, oder das Vermögen, sich in einer neuen Umgebung nach einmaliger Orientierung zurechtzufinden. Die Hippocampusformation zur Engrammbildung und zum Auslesen bereits niedergelegter Engramme ist in beiden Fällen unerlässlich. Den Mandelkernen hingegen obliegt die Funktion, die Engramme mit emotionalen Beiwerten zu versehen. Nicht erforderlich dagegen sind die limbischen Strukturen für das Abspeichern und Wiedererkennen von optischen Mustern, Melodien oder haptischen Erfahrungen, sowie beim Erlernen motorischer Fertigkeiten.

Die meisten Gedächtnisstörungen, die Alzheimer- Krankheit beispielsweise, sind Folge von Läsionen bzw. Defekten in diesen limbischen Steuerzentren, da das Abspeichern von Engrammen beeinträchtigt wird. Die Schaltkreise, die aktivitätsabhängige Veränderungen der synaptischen Übertragung in der Großhirnrinde ermöglichen, werden unterbrochen (7,34,41,85,88).

#### **4.2 Die Organisation räumlichen Verhaltens**

Die Aufteilung des Raums ist deshalb ein sinnvolles Vorgehen, weil sie die Repräsentation des Raums durch das Gehirn verstehen hilft. Raum kann dadurch zwangsläufig nicht mehr als *eine* Sache behandelt werden, sondern als etwas, das in bestimmte Komponenten aufgespalten werden kann. Die verschiedenen Räume, in denen Mensch und Tier aktiv werden, haben vermutlich auch ihre jeweils eigene neuronale Repräsentation.

Eine der Möglichkeiten, räumliche Aktivitäten zu unterscheiden, besteht darin, die sensomotorischen Reaktionen bei Bewegungen von Mensch und Tier als Grundlage dafür zu nehmen. Diese Verhaltensweisen können dabei in drei verschiedene Typen unterteilt werden, nämlich in selbstbezogene Positionsreaktionen, reizbezogene und ortsbezogene Reaktionen.

Der Kortex mag bei den selbstbezogenen und reizbezogenen Reaktionen von Bedeutung sein, eine Sonderrolle kommt ihm aber eindeutig bei den ortsbezogenen Reaktionen zu. Es existieren mindestens zwei neuronale Systeme, welche die für die Repräsentation von Objekten im visuellen Raum relevanten Informationen verarbeiten, der posteriore Parietalkortex und der inferior- temporale Kortex. Beide erhalten Informationen über

Faserverbindungen, die in primären sensorischen Kortexgebieten, unter anderem dem visuellen Kortex, entspringen und projizieren über verschiedenste Faserverbindungen zu anderen Gehirngebieten, insbesondere zum frontalen Kortex und zum Hippocampus. Es wird angenommen, dass der Frontalkortex für die Bewegung auf Ziele im Raum zuständig ist, und zwar auf der Basis von gespeicherten Informationen.

Der Hippocampus kombiniert Informationen aus dem räumlichen Koordinatensystem und aus dem Objekterkennungssystem, um eine räumliche Repräsentation zu gewährleisten, in der Objekte lokalisiert und identifiziert sind. Darüberhinaus scheint er neu erlernte räumliche Repräsentationen an ein Langzeitgedächtnissystem im Neokortex zu senden.

Der posteriore parietale Kortex erzeugt anscheinend ein Koordinatensystem zur Repräsentation von Raum und ordnet Objekte darin ein, jedoch werden diese dort nicht identifiziert. Darüberhinaus ist der parietale Kortex dafür verantwortlich, dass Bewegungen zu bestimmten Stimuli gezielt erfolgen. Der inferiore temporale Kortex hingegen identifiziert zwar Objekte, nicht aber deren Position im Raum.

### **Selbstbezogene Positionsreaktionen**

Unter selbstbezogenen Positionsreaktionen versteht man Bewegungen, die den eigenen Körper als Bezugspunkt verwenden. Dazu zählen etwa Drehungen nach links oder rechts und die Bewegungen von Armen, Beinen oder anderen Körperteilen. Um diese ausführen zu können, sind keine externen Hinweisreize nötig. Sind diese Bewegungen einmal erworben, so werden sie fast immer automatisch und ohne bewußte Überwachung durchgeführt.

### **Reizbezogene Reaktionen**

Reizbezogene Reaktionen werden von einem bestimmten Reiz geleitet. Dazu zählt, dass man auf ein Objekt zugeht oder sich von ihm entfernt, dass man einem Geruch oder Klang folgt oder versucht, ein sichtbares Objekt zu ergreifen. Andere Hinweisreize sind für diese Reaktionen nicht notwendig. Im Allgemeinen genügen hierbei Veränderungen des Reizgradienten, um eine Bewegung zu steuern.

## **Ortsbezogene Reaktionen**

Ortsbezogene Reaktionen führen eine Person zu einem ganz bestimmten Ort oder Objekt, der oder das sich auch außerhalb des unmittelbar sichtbaren Bereichs befinden kann. Geleitet wird die Person dabei normalerweise von Orientierungspunkten, die zwar in Beziehung zum Reiz stehen, für den Reiz selbst jedoch keine Bedeutung haben. Ein interessantes Charakteristikum ortsbezogener Reaktionen scheint darin zu bestehen, dass sie ohne Mühe und latent erworben werden.

## **Kontrollmechanismen**

Die sensorische Kontrolle über das ortsbezogene Verhalten bezieht in erster Linie visuelle Vorgänge mit ein. Somatosensorische Signale und Informationen aus dem Vestibularorgan hingegen spielen eine größere Rolle bei selbstbezogenen Positionsreaktionen. Der Geruchssinn und das Gehör wiederum können reizbezogene Reaktionen ganz ausgezeichnet lenken.

## **Der Körperraum**

Räumliche Verhaltensweisen können auch dadurch unterschieden werden, dass der dreidimensionale Raum, der ein Individuum umgibt, in drei funktional unterscheidbare Räume aufgetrennt wird, von denen jeder einzelne seine eigene neuronale Repräsentation haben kann. Zunächst einmal gibt es den eigenen Körper, auf den bzw. in dem ein Reiz lokalisiert werden kann. Die Unfähigkeit, einzelne Stellen oder Teile des Körpers zu finden oder diese wahrzunehmen, stellt eine Störung dieses Körperraums dar.

## **Der Raum der Reichweite**

Des Weiteren existiert ein Raum der Reichweite, der das Individuum unmittelbar umgibt. Probleme, die sich beim Ergreifen eines Objekts oder bei Augenbewegungen in Bezug auf ein Objekt ergeben, stellen eine Störung dieses Raums dar.

## **Der distale Raum**

Der Raum, der sich außerhalb unserer Reichweite befindet und als ferner oder distaler Raum bezeichnet wird, kennzeichnet sowohl die ein Individuum umgebende Welt, als auch den zeitlichen Raum und den Raum der zeitlichen Ordnung, also die Reihenfolge, in der Ereignisse auftreten. Die oben beschriebenen unterschiedlichen Vorgehensweisen, also positionsbezogene, orts- und reizbezogene Reaktionen, können für Handlungen in jeder dieser Raumarten verwendet werden (58).

### **4.3 Die Evolution des Verhaltens im Raum**

Die Entwicklung von Körper und Gehirn ging in einer Reihe evolutionärer Schritte vonstatten, in deren Verlauf sich die Tiere zunächst mit dem ganzen Körper bewegten, später dann die Fähigkeit zu koordinierten Bewegungen mit ihren Gliedmaßen erwarben und schließlich in der Lage waren, mit den Gliedmaßen einzelne, unabhängige Bewegungen auszuführen.

Analog dazu scheinen sich selbstbezogene und reizbezogene Reaktionen relativ früh in der Evolution entwickelt zu haben, raumbezogene Reaktionen dagegen erst mit Entwicklung des Neokortex aufgetreten zu sein. Mit der weiteren Entwicklung der Bewegungsfähigkeiten der Gliedmaßen wurden die Bewegungsstrategien immer weiter verfeinert.

Es existieren entwicklungsbiologische Hinweise dafür, dass sich räumliche Strategien in Individuen in einer bestimmten Reihenfolge entwickeln. Zuerst treten selbstbezogene Reaktionen auf, später reizbezogene, schließlich dann ortsbezogene. Während dreijährige Kinder hauptsächlich selbstbezogene Reaktionen zeigen, lassen sich bei etwas älteren Kindern oft reizbezogene Reaktionen beobachten, bis schließlich, etwa im Alter von sieben Jahren, vornehmlich ortsbezogene Reaktionen an den Tag gelegt werden.

Diese Entwicklung räumlicher Orientierung verhält sich damit analog zu den Entwicklungsstadien, die Piaget als egozentrisch (Position), konkret (hinweisbezogen) und formal (ortsbezogen) beschrieb (58,63).

#### 4.4 Realer und kognitiver Raum

In der experimentellen Literatur werden dem Raum häufig alle seine scheinbaren Charakteristika auch tatsächlich zugesprochen. Er wird euklidischer oder auch realer Raum genannt. Darüberhinaus existiert jedoch auch eine interne Repräsentation des Raums, das heißt, der reale Raum nimmt im Gehirn eine kognitive Repräsentation ein, die offenbar nicht so detailliert ist wie die reale Umwelt, den kognitiven Raum, der von Erfahrungen abhängig ist und sich mit ihnen verändert, weshalb Kinder nicht in der Lage sind, komplexe kognitive Repräsentationen, insbesondere von distalen Räumen, durchzuführen. Mit zunehmendem Alter gelingt dies immer besser.

Entscheidend bei kognitiven Repräsentationen des Raums ist, dass wir für all seine verschiedenen Aspekte solche Repräsentationen besitzen. Ein Individuum hat ein mentales Bild seines Körpers und dessen Teile auch dann, wenn diese fehlen, wie es etwa bei Phantomgliedern der

Fall ist. Gleiches gilt für alle Objekte und Orte im Raum, seien sie nun sichtbar oder nicht.

Eine der Eigenschaften des kognitiven Raumes ist die der mentalen Rotation, worunter man die Fähigkeit versteht, neue Perspektiven zu gewinnen, die andere Seite von Dingen zu betrachten und ähnliches. Durch Messungen der Reaktionszeit bei derartigen Aufgaben fand man heraus, dass die Zeit für die mentale Rotation proportional zum Winkel ist, um den gedreht wird; je größer der Winkel, desto länger die Rotation. Das wäre auch der Fall, wenn man eine wirkliche Figur im realen Raum drehen würde. Offenbar ist das Gehirn so eingerichtet, dass es räumliche Verhältnisse und Bewegungen im Raum simulieren kann. Wie Versuche mit geburtsblinden Menschen ohne visuelle Vorerfahrungen belegen, ist räumliches Denken nicht an die visuelle Modalität gebunden.

Die räumlichen Fähigkeiten lassen sich in zwei große Kategorien unterteilen, nämlich die der Visualisierung und die der Orientierung, wobei man unter Visualisierung die Fähigkeit versteht, zwei- oder dreidimensionale Bilder oder Objekte im Geiste zu manipulieren bzw. zu drehen, und unter Orientierung die Fähigkeit, sich durch eine veränderte räumliche Konfiguration nicht verwirren zu lassen.

Die neuralen Mechanismen, die kognitiven Raum repräsentieren, geben auch gleichzeitig die Grenzen vor, in denen der reale Raum repräsentiert werden kann. So werden beispielsweise horizontale und vertikale Linien, die im 90°-Winkel zueinander stehen, nicht unterschieden, sind die rechtwinkligen Linien dagegen schräg angeordnet, so kann man sie nicht so leicht

voneinander trennen. Nach einer Hirnverletzung können schräge Linien teilweise gar nicht mehr voneinander unterschieden werden.

Innerhalb unseres großen kognitiven Raums können wir auch die Dimension der Zeit einordnen. Zeit ist offenbar ein kognitives Ereignis. Real können wir sie nicht beobachten, aber das Konzept der Zeit unterscheidet sich von den mentalen Repräsentationen von Orten; gleichwohl können Orte in ganz verschiedenen Zeitdimensionen existieren.

Über die neurologische Repräsentation der Zeit ist nur wenig bekannt. Erwiesen ist jedoch, dass Menschen mit Läsionen im Frontallappen häufig kein Zeitgefühl mehr haben und es ihnen schwerfällt, ihr Verhalten zeitlich zu organisieren (9,38,51,58,75,82).

#### **4.5 Die neuronale Repräsentation des Raums**

Um den richtigen Weg durch unsere Umgebung zu finden, müssen wir uns entscheidende Informationen über die Wegstrecke einprägen. Bisher war jedoch nicht bekannt, wie das Gehirn dies bewerkstelligt. Navigation ist für den Mensch Teil seiner Natur, wichtig für die Anpassung an die Umwelt und das Überleben. Jeden Tag aufs Neue verbringen wir beträchtliche Zeit damit, uns in unserem Umfeld zu orientieren und zu bewegen, doch um sich in einem fremden Stadtteil nicht zu verlaufen, müssen Objekte entlang des Weges identifiziert und als Landmarken im Gehirn gespeichert werden.

Neuropsychologische und Magnet- Resonanz- Studien haben bisher ergeben, dass der Hippocampus, eine Gehirnregion im Temporallappen, bei der räumlichen Navigation von vitaler Bedeutung und speziell der parahippocampale Gyrus mit dem Lernen von Objekten und Objekt- Ort- Assoziationen befasst ist. Trotz der empirisch gezeigten Bedeutung von Landmarken an Entscheidungspunkten war nicht klar, wie das Gehirn mit dieser wichtigen Information umgeht (58).

Mitarbeiter des Max- Planck- Instituts für Psycholinguistik haben herausgefunden, dass der parahippocampale Gyrus auf die Relevanz dieser Markierungspunkte reagiert. Dazu wurden verschiedene Versuchspersonen per Film durch ein virtuelles Museum geführt und es wurde ihnen dabei die Aufgabe gestellt, sich die Objekte entlang ihrer Route zu merken. Die Objekte befanden sich auf Tischen an der Wand und waren zu gleichen Teilen an Kreuzungen, den Entscheidungspunkten, und an simplen Abbiegungen aufgestellt, an denen keine Möglichkeit bestand, einen falschen Weg zu wählen. Bei einer anschließenden Wiedererkennungsaufgabe sahen die Testpersonen die Gegenstände einzeln vor einem weißen Hintergrund, ohne Informationen über die Route. Die Personen lagen während dieses Tests im Kernspintomographen und sollten bei jeder Abbildung per Tastendruck entscheiden, ob sie

den jeweiligen Gegenstand zuvor bereits entlang ihrer Route gesehen hatten oder nicht. Dabei konnte bei Gegenständen, die zuvor an relevanten Orten, den Entscheidungspunkten, platziert worden waren eine stärkere Aktivität im parahippocampalen Gyrus festgestellt werden, als bei Objekten, die sich nur an einfachen Abbiegungen befunden hatten und bei denen eben keine Möglichkeit bestand, einen neuen Weg zu wählen. Ebenso zeigte sich, dass die Speicherung navigationsrelevanter Information unabhängig von Aufmerksamkeitsprozessen erfolgt. Der parahippocampale Gyrus zeigte überdies dieselbe verstärkte Aktivität für erinnerte wie für vergessene Objekte, was verdeutlicht, dass die Assoziation zwischen wegfindungsrelevantem Ort und Objekt sich unabhängig von bewussten Erinnerungsprozessen vollzieht. Relevante räumliche Information wird also automatisch im Gedächtnis gespeichert und kann auch ohne bewusste Wiedererkennung aktiviert werden (123).

Die Universitätsklinik Hamburg- Eppendorf leitete eine Studie mit der Fragestellung, wie der Mensch lernt, sich in seiner Umgebung zurechtzufinden. Aus den Forschungsergebnissen können sich eventuell wichtige Konsequenzen für die Diagnose- und Therapiemöglichkeiten von Patienten mit Gehirnschädigungen (zum Beispiel nach Apoplex), die mit räumlichen Orientierungsstörungen zu kämpfen haben, ergeben.

Während die Gehirnaktivität der Probanden im Kernspintomographen gemessen wurde, wurden sie mehrfach auf einem Bildschirm durch ein Netz von Straßen, Kreuzungen und Gebäuden geführt. Nach jedem Lerndurchgang wurde das neu erworbene Wissen abgefragt, über eine Art Spielekonsole mussten die Versuchspersonen multiple-choice- Fragen beantworten. Es zeigte sich, dass, je stärker der retrospleniale Kortex beim Gang durch die virtuelle Stadt aktiviert war, die Versuchspersonen später umso besser die Navigationsaufgaben lösen konnten. Auch im Hippocampus, der unter anderem für die Gedächtnisbildung wichtig ist, war die Aktivität umso größer, je mehr neues Wissen über den Aufbau der Stadt erworben wurde.

Gegen Ende des Experiments, als die geistige Landkarte fast perfekt war und nur noch wenig neues Wissen hinzukam, wurde die Aktivität dort wieder schwächer (123).

Erwiesenermaßen ist das Gehirn nicht mit Abschluß der Entwicklungsphase fertig und baut danach nur noch ab; vielmehr ist es plastisch und bleibt lebenslang entwicklungsfähig, wobei die Entwicklung von der Erfahrung abhängig ist. Wie eine Untersuchung an Londoner Taxifahrern zeigte, ist das Zentrum für räumliche Vorstellung, der Hypothalamus, umso größer, je länger die betreffende Person bereits Taxi fährt. Erleben formt also das Gehirn (125).

#### **4.6 Die Bedeutung der Sinne für die Entwicklung der Raumwahrnehmung**

Ebenso wie auch Sprechen und Sprache erfordert auch eine intakte visuelle Wahrnehmung als Bestandteil der Raumwahrnehmung eine vorangegangene Integration der Sinne: „Visuelle Wahrnehmung bedeutet, den Sinn von etwas, das man sieht, zu verstehen“ (7, S 111).

Während das Erkennen eines Objekts die einfachste Art der visuellen Wahrnehmung darstellt, bedeutet das Sehen eines Gegenstandes in Bezug zu anderen Gegenständen und deren Hintergrund bereits eine höhere Stufe.

Visuelle Wahrnehmung informiert über verschiedenste Sachverhalte, wobei es, um etwas richtig erkennen zu können, unerlässlich ist, bereits die Antwort auf die jeweilige Frage zu kennen, wofür ein intaktes Sehvermögen allein nicht ausreichend ist. Vielmehr bedarf es der im Lauf der Zeit von der Schwerkraft und von Empfindungen des eigenen Körpers vermittelten Erfahrungen, um eine echte visuelle Wahrnehmung zu entwickeln.

Zu diesem Entwicklungsschritt steuern auch aus dem vestibulären System stammende Reizempfindungen ihren Teil bei, weshalb auch Kinder mit Gleichgewichtsstörungen bisweilen Probleme beim Erkennen dessen, was sie sehen, haben und in ihrer Fähigkeit zur Tiefenwahrnehmung beeinträchtigt sind, was sich z.B. in Schwierigkeiten beim Treppensteigen oder Klettern manifestieren kann.

Bestehen Störungen in Bezug auf die visuelle Wahrnehmung, so bereitet es dem Kind Schwierigkeiten, Formen und Farben aus einer Anordnung herauszusuchen oder sie in neuen Situationen wiederzuerkennen. Es tut sich schwer, mit den Augen Wege, Strecken etc. zu verfolgen, in Räumen findet es sich kaum zurecht und Wege werden nicht wiedergefunden. Das betroffene Kind kann nicht Muster nachlegen, nachmalen oder nachbauen, Formen erfasst es nicht genau. Außerdem fallen ihm die Richtungsbegriffe rechts, links, oben, unten und ähnliches schwer, Arbeitsrichtungen hält es nicht ein.

Ist das Kind dagegen in seiner auditiven Wahrnehmung beeinträchtigt, so kann es sich Reime, Verse, Reihenfolgen und Anweisungen nicht merken, es unterscheidet lange und kurze Laute oder ähnlich klingende Wörter nicht. Da es den richtigen Begriff oft nicht findet, beginnt es, ihn zu umschreiben. Zum Teil kommt es auch vor, dass das Kind etwas sagen will, aber sofort wieder vergisst, was es wollte. Darüber hinaus kann es mit geschlossenen Augen im Raum eine Geräuschquelle nur sehr schwer finden, es versteht Auftragsreihen nicht und hat Probleme beim rhythmischen Sprechen und Klatschen (6,7,18,88,99).

Schon lange bevor es beginnt, optische und akustische Reize zu verarbeiten, beginnt das Gehirn, Gleichgewichtsinformationen zu fühlen und auf sie zu reagieren, wobei die vestibulär ausgelösten Aktivitäten Bausteine für die später einsetzende Entwicklung von Sehen und Hören bereitstellen.

Dem Gleichgewichtssystem kommt die Aufgabe zu, die Orientierung des Kopfes und Körpers im Raum festzustellen, um von den Augen stammende Informationen richtig deuten und beispielsweise feststellen zu können, ob es das betrachtete Objekt, oder aber der eigene Körper ist, der sich in Schiefelage befindet. Die Augen geben lediglich wieder, was sich vor ihnen befindet, informieren das Gehirn aber nicht darüber, *warum* die Dinge so aussehen und nicht anders; sie liefern keinerlei Informationen über den Körper als Ganzes. Um die Beziehungen zwischen Gegenständen, Kopf und Körper ergründen zu können, müssen Schwerkraft- und Bewegungsempfindungen mit denjenigen, die von Muskeln und Gelenken, in erster Linie von der Augen- und Halsmuskulatur, stammen, in Verbindung treten. Das Gleichgewichtssystem erfüllt überdies die Aufgabe der Aufrechterhaltung eines stabilen Gesichtsfeldes, damit betrachtete Gegenstände bei Bewegung nicht plötzlich verwischt werden. Dazu stimmt das Vestibularsystem die Augen- und Halsmuskeln so aufeinander ab, dass jede Kopf- oder Körperbewegung kompensiert werden kann.

Aufgabe der Großhirnrinde ist es, Sinneswahrnehmungen aus dem Gleichgewichtsorgan gemeinsam mit denjenigen aus Muskeln und Gelenken sowie vom Sehorgan zu verarbeiten, um zu erkennen, wo im Raum der Körper sich befindet; dieses Kenntnis wird zu den motorischen Regionen in der Hirnrinde weitergeleitet (6,7,18).

Auch der Tastsinn als die einzige Sinnesmodalität, die über den ganzen Körper verteilt ist, spielt für Raum und Zeit eine erhebliche Rolle und nimmt eine mittlere Position in der Hierarchie der Sinne ein. Auf der Haut heben sich räumliche Distanzen und zeitliche Intervalle genau hervor, bei der Raumvorstellung hingegen ist der Tastsinn dem Auge, beim Bestimmen des Zeitintervalls zwischen zwei Reizen dem Ohr unterlegen. In einer Weise, die in etwa den Vorgängen auf der Retina des Auges entspricht, kann die Haut darüber Auskunft geben, wo sie berührt wurde, wie weit unterscheidbare Reize auseinanderliegen, wie der berührende Gegenstand geformt ist und ob sich etwas auf ihr bewegt, wobei alle diese Fähigkeiten jedoch auch von Täuschungen begleitet sind (33).

#### **4.7 Sensorische Integration nach Jean Ayres**

Die amerikanische Psychologin und Ergotherapeutin Jean Ayres, die auch das Konzept der „Sensorischen Integrationstherapie“ begründete, versteht unter sensorischer Integration einen Vorgang, durch den das Gehirn Auskünfte von den Sinnen erhält, diese erkennt, deutet und eingliedert, um daraufhin mit einer adäquaten Handlung zu reagieren. Es handelt sich also um ein Zusammenführen und Ordnen, Sortieren und Auswählen von vielfältigen Reizen aus dem Körper und der Umwelt.

Die Situation, die diesem Vorgang folgt, drückt sich demzufolge immer in Form einer Bewegung aus, wobei es entscheidend ist, dass die Reaktion der Situation angemessen erfolgt und dazu dient, dass der Mensch sich wohlfühlt und in der Lage ist, den Alltag zu meistern. Es ist die sinnvolle Ordnung und Aufgliederung von Sinnesreizen im Gehirn, die ihre der Außenwelt sichtbare Reaktion in einer Bewegungsantwort findet.

Als sensorisch gut integriert wird ein Kind dann bezeichnet, wenn es über Selbstbewusstsein und Selbststeuerungsfähigkeit verfügt. Das sich seiner selbst bewusste Kind hat alle von ihm mit seinen Sinnen gemachten Erfahrungen gespeichert und verfügt daher über eine innere Gewissheit sich und seine Fähigkeiten betreffend; die emotional angemessene Bewertung seiner selbst und der Umwelt ist dabei gepaart mit der Fähigkeit zur Steuerung seiner Aktivitäten und Reaktionen.

Ein sensorisch gut integriertes Kind ist darüber hinaus lernfähig und lernbereit. Die dauerhafte Speicherung der individuellen Erfahrungen, die sinnvolle Anwendung auf neue Situationen und die Bereitschaft, sich anzustrengen, ermöglichen ihm, Motivation und Intensität zu entwickeln.

Auch Aufmerksamkeit und Konzentration sprechen für eine intakte sensorische Integration. Ein Kind, das sich ausgiebig und sinnvoll mit einem Gegenstand oder einer als bedeutsam erkannten Situation beschäftigt, gilt als aufmerksam und konzentriert, wobei es oftmals ein Erwachsener ist, der Gegenstand und Zeitraum bestimmt.

Entscheidendes Merkmal einer gut entwickelten sensorischen Integration sind nicht zuletzt Handlungsfähigkeit und Kompetenz. Aus der Anwendung der wachsenden Fähigkeiten und komplexeren Verhaltensweisen in der Auseinandersetzung mit dem sozialen Umfeld entstehen Strategien zur Problemlösung; das Kind kann sich selbst in seinem Umfeld erleben und angemessen handeln (6,7,18).

#### **4.8 Integrationsstörungen**

Integration lässt sich beschreiben als das adäquate Funktionieren der Teile im Gesamtsystem. Augenscheinlich werden die Probleme integrationsgestörter Kinder vor allem in den Bereichen von Motorik und Wahrnehmung, in der sprachlichen Entwicklung wie auch in Bezug auf Motivation, Emotion und im Sozialverhalten, zudem finden sich bei ihnen fast immer auch Störungen der Programm- und Handlungssteuerung, des zweckvollen und adaptiven Handelns und Verhaltens, wie auch Störungen von Gedächtnis, hier vor allem im Bereich von Ultrakurzzeit- und Kurzzeitspeicher, und Kognition.

Gestörtes Sozialverhalten und unausgeglichene Persönlichkeitsentwicklung, Sprach- und Kommunikationsstörungen wie auch Konzentrationsstörungen und Lernstörungen in Form von Lese-, Rechtschreib- und/oder Rechenschwäche treten bei diesen Kindern meist als Folgeerscheinungen ihrer zu Grunde liegenden Beeinträchtigung auf.

In den Bereich der Störungen der Wahrnehmungssysteme fallen taktile Abwehrhaltung und damit gestörte taktile Wahrnehmung, gestörte kinästhetische Wahrnehmung, gestörte Gleichgewichtswahrnehmung, Störungen der auditiven und visuellen Wahrnehmung und eine gestörte Figur- Grund- Wahrnehmung auf.

Zu den Störungen im motorischen Bereich zählen Störungen des Muskeltonus, der Grob- und Feinmotorik, Dyspraxie, unfreiwillige Mitbewegungen, Störungen der Kraftdosierung, der Zielsteuerung und des Bewegungsverhaltens, sowie ein nicht altersgemäß entwickeltes Körperschema.

Zur Verbesserung der Integrationsfähigkeit des zentralen Nervensystems ist eine Weiterentwicklung des Kindes als Gesamtpersönlichkeit, die ganzheitliche Erfassung des Kindes und die individuelle Ausrichtung der Förderung am einzelnen Kind unabdingbar.

Um die Entwicklung des Kindes voranzutreiben ist es wichtig, seine momentane Bedürfnislage zu beachten, seinen natürlichen Bewegungsdrang, seine Phantasie und Kreativität auszunutzen, sowie die aus Spielaktivitäten resultierende starke Motivation; auch das spontane Neugierverhalten des Kindes sollte miteinbezogen und gefördert werden.

Ebenso bedeutend ist die Förderung der Entwicklung des zentralen Nervensystems, insbesondere über kontinuierliche sensorische Stimulation des Kindes; hilfreich hierbei ist die bereits erwähnte Plastizität des ZNS. Dem Kind müssen Möglichkeiten zum Bewegen und Hantieren geboten werden, die entsprechenden Situationen und Materialien müssen zur Verfügung stehen. Partner- und Gruppenaktivität gilt es zu unterstützen, wie auch individuelle Aufgaben für jedes einzelne Kind zu erstellen und Freiraum zu gewähren. Die Förderung des Spracherwerbs wird automatisch durch tätiges Erforschen der Umwelt in Gang gesetzt.

Der Diagnose von Integrationsstörungen dienen die klinische Beobachtung sowie die Erfassung von Muskelkraft, Muskeltonus, Halte-, Stell- und Gleichgewichtsreaktionen, Zungen-, Mund- und Handmotorik, Steuerung der äußeren Augenmuskeln, Bilateralintegration, Mitbewegungen, allgemeinem Verhalten, Körperschema, Grob- und Feinmotorik, Praxie bzw. Dyspraxie, Lateralität, Kraftdosierung und Steuerung, unfreiwilligen Mitbewegungen, Störungen des Bewegungsverhaltens, Wahrnehmung von taktiler Abwehr und Gleichgewicht, sowie die Erfassung von kinästhetischer, auditiver und visueller Wahrnehmung und der Figur- Grund- Wahrnehmung. Darüber hinaus muß auch dem emotionalen Bereich große Beachtung geschenkt werden.

Verfügt ein Kind über eine gestörte taktile Wahrnehmung und weicht vor Berührungsreizen zurück, so können seine Erfahrungen mit Dingen aus der Umwelt eingeschränkt sein, die Formwahrnehmung etwa ist häufig nicht intakt. Als Folgeerscheinung kann das Erfassen und Behalten von Mustern, geometrischen Formen und Schriftzeichen erhebliche Schwierigkeiten bereiten.

Ist die kinästhetische Wahrnehmung, auch als Tiefensensibilität oder Propriozeption bezeichnet, beeinträchtigt, so sind die Empfindung und Vorstellung des eigenen Körpers in seiner Raumlage und in seinem Bewegungsausmaß wie auch die Fähigkeit zu zweckgerichteter Planung von Handlungsabläufen gestört.

Kinder mit Problemen bei der Gleichgewichtswahrnehmung sind auch beim Erfassen, Behalten und Wiedergeben von räumlichem und zeitlichem Hintereinander in der Mathematik, beim Lesen oder Schreiben beeinträchtigt.

Ist die auditive Wahrnehmung nicht intakt, so fällt es den Kindern schwer, akustische Muster und Sprachlaute zu identifizieren, zu lokalisieren, zuzuordnen und nachzubilden. Sie zeigen Probleme in der Raumorientierung, in der Mathematik, beim Sprechen, während des Lese- und Schreiblernprozesses wie auch in der Rechtschrift.

Störungen der visuellen Wahrnehmung manifestieren sich vor allem anhand der nicht gelingenden Formkonstanzbeachtung und mangelhaften Raumwahrnehmung. Die betroffenen Kinder haben infolgedessen Schwierigkeiten, die Lage ihres Körpers im Raum zu erkennen und räumliche Beziehungen zwischen diesem und anderen Gegenständen bzw. zwischen Gegenständen untereinander herzustellen. Sie erkennen gleiche Formen und Zeichen bei neuer Anordnung nicht sofort wieder oder verwechseln sie mit ähnlichen. Körperschema- und Orientierungsstörungen, Verdrehungen, Spiegelungen, Auslassungen etc. sind häufig die Folge. Buchstaben, Laute, Ziffern, häufig wiederkehrende Wörter und Sätze werden nur

langsam erlernt, Richtungen, Anordnungen und Reihungen nur ungenau erfaßt und wiedergegeben (6,7,18,52,64,99).

#### **4.9 Das Körperschema**

Alle körperlichen Aktionen vollziehen sich in Bezug auf den umgebenden Raum; die Fähigkeit, die Ausdehnung des Raums und die Beziehungen des Körpers zum Raum zu erfassen, sind Verarbeitungsprozesse, die jedes Kind im Laufe seiner Entwicklung lernen muß. Sowohl für das Körperschema als auch für die visuelle Wahrnehmung müssen Reifungsstadien durchlaufen werden, die auf gemeinsamen grundlegenden Funktionen der Sensomotorik aufbauen.

Bei der Geburt ist das Körpergefühl diffus und unpräzise. Durch vielfältige sensomotorische Erfahrungen, besonders aus dem taktil- kinästhetisch- vestibulären Bereich, erwirbt das Kind die als Körperschema bezeichnete innere Vorstellung des Körpers.

Um sich selbst, seinen Körper, in Beziehung zum umgebenden Raum setzen zu können, muß ein Kind zuerst einmal in der Lage sein, die Ausmaße seines Körpers, die Beziehungen zwischen den einzelnen Teilen und all die Bewegungsmöglichkeiten, die jeder einzelne Körperabschnitt durchführen kann, richtig einzuschätzen. Dafür benötigt es ein geordnetes Körperschema, das sich aus einzelnen, im Gehirn gespeicherten Plänen, Landkarten vergleichbar, zusammensetzt. Dieses Körperschema wird im Gehirn als Folge der Empfindungen von der Haut, den Muskeln und Gelenken, der Erdschwere und den für Bewegungen zuständigen Sinnesorganen, die bei den täglichen Aktivitäten des Kindes im Gehirn geordnet und sortiert wurden, entwickelt. Dabei verläuft die Entwicklung ähnlich dem Prinzip der motorischen Entwicklungsrichtung, nämlich von oben nach unten und von innen nach außen.

Das Körperschema stellt ein kognitives Konzept vom eigenen Körper dar. Es entwickelt sich durch Empfindungen aus Haut, Sehnen, Muskeln und Gelenken, wie auch durch Gleichgewichts- und Bewegungswahrnehmungen und beinhaltet Informationen über jeden Abschnitt des Körpers, über die Beziehungen zwischen den einzelnen Körperteilen und über deren Bewegungsmöglichkeiten.

Das Gehirn speichert Bewegungen und die damit gemachten Erfahrungen. Der wiederholte Gebrauch einer Synapse für eine bestimmte sensorische oder motorische Funktion erzeugt ein Programm für die betreffende Funktion. Das Gefühl für Größe, Gewicht, Ausmaß, Position

der Körperteile zueinander und alle bisher damit gemachten Bewegungen werden als neurales Gedächtnis oder aber nach Jean Ayres als Landkarte des Körpers bezeichnet.

Bereits das fetale Gehirn beginnt, die Welt außerhalb des Mutterleibes in „Landkarten“ zu ordnen. Wie Untersuchungen an blinden Kindern zeigen, ist für die Entwicklung des Körperschemas nicht die Intaktheit aller Sinneskanäle erforderlich. Bei den blinden Kindern bildete sich das Körperschema in gleicher Weise und ohne zeitliche Verzögerung gegenüber der nicht sinnesbehinderten Kontrollgruppe aus, woraus geschlossen werden kann, dass die Funktion Körperschema autonom reift und zumindest nicht von den afferenten Impulsen *eines* Sinnessystems spezifisch abhängig ist.

Das Gefühl für den eigenen Körper und seine Richtungen ist ein stabiler Bezugspunkt für die Orientierung im Raum und Grundlage für die Übertragung des Körperschemas auf den Raum, die Praxis. Das Körperschema ist veränderbar und von der Eigenwahrnehmung und den Erfahrungen abhängig, die in den verschiedenen Phasen der Entwicklung mit dem Umfeld gemacht wurden. Es besteht nicht nur aus der Summe der einzelnen Wahrnehmungen, sondern aus deren Integration.

Auge- Hand- bzw. Auge- Fuß- Koordination wird erst dann möglich, wenn die sinngebende Verbindung zwischen Auge und Hand bzw. Auge und Fuß erreicht ist. Das Körperschema muß vollständig entwickelt sein, so dass eine Beziehung zwischen Körper und Raum und die Wahrnehmung der Raumrichtungen möglich wird.

Die Grundlagen für Auge- Hand- und Auge- Fuß- Koordination werden über die Förderung der drei vorausgehenden Wahrnehmungsbereiche aufgebaut. Über Auge- Hand- bzw. Auge- Fuß- Koordination werden die Raumwahrnehmung, die Reihenfolge von Handlungen in der Durchführung und Planung und die rhythmische Abfolge von Bewegungen geübt. Die Einbeziehung dieser Elemente macht eine sinnvolle Planung und Ausführung motorischer Handlungen erst möglich; das Kind lernt, sich gedanklich auf die Handlung vorzubereiten und entsprechend zu reagieren (6,7,18,40,52,64,82).

Nach der Wiener Psychologin Marianne Frostig bezieht sich der Körperbegriff auf die faktische Kenntnis des Körpers, der sich durch die Informationen, die ein Kind über seinen Körper erhält, die es speichert und die es mit seinem Empfinden und Bewegen des Körpers verbinden kann, entwickelt. Diese Vorstellung findet sich in jeder Selbstbild-Kinderzeichnung, da jedes Kind bis zu einem gewissen Alter malt, was es weiß und nicht, was es sieht. Aus diesem Grund gibt die Darstellung eines Kindes von einem Menschen Aufschluß über seinen Körperbegriff, sein Körperbild und seine Körpervorstellung (18,82).

Ebenso wie sich das Körperschema entwickeln muß, ist es wichtig, dass das Kind lernt, seine Körpermittellinie zu kreuzen, vor allem mit den Händen. Das Zusammenspiel beider Körperhälften muß gut koordiniert sein, die Lateralität sollte sich ausbilden. Im Schulalter gewinnen die motorischen Leistungen zunehmend an Sicherheit der Bewegungskoordination und an Reaktionsgeschwindigkeit. Besonders bei den 5-, 6- und 7jährigen besteht ein ungeheures Bewegungsbedürfnis. Im Vordergrund steht dabei die Freude an der Bewegung, ohne damit eine Leistung erbringen zu wollen. Wenn auch dieser Bewegungsdrang mitunter zu Problemen führt, in erster Linie, wenn das Kind eingeschult wird und nun stillsitzen soll, so steht hinter diesem Verhalten doch ein tiefer biologischer Sinn, denn der Reiz der Bewegung ist für den wachsenden Organismus von großer Bedeutung. Durch die motorischen Aktionen auf Muskeln und Knochen wird ein Wachstumsreiz ausgeübt, Atmung und Kreislauf werden gefördert, sowie der gesamte Stoffwechsel angeregt. Ebenso entscheidend sind die aufgrund der engen Wechselwirkung zwischen körperlichem und seelischem Geschehen von der körperlichen Aktivität ausgehenden starken seelischen Impulse. Daher kommt es speziell auch in der Schule darauf an, die sinnvolle Bewegungsfreude des Kindes in die richtigen Bahnen zu lenken und zu fördern, da es dadurch seinen Körper erfährt und richtig einzuschätzen lernt (6,7,82,99).

Ein gut geordnetes Körperschema versetzt den betreffenden Menschen in die Lage, stets, ohne hinsehen oder sich berühren zu müssen, zu fühlen, was sein Körper in jedem Moment tut. Für Tätigkeiten, die beide Hände gleichzeitig beanspruchen, ist es von entscheidender Bedeutung, über gute und klare Informationen über die Beziehungen zwischen der rechten und der linken Körperhälfte zu verfügen. Eine zu große Notwendigkeit, Dinge ansehen zu müssen, deutet auf ein schlechtes Körperschema hin.

Im Gegensatz zur Neurologie und Neuropsychologie des Erwachsenenalters muß der Entwicklungsdimension Rechnung getragen werden, was bedeutet, dass jede Aussage über Entwicklung und Störung des Körperschemas am normalen Entwicklungsgang dieser Funktion orientiert sein muß.

Die Untersuchungsmethoden im Kindesalter können entsprechend den jeweils geprüften Funktionen unterteilt werden in Untersuchungen zur Topognosie, das heißt, das Kind muß sich am eigenen Körper orientieren können und die verlangten Leistungen auch an einem Gegenüber bzw. vor dem Spiegel vorzunehmen in der Lage sein. Des Weiteren existieren Untersuchungsmethoden unter Zuhilfenahme von Zeichnungen, Untersuchungen der „Körpergrenzen“, zum „Körperinnenraum“ und zur Benennung von Körperteilen.

Bereits Vierjährige sind in der Lage, die wichtigsten Teile des Kopfes, Gesichtes und Rumpfes, sowie die größeren Extremitätenabschnitte nach sprachlicher Aufforderung korrekt zu benennen. Im Alter von 6-7 Jahren folgt dann die Benennung aller übrigen Körperteile, was auch an einer vorgehaltenen Puppe gelingt. Die einfache Rechts- Links- Orientierung am eigenen Körper wird ebenfalls mit etwa 7 Jahren beherrscht (6,7,13,18,64,78).

#### **4.10 Störungen des Körperschemas**

Zeigt ein Schulkind noch kein altersgemäßes Körperschema, so fällt ihm die Orientierung am eigenen Körper und davon ausgehend die Orientierung im Raum und auf der Fläche schwer. Es kann Bewegungsabläufe und schnelle Richtungsänderungen nicht problemlos planen und ausführen. Die altersgemäße Darstellung von Tieren und Menschen gelingt oft nicht.

In Zeichnungen von Kindern mit Störungen des Körperschemas werden Menschen ungenau und wenig differenziert gemalt, es fehlen etwa Hände, Füße oder Finger, oder die Gliedmaßen sitzen an der falschen Stelle. Die schnelle Orientierung im Schulhaus, im Klassenzimmer, in Schränken, Kästen und auch in der Schultasche fehlt größtenteils, die klare Unterscheidung von Richtungen, Abständen, Anordnungen, Zeilen und Schriftzeichen bereitet Probleme und Berührungen am eigenen Körper können nicht lokalisiert werden. Beim Bemalen und Kneten von menschlichen Figuren gestaltet das Kind oft eine Körperseite oder bestimmte Körperteile größer und differenzierter. Bei motorischer Unsicherheit malt das Kind die Füße oft umgebogen oder zu klein, oder aber es betont die erwünschte Standfestigkeit durch besonders große Füße. Es hat Probleme bei der Raumwahrnehmung und der Orientierung im Raum, findet sich auch im bekannten Raum lange nicht zurecht und beim Malen von Männchen zeigt es oft eine nicht altersgemäße Darstellung.

Störungen des Körperschemas treten bei vielen Fällen allgemeiner neurologischer Schädigungen und bei lokalen Funktionsstörungen des Vestibularapparates besonders deutlich hervor. Sie kommen in falschen Bewegungsmustern eines Kindes zum Ausdruck, besonders in Bewegungen, bei denen die Mittellinie des Körpers gekreuzt werden muß und die ein großes Koordinationsvermögen erfordern. Störungen des Körperschemas umfassen ebenso Störungen der Rechts- Links- Orientierung im Raum und an sich selber. Kinder mit Störungen des Körperschemas können auch durch ihre Grobmotorik auffallen. Der Gang ist unkoordiniert, sie bewegen sich staksig, die Armhaltung beim Schreiben ist auffällig. Mitunter wird ein Arm auch dabei vernachlässigt und hängt herab.

Eine mangelhafte Körperorientierung verhindert auch eine optimale Raumorientierung. Die optische Orientierung über Raumlage, vor allem aber über Raumbeziehungen, ist an den aktiven Umgang mit dem Raum gebunden. Gerade hinsichtlich des „handgreiflichen“ haptisch- motorischen Handelns bestehen meist gravierende Erfahrungsdefizite. Die optische Wahrnehmung im zweidimensionalen Raum, z.B. im Umgang mit Papier und Bleistift, bereitet im Allgemeinen keine Probleme, sondern vielmehr die dreidimensionale räumliche Gestalterfassung und das Überblicken komplexer Raumbeziehungen innerhalb einer Umweltsituation.

Besonders nachteilig auf die Handlungsfähigkeit wirkt sich der Mangel an Bewegungsgedächtnis und Bewegungsvorstellung aus, was sich darin äußert, dass es den betroffenen Kindern schwerfällt, sich das Koordinationsmuster einer neu erlernten Bewegungsfolge einzuprägen, so als ob sie die raum- zeitliche und strukturelle Gliederung einer motorischen Handlung nicht begreifen könnten. Deshalb ist es ihnen nur sehr begrenzt möglich, sich einen Bewegungsablauf vorzustellen, ihn im Geiste vorauszudenken (6,7,18,52,64,78,82).

#### **4.11 Entwicklung und Reifung der Wahrnehmung**

##### **Ebenen der Wahrnehmungsentwicklung**

Der Begriff der Wahrnehmung umfasst sowohl Aufnahme als auch zentrale Verarbeitung, das heißt Identifizieren, Erkennen, Zuordnen, Interpretieren und Behalten von Sinnesreizen aus dem eigenen Körper oder der Umwelt.

Der Verlauf der kindlichen Wahrnehmungsentwicklung verläuft spiralförmig, von den Erlebnissen in und mit dem eigenen Körper ausgehend, über Raum- und Zeiterlebnisse nach außen hin zum Partner und der Gruppe. Auf der untersten Ebene lernt das Kind sich selber, seinen Körper und seine Empfindungen kennen, nimmt sich selbst wahr und empfindet bewusst Wärme, Kälte, Nähe, Ferne, Druck, Weichheit, Schmerz oder ähnliches. Über die Sinne werden die Reize aufgenommen, eingeordnet, verarbeitet, gespeichert und in Form der Ausdrucksmotorik nach außen sichtbar umgesetzt. Das Kind lernt, mit seinem Körper umzugehen und die Kontrolle über sich auszuüben. Erst wenn genügend dieser Erfahrungen gemacht und in ein sinnvolles Bild eingeordnet worden sind, ist es dem Kind möglich, sich ungehindert nach außen zu wenden. Der Raum wird in seiner Begrenzung, seiner Enge und

Weite, Höhe und Tiefe, Nähe und Ferne durch Geräusche und Klang, durch Ausgehen, Auslaufen, Kriechen, Rollen und Fahren wahrgenommen. Die Lagebeziehungen des eigenen Körpers im Raum, die Körperteile und das Körperschema können begriffen, Entfernungen eingeschätzt, Richtungen erkannt und ein Weg eingeteilt bzw. unterteilt werden (6,7,18,52,78,99).

Die Entwicklung der Wahrnehmung beinhaltet dabei folgende Stufen:

- Wahrnehmung der eigenen Körperfunktionen und Materialwahrnehmung
- Körperschema
- Akustische Wahrnehmung
- Zeitwahrnehmung
- Raumwahrnehmung und Wahrnehmung von Symbolen und Zeichen
- Farbwahrnehmung
- Wahrnehmung der koordinierten Bewegung
- Sozialwahrnehmung
- Wahrnehmung der veränderten Situation (99)

### **Neuronale Reifungsprozesse**

Beeinflusst werden die Wahrnehmungsleistungen des Kleinkindes vor allem durch die schnell fortschreitenden Reifungsprozesse der beteiligten Nervenbahnen und des Gehirns, die im Vorschulalter bereits einen relativ hohen Stand erreicht haben; daher gewinnen für die weitere Entwicklung der Wahrnehmungsfunktionen Erfahrung, Übung und Lernen eine überragende Bedeutung.

Zugleich werden die sogenannten Fernsinne, Hören und Sehen, für die Umweltwahrnehmung immer wichtiger. Ihre Entwicklung erreicht während des Vorschulalters bereits einen beachtlichen Stand. Untersuchungen in den USA ergaben, dass Vorschulkinder bei der Größenbeurteilung von geometrischen Figuren nur wenig hinter den Leistungen von Studenten zurückblieben und bei Versuchen zur Prüfung der Unterscheidungsfähigkeit für verschieden große Kugeln war ihre Leistung sogar genauso gut wie die von Erwachsenen.

Bei Kindern im Alter von 2-5 Jahren sind bereits wichtige Merkmale der Form- und Figurenunterscheidung festzustellen. Demnach treten folgende Unterscheidungsmerkmale in nachstehender Reihenfolge auf:

- groß - klein
- dick - dünn
- rund - spitz
- symmetrisch - unsymmetrisch
- Kontur - Flächengestalt (99)

Die Leistungen bei der Formunterscheidung spielen für das Lesenlernen eine wichtige Rolle. Dem Vorschulkind gelingt es im Allgemeinen bereits recht gut, zwischen groß und klein, dick und dünn etc. zu unterscheiden, Schwierigkeiten bereitet dagegen die Unterscheidung von oben- unten und rechts- links, weshalb zum Beispiel die Buchstaben b, d, p und q von Vorschulkindern leicht miteinander verwechselt werden. Bis zum Schuleintritt entwickelt sich jedoch normalerweise diese Fähigkeit, wobei Rechts- Links- Verwechslungen sich als am hartnäckigsten erwiesen haben (82,83,99).

### **Wahrnehmungssysteme**

Da die funktionellen Systeme, die durch die Verarbeitungsprozesse entstehen, in ihrer Qualität das Lernen fundamental beeinflussen, muß in der kindlichen Entwicklung großer Wert auf die Qualität ihrer Ausbildung gelegt werden. Das taktile, vestibuläre, propriozeptive, olfaktorische, auditive und visuelle Wahrnehmungssystem entwickeln sich nicht unabhängig voneinander, jedoch gibt es erhebliche Unterschiede in ihrem Entwicklungsverlauf.

Am frühesten bilden sich das taktil- propriozeptive und das vestibuläre System aus. Durch das passive Schaukeln des Fötus im Fruchtwasser und durch die sehr bald einsetzenden Eigenbewegungen werden die Wahrnehmungssysteme schon im Mutterleib einer kontinuierlichen und intensiven Stimulation ausgesetzt und damit in ihrer Entwicklung gefördert.

Der Nervus vestibularis und der Tractus vestibulo- spinalis, der Reflexe des Lage- und Gleichgewichtssinnes vermittelt, myelinisiert dabei bereits beim viermonatigen Fötus und kann daher schon zu diesem frühen Zeitpunkt sehr schnell Informationen übertragen. Im Alter

von 6 Monaten verfügt der Fötus sogar über gleich große Rezeptoren des Vestibularapparates wie der Erwachsene.

Vergleicht man den fötalen Entwicklungsstand dieser Systeme mit demjenigen der sogenannten „Fernsinne“ Hören und Sehen, so sind letztere im Mutterleib noch sehr gering entwickelt. Erst in den letzten drei Schwangerschaftsmonaten nimmt der Fötus akustische Reize wahr und reagiert auf sie. Sehen, Riechen und Schmecken werden sogar erst in den Wochen nach der Geburt für den Säugling bedeutsame Quellen der Informationsaufnahme, was auch die Folgerung beinhaltet, dass ein Kind mit Lernstörungen zuerst in diesen grundlegenden Basisbereichen überprüft und gefördert werden sollte, bevor es überwiegend visuell und auditiv ausgerichtete Aufgaben erfolgreich lösen kann (6,7,18,82,88).

### **Auge- Hand- Koordination, Figur- Grund- Differenzierung und Formkonstanz**

Das Erkennen der Lage eines Objektes im Raum, Drehungen in der Horizontalen und Vertikalen konkret und an schematischen Zeichnungen wahrzunehmen, setzt die Fähigkeit der Auge- Hand- Koordination, der Figur- Grund- Differenzierung und der Formkonstanz voraus. Dabei greifen die Reifungsprozesse der einzelnen Funktionen der visuellen Verarbeitung ineinander. Liegen in einem Bereich Beeinträchtigungen vor, so wird sich dies auch auf den nächst komplexeren auswirken (18,99).

### **Raumorientierung**

Um Richtungen zu erkennen und sich im Raum zu orientieren, muß die Orientierung am eigenen Körper entwickelt sein. Das Kind erwirbt diese Fähigkeit mit Hilfe sensorischer und motorischer Erfahrungen. Die Empfindung für senkrecht- waagrecht, rechts- links, vorne- hinten, die Koordinaten unseres Bezugssystems, werden durch Bewegung erworben. Sie ermöglichen es, sich im Raum zurechtzufinden und auch die Lage von Objekten im Raum zu erkennen.

Das Erfassen von Beziehungen im zweidimensionalen Raum und das Rekonstruieren des Erfassten setzt vielfältige Erfahrungen voraus, die durch den Umgang mit Objekten erworben wurden. Wieder sind es zunächst die Handlungen, die Auge- Hand- Koordination, die taktil- kinästhetische Wahrnehmung, welche dem Kind die Erfahrung vermitteln, in welcher Richtung ein Objekt liegt, in welchem Abstand zu ihm selbst und in welchem Abstand zu einem anderen Objekt (7,18,64).

Die auf den Raum bezogene Wahrnehmung basiert auf visuellen und taktilen Sinnesempfindungen. Hinsichtlich der Raumtiefe bzw. der Entfernung im Raum lassen sich erstmals beim zweijährigen Kind meßbare Unterschiede feststellen. Läuft das Kind um einen ovalen Tisch, so kann es bereits Entfernungen von 1,40m gegenüber 1,80m differenzieren.

Ebenfalls auf den Raum bezogen ist die Wahrnehmung der Lage, die weitgehend auf der visuellen Empfindung basiert. Bis zum sechsten Lebensjahr kann das Kind, vorausgesetzt dass es das Lesen beherrscht, von dem um 90 Grad gedrehten Buch, also von einer senkrecht stehenden Zeile, die Buchstaben ablesen. Andererseits werden noch gerne die Buchstaben b, d, p, q verwechselt, die sich ja spiegelbildlich zueinander verhalten. Ähnliche Erscheinungen sind beispielsweise bei der Schreib- Leseschwäche älterer Kinder zu beobachten.

Entfernungen, die mit einer Verkleinerung korrespondieren, richtig abzuschätzen, lernt das Kind allmählich mit Hilfe der Eigenbewegung im Raum. Auf der angeborenen Fähigkeit zum Transponieren der Größe beruht auch die Fähigkeit zum Bilderfassen, die sich zu Beginn des 2. Lebensjahres feststellen läßt. Bekannte Personen werden auf Fotografien erkannt, unsicher ist das Kind auf dieser Entwicklungsstufe lediglich hinsichtlich der Realität des Abgebildeten (64,82,83,90).

## **Umweltfaktoren**

Im Bereich der Wahrnehmung ist ein schwer zu differenzierendes Verhältnis der Teilfaktoren gegeben. Zunächst einmal handelt es sich dabei um die teilweise bereits im vorgeburtlichen Stadium vorhandenen, an die körperlichen Sinnesorgane gebundenen Empfindungen, die in den ersten Lebensmonaten reifen, jedoch bereits durch soziale Beziehungen frühester Art, vor allem zur Bezugsperson, geprägt werden.

Die Wahrnehmung, also der eigentlich psychologische Vorgang, entwickelt sich in der Kindheit und Jugend, wozu eine sowohl sachliche als auch menschliche Umwelt unabdingbar ist; die exogenen, hierbei v.a. sozialen Faktoren bedingen also, teilweise unbewußt, die Wahrnehmungsart. So findet sich bei der Wahrnehmung, frühzeitiger als bei Motorik und Wachstum, die eigentliche Entwicklung, also das Einwirken exogener, sozialer Faktoren.

Entscheidend sind zwei Aspekte. Erstens treten die körperlichen Sinne wie Geschmack oder Tastsinn zuerst auf, körperferne Sinne wie Hören und Sehen dagegen erst später, und zweitens ist für das Auftreten von Sinnesempfindungen deren biologische Bedeutung für den Erhalt des Lebens maßgeblich. Hier wäre etwa der Geschmackssinn zu nennen, der imstande ist, zwischen Eßbarem und Ungenießbarem zu differenzieren.

Wichtiger als der Grad der Entwicklung der anatomischen Voraussetzungen für das Wirken der Sinnesorgane ist die biologische Gesamtsituation. So kann ein Kind, dessen Gehör noch kaum gereift ist, die Stimme der Mutter unter vielen anderen erkennen. Ansonsten spielt in diesem Alter bei den Empfindungen die Stärke, die Intensität des Reizes eine größere Rolle als dessen Qualität, die Art der Empfindung (2,7,82,83).

### **Haptische Erfahrung**

Je jünger ein Kind ist, desto schwerer fällt es ihm, nur durch die Erfahrungen eines einzigen Sinnesbereichs einen vollständigen Eindruck von den Eigenschaften eines Gegenstandes zu gewinnen. Das Kind ist daher stets bemüht, verschiedene sinnliche Erfahrungen mit einem Gegenstand zu erwerben. Es will ihn nicht nur sehen, sondern auch fühlen, in den Mund nehmen, hören und so weiter. Eine besondere Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang dem manuellen Umgang mit dem Gegenstand, dem Betasten und Begreifen, zu. Dies bildet für das kleine Kind zunächst die wichtigste Erkenntnisquelle zum Erfassen der Eigenschaften eines Dinges. Mit zunehmendem Alter gewinnt dann der visuelle Eindruck immer mehr an Bedeutung, jedoch lässt sich auch beim Erwachsenen beobachten, dass er gegenüber unbekanntem Gegenständen das Bedürfnis verspürt, sie in die Hand zu nehmen oder zumindest zu berühren. Dem Vorschulkind und auch dem Schulanfänger sollten daher noch möglichst viele Gelegenheiten zu taktilmotorischer Erfahrungsbildung eröffnet werden, ein Gesichtspunkt, dem z.B. in Montessori-Schulen Rechnung getragen wird (7,18,64,99).

### **Kognition**

In der Koordination aller sensorischer Wahrnehmungen erfährt das Kind, dass es sich trotz mannigfaltiger Eindrücke stets um ein und denselben Gegenstand handelt. Die Wahrnehmung als kognitive, erkennende Funktion entsteht aus einer Kombination von Empfindung und

Lernen an der Erfahrung und wird daher zweckmäßigerweise nicht anhand von Sinnesorganen oder chronologisch, sondern an Strukturen der Umwelt, nämlich denen des Raumes und der Zeit, dargestellt. Zwei Elemente des Denkens, Vorstellung und Gedächtnis, die das Kind zum Erkennen seines Lebensraumes benötigt, sind an der Entwicklung der Wahrnehmung beteiligt (82,83).

### **Wahrnehmungskonstanz**

Ein wichtiger Bestandteil der Entwicklung des Entfernungssehens ist die Größenkonstanz, die wesentlich für eine realitätsgerechte Umwelterfahrung ist. Das kleine Kind sieht Personen und Gegenstände, entsprechend der auf der Netzhaut entstehenden Sehempfindung, in der Nähe groß und in der Entfernung klein und schließt daraus, die nahen Dinge seien tatsächlich groß und die weiter entfernten kleiner, wenn es zu den Dingen hinlaufen und sie betasten kann, entdeckt es aber deren reale Größe. Es korrigiert nun sein Netzhautbild, seine primäre Sehempfindung insofern, als es die Vorstellung von einem Ding, die es in der Nähe gewonnen hat, in die Wahrnehmung einbaut, d.h. jeden Gegenstand und jede Person etwa bis in eine Entfernung von 500m genauso groß wahrnimmt wie solche in seiner unmittelbaren Nähe. Dieser Vorgang wird auch als Größentransformation bezeichnet, weil die durch die Sehorgane empfundene Größe von Gegenständen auf die ursprüngliche Größe, wie sie in der Nähe gesehen wurde, transformiert wird. Erwachsene können einerseits physikalisch richtig, d.h. verkleinert in der Entfernung sehen, andererseits haben sie die reale Größe des Gegenstandes in ihre Wahrnehmung bereits eingebaut.

Ähnlich verhält es sich mit der Ding-, Form-, Farb- und Helligkeitskonstanz. Auch hier führen Schwankungen in den Reizeinwirkungen auf die Netzhaut nicht unbedingt zu einer Veränderung der bewussten Wahrnehmung; das Erleben der Umwelt erhält dadurch eine gewisse und notwendige Beständigkeit.

Die Größenkonstanz lässt sich bereits gegen Ende des ersten Lebensjahres nachweisen; die diesbezüglichen Leistungen verbessern sich während der Vorschulzeit beträchtlich, steigen aber auch während der Schulzeit noch weiter an. Anfänge einer Form-, Farb- und Helligkeitskonstanz lassen sich um das dritte Lebensjahr feststellen; auch in diesem Bereich erfolgt ein Anstieg der Leistungen bis in das Schulalter hinein und sogar noch darüber hinaus. Die Entwicklung der Wahrnehmungskonstanz steht in engem Zusammenhang mit der Generalisierungsfähigkeit, einem kognitiven Entwicklungsschritt. Sie ermöglicht es dem

Kind, zunächst Gegenstände und dann auch geometrische Formen unabhängig von Größe, Farbe und Lage in unterschiedlichen Zusammenhängen zu erfassen.

Die Konstanz der Objekte bei wechselnder Entfernung scheint auf angeborener Basis von dem Augenblick an vorhanden zu sein, in dem Personen und Gegenstände als Gestalten erfaßt werden. Am Ende des ersten Lebensjahres erkennt das Kind wohlbekannte Menschen, auch wenn sie sich in beträchtlicher Entfernung befinden, und zwar auch in verschiedenen Positionen. Das Erkennen beruht dabei in erster Linie auf der Bekanntheitsqualität der Konturen, unabhängig von der Größe des Bildes auf der Netzhaut (18,64,82,83,90,99).

### **Lagewahrnehmung und Abstraktionsfähigkeit**

Schwierigkeiten in der Lagewahrnehmung teilt das Kind des Öfteren auch mit dem Erwachsenen. Komplizierte Lageverhältnisse wie etwa die vier Himmelsrichtungen, werden vom Kind unter 12 Jahren nicht erkannt und oftmals auch von Erwachsenen verwechselt. Mittlerweile hat sich herausgestellt, dass der unter Kinderpsychologen lange Zeit verbreiteten Theorie von der totalen Raum- Lage- Indifferenz des Kleinkindes keine Gültigkeit zukommt. Sofern es sich um Gestalten handelt, mit denen das Kind Erfahrungen hinsichtlich ihrer üblichen Raumlage hat, so wird die falsche Raumlage einer Figur auch von jüngeren Kindern sofort erkannt. Bei einigen Vierjährigen ist die Fähigkeit zur Isolierung von Merkmalen und zum Beobachten von Details an bekannten Objekten schon vorhanden und entwickelt sich zunehmend.

Während Lageanomalien bekannter Objekte vom Kleinkind erkannt werden, wenn sie es auch nicht stören, gelingt das teilinhaltliche Erfassen von abstrakten Figuren nur punktuell. Markante Strukturelemente können zwar isoliert, aber zur Gestalt keine Beziehung hergestellt werden; es läßt sich die Tendenz erkennen, abstrakte Figuren zu konkretisieren und darüberhinaus zeichnet sich eine totale Indifferenz gegenüber der Raumlage von abstrakten Figuren ab. Die Fähigkeit, abstrakte Figuren mit dem räumlichen Koordinatensystem in Beziehung zu setzen, d.h. ihre Gerichtetheit nach rechts, links, oben oder unten zu beachten, ist beim Vierjährigen in der Regel noch sehr mangelhaft entwickelt. Rasche Fortschritte werden zwischen 5 und 7 Jahren erzielt (82,83).

Ebenfalls als nicht richtig herausgestellt hat sich die in der Ganzheitspsychologie lange verbreitete Annahme, die Wahrnehmung im Kleinkind- und Vorschulalter erfolge vorwiegend undifferenziert, ohne die Beachtung von Einzelheiten. Erst mit Beginn des Schulalters trete

dann schubhaft beschleunigt, bedingt durch innere Reifungsprozesse gemäß einem Stufenmodell der Entwicklung, die Fähigkeit zu einer analysierenden, auf Einzelheiten gerichteten Wahrnehmung auf. Demnach käme es in erster Linie darauf an, den Reifungsschub abzuwarten und den Zeitpunkt diagnostisch zu erfassen, der dann den richtigen Termin für die Einschulung darstellen würde.

Vielmehr zeigte sich aber, dass eine analysierende, auf das Herausheben von Einzelheiten gerichtete Wahrnehmung unter bestimmten Bedingungen und mit der richtigen Motivation schon bei Vierjährigen in erstaunlichem Ausmaß beobachtet werden kann und dann mit zunehmendem Alter immer deutlicher hervortritt.

In einer Versuchsserie sollten Kinder zwei Bilder, die sich nur durch Einzelheiten unterschieden, miteinander vergleichen. Schon Vierjährige konnten durchschnittlich mehr als 75% aller Unterschiede erkennen, für Sechs- bis Siebenjährige erwiesen sich die Aufgaben als zu einfach (99).

### **Kombinierte Leistungen**

Im Schulalter ist als wesentliche neue motorische Leistung das Schreiben zu vermerken. Da es sich hierbei um eine kombinierte Leistung von Motorik und Wahrnehmung handelt, tritt auch als häufige Begleiterscheinung einer Schreibstörung eine Leseschwäche auf. Auch für das Erlernen des Lesens spielt die Fähigkeit zum richtungsgerechten Erfassen abstrakter Gestalten eine große Rolle. Verzögerungen in der Entwicklung der richtungsgerechten Wahrnehmung findet man häufiger bei Links- als bei Rechtshändern.

Dem Schulkind bereitet das teilinhaltliche Erfassen von Details sowohl bei bekannten als auch bei weniger bekannten Objekten keine Schwierigkeiten mehr. Zwischen dem 5. und 7. Lebensjahr entwickeln sich teilinhaltliches Erfassen und die Fähigkeit zum graphischen Reproduzieren einfacher abstrakter Figuren, was zum Zeitpunkt des Schulbeginns noch deutliche Schwierigkeiten bereiten kann.

Ebenfalls in diesem Alter entwickelt sich die Fähigkeit, das räumliche Gerichtetsein abstrakter Gestalten zu beachten, welche die Voraussetzung des Lesens und Rechtschreibens darstellt (78,82,83).

### **Dimensionen der Wirklichkeit**

Schon durch das Greifen und Betasten von Gegenständen macht das Kind die ersten Erfahrungen mit der Dreidimensionalität seiner Umwelt, aber erst nachdem es laufen gelernt hat, lernt es, mit den Dimensionen der Tiefe, der Breite und der Höhe umzugehen. Obwohl es sich mit zunehmender Sicherheit innerhalb dieser Dimensionen bewegt, hat es noch keine Vorstellung vom Raum und von den Beziehungen der drei Dimensionen zueinander. Das Kind im Vorschulalter besitzt vielmehr das, was Piaget und Inhelder als topologischen Raum bezeichnen. Die Raumkategorien, in denen das Kind denkt, sind die der Nachbarschaft, der Geschlossenheit und der Eingeschlossenheit. Erworben werden diese im 2. Lebensjahr durch das funktionale Spiel, welches beispielsweise im Aneinanderhalten von Dingen oder im Ein- bzw. Ausräumen von Schubladen besteht.

Piaget unternahm interessante Versuche über den Weg des Kindes zur Bewältigung des euklidischen Raumes. Dabei zeigte sich, dass Kinder unter 7 Jahren ohne Schwierigkeiten Gegenstände in verschiedensten Positionen identifizieren können, allerdings nicht in der Lage sind, sich vorzustellen, wie man einen Gegenstand aus einer anderen Position als der, die man eben einnimmt, sehen könnte. Nach Piagets Meinung steht das egozentrische prälogische Denken dem Aufbau des euklidischen Raumes im Wege. Das Kind ist außerstande, sich vorzustellen, dass Objekte auch einen anderen Aspekt haben könnten als den, der ihm als dem Betrachter zugekehrt ist. Es bezieht alle Wahrnehmungsgegenstände auf sich selbst.

Auch das Verständnis für Zeit, Geschwindigkeit, Alter und Menge unterliegt der prälogischen Struktur des Denkens, die es dem Kind vorerst unmöglich macht, mehr als eine Dimension der Wirklichkeit zu beachten; seine Dimensionsbeobachtungsbereitschaft beschränkt sich allein auf die sichtbare Veränderung.

Die Wahrnehmung der Zeit setzt Vorstellungsvermögen und eine gewisse Abstraktionsfähigkeit voraus. Zunächst lebt das Kind noch in einer dauernden Gegenwart. An Zeitperspektiven wie „Zukunft“ und „Vergangenheit“ oder „langsamer“ und „schneller“ kann es sich nur mittels räumlicher Maße herantasten. Ein Gefühl für geschichtliche Zeiträume, sei es Vergangenheit oder Zukunft, entwickelt das Kind frühestens ab dem 12. Lebensjahr (63,70,72,73,82,83).

Akustische Gestalten wie Wörter oder Melodien werden bis ins Schulalter ganzheitlich erfaßt und nur von wenigen sehr begabten Kindern spontan in ihre Elemente zerlegt. Auch optische Gestalten werden vorerst global erfaßt. Bei abstrakten Figuren, die von Kindern immer konkretisiert werden, können schon ab 4 bis 5 Jahren einzelne Strukturelemente herausgehoben werden. Ihre Wiedergabe erfolgt zunächst isoliert, ohne Zusammenhang mit

der Figur. Erst 7jährige sind in der Lage, geometrische Figuren in einer Weise wiederzugeben, die erkennen läßt, dass sie den Gestaltzusammenhang der einzelnen Elemente erfaßt haben.

Die ersten räumlichen Bilder des Kindes sind topologisch, bevor sie projektiv werden, oder mit der euklidischen Metrik übereinstimmen. Das Kind weiß noch nichts von der Perspektive und den metrischen Zusammenhängen, aber es berücksichtigt die topologischen Beziehungen wie Nachbarschaften, Trennungen, Eingrenzungen, Abschlüsse usw. Aus diesen topologischen Bildern gehen ab dem Alter von 7-8 Jahren projektive Bilder hervor und gleichzeitig entwickelt sich eine euklidische Metrik, die beiden Grundmerkmale des „visuellen Realismus“ wie Piaget es nennt, werden sichtbar. Ab dem Alter von 9-10 Jahren wird die Hälfte der Kinder fähig, den Wasserstand in einer bauchigen Flasche, die in verschiedenen Winkeln schräg gestellt wird, zu zeigen.

Es läßt sich erkennen, dass die Entwicklung der Zeichnung der ganzen Strukturierung des Raumes gemäß den verschiedenen Stadien dieser Entwicklung entspricht, weshalb auch die Kinderzeichnung als Test für die intellektuelle Entwicklung verwendet wird (1,72,73,82,83).

#### **4.12 Der Einfluß sozialer Aspekte auf die Entwicklung der Wahrnehmung**

Auch soziale Faktoren sind an der Entwicklung der Wahrnehmung mitbeteiligt. Deutlich wird die soziale Bedingtheit der Wahrnehmung besonders bei zwei speziellen Wahrnehmungsformen. Zum einen handelt es sich dabei um die pars pro toto- Wahrnehmung der Säuglinge und Kleinstkinder. So kann ein Säugling es beispielsweise immer als Zeichen für das baldige Stillen deuten, wenn die Mutter ein bestimmtes Tuch umlegt, welches sie gewöhnlich beim Stillen benutzt. Zum anderen weist auch die Erscheinung, dass ein sozialpsychologisch oder biologisch wichtiger Reiz bei ansonsten totaler Abblendung gegenüber Reizen wahrgenommen wird, auf eine soziale Bedingtheit der Wahrnehmung hin. Eine Mutter beispielsweise hört das Schreien ihres Säuglings auch im Schlaf. Soziale Vorgeschichte und Begleitumstände üben somit eine Auswahl- oder Verstärkerfunktion auf die Wahrnehmung aus.

Auch bei der Entstehung der ersten Sozialbeziehungen spielt die Wahrnehmung eine große Rolle. Der Begriff der „Achtmonatsangst“ beschreibt den Zustand schwerer Ängste seitens des Kindes, wenn die Mutter es verläßt. Erst ab diesem Alter ist die Angst total an eine Person gebunden, und es zeigen sich schwere körperliche und seelische Störungen, wenn diese länger

fortbleibt. Dem aber geht notwendigerweise ein Erkennen voraus. Das Kind ist nunmehr fähig, die Mutter von anderen Menschen zu unterscheiden, etwa anhand ihrer Gesichtszüge, ihrer Stimme und ihrer Kleidung. Schon bedeutend früher, in den ersten Lebensmonaten, vermochte das Kind ihre Stimme unter anderen Stimmen zu erkennen, nun aber beginnt es, sie genau zu identifizieren, und damit tritt auch ein ängstliches Verhalten fremden Menschen gegenüber an den Tag, das sogenannte „Fremdeln“.

Die Wahrnehmung also wird auch sozial mitbedingt, wobei die Sozialbezüge mit durch die Wahrnehmung der Objekte und Mitmenschen geprägt werden. So tritt ab dem ersten Lebensjahr die soziale Erfahrung mit in die Auswahl der Wahrnehmungsgegenstände ein.

Die Theorie der sozial mitbedingten Wahrnehmung weist vor allem darauf hin, dass der Mensch nicht jeden Reiz gleich wahrnimmt, sondern selektiert. So werden vertraute Gegenstände und Reize besonders häufig wahrgenommen, Reize dagegen, die Umstände betreffen, welche der Persönlichkeit gefährlich werden könnten, nur ungern. Besondere Beachtung finden Gegenstände, die der psychischen wie auch der physischen Existenz der Person möglicherweise Schaden zufügen könnten.

Die Art, wie ein Mensch auf die Wahrnehmung bestimmter Reize reagiert, hängt wohl in erster Linie mit seiner sozialen Erfahrung zusammen. Da Reize ja wahrgenommen werden müssen, um ihre Bedeutung für die Persönlichkeit zu erkennen, ist es wahrscheinlich, dass eine unterschwellige Wahrnehmung bzw. eine Wahrnehmung im Randbewußtsein stattfindet. Dabei ist für jede Wahrnehmung eine eigene Organisation anzunehmen. Jede Wahrnehmung bringt höhere Erfahrungen mit, wird also sozusagen durch die Erwartung mitgeformt. Bei der visuellen Wahrnehmung bezieht sich diese Organisation auf Farbe, Größe und andere räumliche Gegebenheiten, bei der akustischen Wahrnehmung auf Ton, Klangfarbe und Lautstärke. Je nachdem, ob ein bestimmter Mensch, ein bestimmtes Tier oder ein bestimmter Gegenstand zu sehen erwartet wird, wird die Wahrnehmung verschieden sein. Mitunter werden bestimmte Gegebenheiten in der Wahrnehmung besonders hervorgehoben, teils bleibt ein gewisses Wahrnehmungsdetail aus früheren Wahrnehmungen bestehen. Die objektive Wahrnehmung eines Gegenstandes ist, aus diesem Blickwinkel betrachtet, also kaum möglich; stets spielen frühere, vor allem soziale Erfahrungen eine wesentliche Rolle (2,64,82,83,86).

#### **4.13 Die Wahrnehmungsentwicklung des Kindes nach Marianne Frostig**

Definition und Verständnis der visuellen Wahrnehmung wird von der Wiener Psychologin Marianne Frostig, die 1961 einen Entwicklungstest der visuellen Wahrnehmung (FEW) hervorbrachte, als sensomotorischer Regelkreis im Sinne Piagets verstanden, in der jede neue Qualität sich auf die Funktion einer vorhergehenden stützt und sich dadurch wiederum vervollkommnet. Insoweit sind diese Faktoren der visuellen Wahrnehmung hierarchisch voneinander und von ihrem Reifegrad abhängig, obwohl man nicht von Stufen sprechen kann, die zu der falschen Einschätzung verleiten, jede Stufe entwickle sich nacheinander und ließe sich nacheinander fördern.

Die Bausteine der visuellen Wahrnehmung nach Marianne Frostig sind:

- Visuomotorische Koordination
- Figur-Grund-Wahrnehmung
- Wahrnehmungskonstanz
- Wahrnehmung der Raumlage
- Wahrnehmung räumlicher Beziehungen

Unter visuomotorischer Koordination wird hierbei die Fähigkeit verstanden, das Sehen mit den Bewegungen des Körpers zu koordinieren. Figur- Grundwahrnehmung bezeichnet die Wahrnehmung einer in sich geschlossenen Gestalt vor einem Hintergrund. Wahrnehmungskonstanz bedeutet, einen Gegenstand auch bei veränderter Größe, Form, Farbe oder Helligkeit zu erkennen. Unter Wahrnehmung der Raumlage ist die Wahrnehmung der Lage eines Gegenstandes in Bezug zum Wahrnehmenden gemeint und die Wahrnehmung räumlicher Beziehungen bringt die Fähigkeit zum Ausdruck, die Lage von zwei Gegenständen in Bezug zum Wahrnehmenden und in Bezug zueinander zu erkennen.

### **Visuomotorik**

Visuomotorik wird von Marianne Frostig als die Basis der sich daraus entwickelnden gesamten visuellen Perzeption verstanden. Analog zu Piaget beginnt dies mit dem Blickkontakt und dem Fixieren von unbewegten und bewegten Objekten, sowie der darauf folgenden Ausrichtung des Körpers nach dem Fixierten.

Durch weitere Ausdifferenzierung entwickelt sich die Visuomotorik zu der Fähigkeit, Auge und Körper, Auge und Hand, Auge und Fuß miteinander in Wechselwirkung zu koordinieren. Bewegung als visuomotorische Grundfähigkeit bildet die Basis für die Erkennung von Form, Raum und Zeit.

### **Figur- Grund- Wahrnehmung**

Figur- Grund- Wahrnehmung als weiterer Faktor der visuellen Wahrnehmung wird von Marianne Frostig definiert als die Fähigkeit, eine bestimmte Form auf zunehmend komplexem Hintergrund wahrzunehmen und wiederzuerkennen. Dies beginnt, wieder analog zu Piaget, mit der Wahrnehmung der Abgrenzung von Hell und Dunkel und dem Wiedererkennen des Gesichtes der Mutter als Vordergrund. In der Behandlung stellen bestimmte dreidimensionale Bewegungsangebote die Grundlage zur zweidimensionalen Wahrnehmung dar und werden hier verknüpft; alle Suchtätigkeiten bilden und fördern diese Wahrnehmungstätigkeit.

Der Figur- Grund- Wahrnehmung kommt für das Erkennen von Gegenständen und Symbolen eine wesentliche Bedeutung zu; aus einer Fülle von einzelnen Reizen, die in einem Wahrnehmungsfeld gegeben sind, werden nur einige ausgewählt und mit Aufmerksamkeit bedacht. Sie werden damit zur scharf erfassten Figur, während alle übrigen Reize einen ungenau wahrgenommenen Hintergrund bilden.

Bestehen Störungen im Bereich der Figur- Grund- Wahrnehmung, so reagiert das Kind auf akustische, visuelle und taktile Reize und auf Bewegungsreize mit verschrecktem Schauen, Körperverspannung oder mit unruhigem Umherschauen, Hinlaufen oder angestrengtem Hinhören. Es wirkt unselbständig und bittet sehr häufig um Hilfe. Das An- und Ausziehen dauert unverhältnismäßig lange, da auch das Öffnen und Schließen von Reißverschlüssen und Knöpfen, sowie das Schleifebinden große Schwierigkeiten bereiten. Das Zählen mit den Fingern gelingt nicht, da die Finger nicht einzeln bewegt werden können. Das Kind kann außerdem seine Bewegungen nur schlecht an Gegenstände anpassen, es geht ungeschickt mit Werkzeugen um und es fällt ihm schwer, ungewohnte Bewegungen nachzuahmen.

Ein Kind mit schlechter Figur- Grund- Wahrnehmung hat Schwierigkeiten, einzelne wichtige Reize aus einem Zusammenhang zu isolieren und sich dabei gegen alle anderen Reizeinwirkungen abzuschirmen. Daher erscheint es unaufmerksam und unstetig. Hält dieser Mangel bis ins Schulalter an, kann beim Lesenlernen der übrige Text das klare Erfassen jener Buchstabengruppen erschweren, auf die es gerade ankommt. Hierin liegt eine Ursache für

Leseschwierigkeiten aufgrund unzureichender Wahrnehmungsleistungen. Die Übung der Figur- Grund- Wahrnehmung spielt daher im Trainingsprogramm zur visuellen Wahrnehmung von Marianne Frostig (1982) eine tragende Rolle.

### **Formkonstanzwahrnehmung**

Eine auf der Figur- Grund- Wahrnehmung aufbauende Wahrnehmungsleistung ist die Formkonstanzwahrnehmung als deren Abstraktion, also das Erkennen der identischen Form, unabhängig von Größe, Lage und Farbe. Auch hier betont Marianne Frostig, wie die haptische Erfahrung die visuelle Wahrnehmung der Formkonstanz ermöglicht und wie sie ins Zweidimensionale übertragen wird.

### **Raumlage**

Raumlage ist die Wahrnehmungsleistung, die die Lage eines Gegenstandes oder einer Person in Bezug zum Betrachter erkennen läßt und zwar entwicklungsbezogen zunächst körpernah zum Betrachter durch die Erfahrung, Ertastung und Benennung eines Gegenstandes oder einer Person.

### **Wahrnehmung räumlicher Beziehungen**

Die Wahrnehmung der räumlichen Beziehung wird von Marianne Frostig als die Leistung analysiert, die Raumlage zweier oder mehrerer Gegenstände bzw. Personen zueinander zu erkennen; sie verlangt vom Betrachter, sich nicht selbst miteinzubeziehen, sondern ausschließlich die Anordnung untereinander wahrzunehmen.

Marianne Frostig hat mit diesem Konzept und dem gewiesenen Weg sehr vielen Kindern geholfen, sich gemäß ihrer Anlagen zu entwickeln und ist ihrem Grundsatz gefolgt, dass Lernen nur dann erfolgreich sein kann, wenn es mit Freude getan wird (18,64,88,99).

## **4.14 Modelle der Kindesentwicklung**

Hinsichtlich der Entwicklungsschritte des Kindes in seinen ersten Lebensjahren existieren verschiedene Theorien. Nachfolgend soll ein kurzer Überblick über die Entwicklungsmodelle Jean Piagets und Jean Ayres` vermittelt werden.

### **4.14.1 Piagets Theorie der kognitiven Entwicklung des Kindes**

Zu den soziologischen und psychologischen Ansätzen, die sich in den letzten Jahrzehnten mit der theoretischen Analyse und Erforschung der Kindheit beschäftigt haben, zählen die von Sigmund Freud entwickelte Psychoanalyse, welcher eine ausgeprägte entwicklungs-dynamische Komponente zu eigen ist, die Lerntheorie, die auf dem Prinzip der Konditionierung beruht, die Theorie der sozialen Interaktion, sowie die Theorie der kognitiven Entwicklung nach Piaget, sicher eine der umfangreichsten theoretischen Grundlagen der Entwicklung des Kindes, auf die an dieser Stelle näher eingegangen werden soll (13,63,66).

#### **Kurzbiographie Jean Piagets**

Der Schweizer Psychologe Jean Piaget, geboren am 9.8.1896 in Neuenburg in der Schweiz, machte bereits als Schüler durch zoologische Studien und Veröffentlichungen auf sich aufmerksam. Bald schon wandte er sich der Untersuchung von Denkprozessen bei Kindern sowie klinischen Fragen zu. Seine Arbeit in der Entwicklungspsychologie begann er mit der Standardisierung von Intelligenztests für Kinder. Er hatte Professuren für Psychologie, Philosophie und Soziologie in Neuenburg und Genf inne. Während seiner 70jährigen Arbeit entstanden zahlreiche Werke über die Entwicklung der Wahrnehmung und Vorstellung beim Kind. Piagets Beobachtungen und Untersuchungen zeigen, wie sich ein Kind mit Hilfe von Verhaltens- und Denkschemata, die sich von denjenigen der Erwachsenen unterscheiden, in den unterschiedlichen Altersstufen seine Umgebung erarbeitet.

Seine ersten bedeutenden psychologischen Schriften erschienen in den Jahren 1923 bis 1932. In den 30er Jahren griff Piaget allmählich mathematische Begriffe auf, vor allem die Begriffe

„Gruppe“ und „Gruppierung“ und löste die früheren verbalen Analysen durch logisch-mathematische ab. Es erschienen nun auch zahlreiche Veröffentlichungen zum Erwerb invarianter Begriffe, etwa zum Mengenbegriff, zum Zahlenbegriff, den Begriffen von Raum, Zeit, Bewegung und Geschwindigkeit.

Piaget vereinigt in seiner Person biologische, philosophische und entwicklungspsychologische Interessen. Die genetische Betrachtung diente ihm dabei als Brücke zwischen Biologie und Philosophie. Seine Hauptfrage lautet: „Was ist Erkenntnis und wie kommt sie zustande?“ Hauptsächlicher Untersuchungsgegenstand sind bei Piaget die qualitativen Veränderungen intellektueller Strukturen, wobei davon ausgegangen wird, dass diese dem beobachtbaren Verhalten zugrunde liegen. Diese organisierten Strukturen bilden die Einheiten der Analyse der Entwicklung und werden in gesetzmäßiger Stufenfolge angeordnet, sowie aus den biologisch fundierten Anpassungsaktivitäten des Organismus an seine Umwelt abgeleitet.

Bei den drei Aspekten, unter denen Piaget Verhalten betrachtet, handelt es sich um Inhalt, Struktur und Funktion des Verhaltens, wobei es sich beim Inhalt um das von außen beobachtbare Verhalten handelt, bei der Struktur um die erschlossenen organisierten Ganzheiten, die erklären, warum gerade dieses und nicht ein anderes Verhalten geäußert worden ist, und bei der Funktion um die Art und Weise, in der ein Organismus in seiner kognitiven Entwicklung fortschreitet.

Piaget räumt dem klassischen Reifungskonzept der biologisch vorprogrammierten Ausreifung anatomisch-physiologischer Strukturen nur die Bedeutung ein, die Möglichkeiten für den Aufbau kognitiver Strukturen in einem sehr allgemeinen Sinne zu begrenzen oder zu erweitern. Reifung, z.B. des Gehirns oder des motorischen Apparats, ist somit zwar eine notwendige, aber nicht hinreichende Grundlage für das Voranschreiten der kognitiven Entwicklung. Die kognitiven Strukturen selbst und ihre gesetzmäßige Abfolge sind nicht angelegt, sondern müssen erst aufgebaut werden, wofür die Anpassungsaktivitäten Assimilation und Akkomodation und die fortschreitende Organisation der Strukturen, die auf allen Altersstufen gleich wirken und somit nicht erst ausreifen müssen, entscheidend sind.

Jean Piaget befaßte sich insbesondere intensiv mit der Psychologie des Kindes und untersuchte dessen geistiges Wachstum bzw. die Entwicklung der Verhaltensweisen, also des Verhaltens einschließlich des Bewußtseins, bis in die Übergangsphase der Adoleszenz, während der der Jugendliche sich in die Erwachsenengesellschaft einfügt. Da man Kleinkindern keine sinnvollen Fragen zu ihrem Denken stellen kann, beobachtete Piaget seine eigenen Kinder genau bei ihren alltäglichen Aktivitäten. Gelegentlich wurde er auch zum beobachtenden Mitspieler, wenn er aus der Situation heraus kleine Experimente erfand, in

denen er etwa ein Spielzeug versteckte und beobachtete, ob das Kind danach suchte (13,63,65,82,83,119).

## **Grundlagen der Theorie Piagets**

Gemäß Piagets Theorie von der geistigen Entwicklung des Kindes vollzieht sich diese in einer ständigen Wechselwirkung von Assimilation und Akkomodation, wobei er unter Assimilation die Tendenz des Kindes versteht, Gegebenheiten der Umwelt an die bestehende innere Organisation, die Strukturstufe, anzupassen, oder, anders ausgedrückt, die subjektive Verwertung oder Interpretation der Umwelt im Sinne der im Verlauf der neurophysiologischen Reifung gerade erreichten Strukturstufe. Unter Akkomodation versteht er die Anpassung des Kindes an die objektiven Gegebenheiten der Umwelt und das Lernen an ihnen, erkennbar an Verhaltensänderungen, die durch Beachtung dieser Gegebenheiten zustande kommen. Je jünger ein Kind ist, desto stärker wird sein Verhalten vom Reifungsgeschehen bestimmt, wenn es älter wird, macht sich in zunehmendem Maße der Einfluß der Umwelt bemerkbar.

Die fortschreitende Konstruktion der räumlichen Beziehungen erfolgt auf zwei verschiedenen, zeitlich aufeinanderfolgenden Ebenen. Auf der Wahrnehmungsebene beginnt die Entwicklung des Raumes und vervollständigt sich auf der Vorstellungsebene, der intellektuellen Ebene.

Am Anfang des Lebens bildet sich ein sensomotorischer Raum heraus, der zugleich an die Weiterentwicklung von Wahrnehmung und Motorik gebunden ist und der sich sehr weit ausschließlich auf Grund von Wahrnehmungen entwickelt, bis die bildliche Vorstellung, symbolische Funktionen und damit auch die Entwicklung der Sprache hinzukommen. Schon bevor ein Kind imstande ist, sich Perspektiven vorzustellen oder Abstände zu messen, vermag es bereits projektiv wahrzunehmen und durch die bloße Wahrnehmung gewisse Beziehungen herzustellen. Die Wahrnehmung von Formen hat einen bedeutenden Vorsprung vor der Fähigkeit, dieselben in der Vorstellung zu rekonstruieren. Die räumliche Anschauung muß auf der ihr eigenen Ebene der Vorstellung, im Gegensatz zur direkten und aktuellen Wahrnehmung, alles rekonstruieren, was die Wahrnehmung zuvor in direktem Kontakt mit dem Gegenstand bereits erfasst hat. Daher trennen diese beiden Konstruktionen mehrere Jahre. Erst wenn ein Alter von 7-8 Jahren erreicht ist, führt die Koordinierung der Perspektive durch die Vorstellung zur Einsicht in Proportionen, zur Konstruktion eines geistigen Raumes.

Die Vorstellung eines Raumes baut auf den elementarsten Anschauungen auf, den topologischen Relationen, wie etwa benachbart, getrennt, umschlossen und nacheinander. Der gemeinsame Faktor, den beide Konstruktionen, Wahrnehmung und Vorstellung, trotz ihrer Unterschiede aufweisen, ist die Motorik, die die Quelle der Operationen selbst darstellt, die elementarste Wahrnehmung und das leitende Element der vorgestellten Bilder. Im Folgenden soll dargestellt werden, welche Stadien der kognitiven Entwicklung ein Kind gemäß Piaget durchläuft (63,65,72,73,82,83).

#### **4.14.1.1 Das senso- motorische Stadium**

Im Zeitraum etwa von der Geburt bis zum Alter von 2 Jahren befindet sich das Kind gemäß Piaget im senso- motorischen Stadium bzw. in der senso- motorischen Periode. Dass jede Entwicklungsstufe zum Teil für die folgenden verantwortlich ist, zeigt sich besonders in diesem Zeitraum, in dem das Kind noch nicht sprechen kann. Mangels einer symbolischen Funktion zeigt es noch kein Denken und keine Affektivität, die mit Vorstellungen verbunden wären und durch die es Personen oder Gegenstände in ihrer Abwesenheit bezeichnen könnte. Trotzdem ist die geistige Entwicklung im Laufe der ersten 18 Monate besonders rasch und wichtig, weil das Kind auf dieser Stufe die Gesamtheit der kognitiven Strukturen aufbaut, die als Ausgangspunkt für seine weitere kognitive und affektive Entwicklung dienen. Die senso- motorische Intelligenz organisiert das Wirkliche, indem sie die großen Kategorien des Tuns aufbaut, nämlich die Schemata des permanenten Gegenstandes, des Raums, der Zeit und der Kausalität, also die Substrukturen der entsprechenden künftigen Begriffe. Keine dieser Kategorien ist am Anfang gegeben und das ursprüngliche Universum ist ganz auf den Körper und das Tun zentriert, was in einer totalen Egozentrik zum Ausdruck kommt, die aber, mangels eines Ichbewußtseins, unbewußt bleibt. Im Laufe der senso- motorischen Periode vollzieht sich dann eine allmähliche Dezentrierung, die zur Folge hat, dass sich das Kind schließlich als ein Objekt unter anderen einordnet. Mit Hilfe seines sensorischen Systems in Form der Wahrnehmung und seines motorischen Systems, also den Körperbewegungen, baut sich das Kleinkind sein Weltbild auf.

Das senso- motorische Stadium veranschaulicht die Charakteristika aller vier Stadien nach Piaget auf konkrete Weise. Das Kind gewinnt Erkenntnisse über die Eigenschaften von Objekten und über deren Beziehungen untereinander. Es erwirbt das Wissen über manifeste Handlungen und damit eine Logik des Handelns. Indem es Schemata koordiniert und sie als

Lösungen auf neue Situationen anwendet, werden die kognitiven Strukturen des Kindes straffer organisiert. Überdies lernt es, zwischen Mittel und Zweck zu differenzieren und neue Ziele zu erreichen. Das Kind entdeckt die Grenzen seines eigenen Körpers; das Selbst differenziert sich allmählich in Abgrenzung von seiner Umwelt.

Piaget untergliedert den Aufbau des senso- motorischen Denksystems in 6 Stufen:

### **Erste Stufe: Reflexmodifikation**

Diese Stufe durchläuft das Kind etwa von der Geburt bis zum Alter von einem Monat. Von Geburt an verfügt der Mensch über eine Reihe von Reflexen und über ererbte Formen der Interaktion mit seiner Umwelt. Letztere betreffen die Tendenz des menschlichen Denkens, sich zu strukturieren und an die Umwelt anzupassen. Beim Neugeborenen werden Reflexe oder integrierte Reaktionen von spezifischen Stimuli ausgelöst, die sich ganz allmählich im Laufe der Zeit verändern. Das Kind paßt sich in kleinen Schritten den Erfordernissen von leicht veränderten Umständen an. Auch sein Unterscheidungsvermögen nimmt zu. Verhaltensweisen wie Saugen, Greifen und Sehen bleiben keine Reflexe, sondern können spontan produziert werden.

Nach Piaget verfügt der Mensch über die angeborene Tendenz, seine Fertigkeiten zu üben. Auf der ersten Stufe des ersten Stadiums werden vom Säugling Verhaltensweisen verstärkt, generalisiert und differenziert, die als Reflexe begonnen haben.

### **Zweite Stufe: Primäre Zirkulärreaktionen**

Auf der zweiten Stufe des senso- motorischen Stadiums, die etwa vom ersten bis zum vierten Lebensmonat andauert, entwickeln sich rasch zahlreiche strukturierte Verhaltensmuster, die Piaget als Schemata bezeichnet, weil nun primäre Zirkulärreaktionen ablaufen. Gemeint sind damit Verhaltensweisen, die sich ständig wiederholen und dadurch zirkulär werden. Der Säugling entdeckt irgendwann zufällig, dass ein bestimmtes Verhalten ein interessantes Ergebnis hervorbringt, und versucht dann, dieses Ergebnis erneut zu produzieren. Wird das Verhalten und sein Ergebnis erfolgreich wiederholt, kann man davon sprechen, dass sich eine Gewohnheit herausbildet. Die Zirkulärreaktionen in diesem Stadium werden auf dieser Stufe

als primär bezeichnet, weil bei den Reaktionen des Kindes allein sein eigener Körper im Mittelpunkt steht.

Eine wahrscheinlich universelle Primärreaktion stellt etwa das Daumenlutschen dar, das sich, wenngleich es schon vor der Geburt auftritt, erst jetzt zu einem systematischen, koordinierten Verhalten wandelt. Die Performanz der Zirkulärreaktionen scheint von Lustgefühlen begleitet zu sein.

### **Dritte Stufe: Sekundäre Zirkulärreaktionen**

Im Alter von etwa 4-8 Monaten zeigt sich die Erweiterung des kindlichen Horizonts ganz besonders deutlich beim Übergang von der primären Zirkulärreaktion zur sekundären, die nun auf die äußere Welt ausgerichtet ist. Wieder tut das Kind zufällig irgendetwas, das in seiner Umgebung ein interessantes Ergebnis hervorruft, schüttelt z.B. eine Rassel und erzeugt damit ein Geräusch. War in der vorangehenden Stufe das Rasseln selbst interessant, so sind es nun die Auswirkungen auf die Umwelt.

Auf der zweiten und dritten Stufe gelangt das Kind zu einigen einfachen Koordinationen seiner Schemata. Die Integration von Sehen und Greifen ist bei der Herausbildung zirkulärer Reaktionen besonders hilfreich. Diese Koordination der Schemata des Sehens, Hörens, Greifens, Saugens und so weiter setzt sich während des gesamten senso- motorischen Stadiums fort, so dass die kognitiven Strukturen zunehmend komplexer werden.

### **Vierte Stufe: Koordination der sekundären Verhaltensschemata**

Das etwa 8-12 Monate alte Kind kann nun seine Schemata auf komplexe Weise kombinieren. Allem voran entwickeln sich jetzt Planung und Intentionalität. Diese neue Verhaltenssequenz setzt sich zusammen aus einem oder mehreren Übergangsschemata bzw. instrumentellen Handlungen und einer Zielhandlung. Das Kind weiß nun, was es will und kann seine Fertigkeiten einsetzen, um an sein Ziel zu gelangen, es kann zwischen Mittel und Zweck unterscheiden. Das Mittel- Zweck- Verhalten wird auf dieser Entwicklungsstufe gezielt auf neue Situationen angewandt. Die Schemata sind jetzt übertragbar und können, um viele unterschiedliche Ziele zu erreichen, willkürlich eingesetzt werden. Das Kind kann nicht mehr

nur Verhaltensschemata koordinieren, um Hindernisse zu überwinden, sondern auch Gegenstände als Mittel zum Zweck einsetzen.

### **Fünfte Stufe: Tertiäre Zirkulärreaktionen**

Diese Stufe durchläuft das Kind zwischen dem 12. und 18. Monat. Es führt nun kleine Experimente durch, in denen es eine Handlung absichtlich variiert, um zu sehen, zu welchem Ergebnis dies führt. Erkundet wird das Potential eines jeden Gegenstandes, um eventuell Neues zu entdecken. Wie in früheren Zirkulärreaktionen wechseln auch hier Wiederholung und Variation einander ab. Durch absichtliche Versuch- und Irrtum- Exploration weiten Kinder das Mittel- Zweck- Verhalten der vorangegangenen Stufe aus, um neue Mittel zu entwickeln.

### **Sechste Stufe: Die Erfindung neuer Mittel durch geistige Kombination**

Die sechste Stufe, die sich etwa vom 18. bis zum 24. Lebensmonat des Kindes erstreckt, bildet die Grenze zwischen dem senso- motorischen und dem präoperativen Stadium. Das Denken wird nun immer mehr verinnerlicht. Bisher hat das Kind seine Gedanken vor der Welt ausgebreitet; von nun an verbirgt sich das bisher Manifeste. Da es nun imstande ist, mentale Symbole zu verwenden, die Objekte und Phänomene geistig abbilden, tritt an die Stelle der externen Exploration die interne geistige Exploration. Während dieser Phase gibt das Kind sein manifestes Versuch- und Irrtum- Verhalten auf, da dieses nicht mehr länger notwendig ist; es erfindet spontan neue Lösungen. Vorstellungen, die äußeren Phänomenen entsprechen, sie gleichsam repräsentieren, werden manipuliert.

### **Zusammenfassung**

Das wohl bezeichnendste Charakteristikum des senso- motorischen Lebensabschnittes ist die Tatsache, dass sich nie wieder im späteren Leben so viele Fähigkeiten in so kurzer Zeit entwickeln. Das Kind löst sich physisch von seiner Mutter, baut aber gleichzeitig eine Gefühlsbeziehung zu seinen Eltern und anderen Personen auf. Es beginnt zu krabbeln und zu sitzen, richtet sich dann auf und lernt mit 12-18 Monaten zu gehen. Besonders bedeutend für die Entwicklung in den ersten eineinhalb Jahren ist daher die Koordinierung von Wahrnehmungstätigkeit und Motorik.

Ein außerordentlich wichtiges Konzept, das im senso- motorischen Stadium entwickelt wird, ist die Konstanz von Form und Größe. Ein Objekt existiert also weiter, auch wenn das Kind es nicht sehen, hören oder fühlen kann. Dies ist zweifellos eine der grundlegenden Voraussetzungen dafür, dass der Erwachsene sich die Welt als stabil und vorhersehbar vorstellen kann. In dieser Periode entsteht eine tiefgreifende Umformung des wahrgenommenen Raumes, das heißt eine Systematisierung der vom Sehen begleiteten Bewegungen. Die Handhabung von sichtbaren Gegenständen führt mittlerweile tatsächlich zur Analyse der Figuren und Formen. Nunmehr erhalten Gegenstände die Konsistenz eines festen Körpers, es existieren nicht mehr nur elastische und verformbare Figuren. Im Alter von 8-10 Monaten werden Lageveränderungen der Gegenstände erkundet, außerdem Formen wiedererkannt und Perspektiven in Beziehung zueinander gesetzt.

Anfangs bewegt ein Baby noch den Kopf vor einem hängenden Gegenstand, weil es meint, dieser bewege sich dadurch, mit 8-9 Monaten erforscht es dann die perspektivische Wirkung einer eigentlichen Lageveränderung. Gegenstände erhalten eine konstante Dimension, da ihnen eine Permanenz zugeschrieben wird und Bewegungen gruppiert werden; nun kann die Größe der verschieden weit entfernten Positionen mehr oder weniger richtig eingeschätzt werden.

Bei den raumzeitlichen Strukturen stellt man fest, dass am Anfang weder ein einziger Raum noch eine zeitliche Ordnung existieren, die die Gegenstände und Ereignisse umfassen. Gegeben ist einzig und allein ein System von heterogenen Räumen, die alle auf den eigenen Körper zentriert sind, wie etwa Mund-, Tast-, Seh- und Hörraum, und darüberhinaus einige zeitliche Eindrücke ohne objektive Koordinierungen. Diese Räume werden dann, mit Hilfe des Mundes und des Greifens, fortschreitend, wenn auch anfangs noch lückenhaft, koordiniert. Entscheidend ist, dass der Aufbau des Schemas vom permanenten Gegenstand zur Grundunterscheidung zwischen den Zustandsänderungen einerseits und den Ortsveränderungen oder den Raum aufbauenden Bewegungen andererseits führt. Die Ortsveränderungen organisieren sich schließlich zu einer Grundstruktur, die das Gerüst des

praktischen Raumes darstellt, bis sie, sobald sie einmal verinnerlicht ist, für die Operationen der euklidischen Metrik als Grundlage dient.

Die ersten Phasen der Kinderentwicklung sind auf das eigene Tun zentriert und evozieren noch kein Bewußtsein von räumlichen und körperlichen Verbindungen. Selbst wenn es dem Säugling bereits gelingt, dem, was er sieht, zuzulächeln und Gegenstände auf verschiedene Weisen zu manipulieren, kennt er als einzige Ursache dafür sein eigenes Tun, sogar unabhängig von den räumlichen Kontakten. Durch die senso- motorische Intelligenz wird das Universum für das Kind nach einer raumzeitlichen Organisation und durch die Ausbildung permanenter Gegenstände strukturiert. Im gleichen Maße liegt nun die erkannte Ursache nicht mehr allein im eigenen Tun, sondern in beliebigen Gegenständen; dabei setzt die Ursache- Wirkung- Beziehung zwischen zwei Gegenständen oder ihrer Aktion einen physischen und räumlichen Kontakt voraus.

Gegen Ende der sensomotorischen Periode werden die Beziehungen der Gegenstände zueinander herausgearbeitet, zudem beginnen die verinnerlichten und raschen Koordinierungen, die den vollständigen Intelligenzakt charakterisieren. Die nun erworbene Fähigkeit, symbolische Funktionen zu bilden, ermöglicht später unter anderem den Erwerb der Sprache. Der Raum entwickelt sich nun allmählich von einem rein wahrgenommenen zu einem teilweise vorgestellten Raum (13,63,65,72,82,83,88).

#### **4.14.1.2 Das präoperative Stadium**

Sind die Leistungen des senso- motorischen Stadiums auch beachtlich, so dienen sie doch zugleich auch der Vorbereitung des darauffolgenden präoperativen Stadiums, welches das Kind etwa vom zweiten bis zum siebten Lebensjahr durchläuft. In gewissem Sinne fängt es nun noch einmal von vorne an: Was es auf der Ebene seines Einwirkens auf die Welt erreicht hat, wird nun auf der Ebene der mentalen Repräsentation neu entwickelt. Dabei überträgt es seine Konzepte von Objekten, Beziehungen, Kausalität, Raum und Zeit auf ein neues Medium und eine höher organisierte Struktur.

### **Mentale Repräsentationen**

Die Entstehung mentaler Repräsentationen auf der sechsten Stufe des senso- motorischen Stadiums, die durch einen allgemeineren Meilenstein der Entwicklung, die semiotische Funktion, d.h. die Fähigkeit, ein Objekt oder Phänomen durch ein anderes zu ersetzen, ermöglicht wird, stellt einen Brückenschlag zum präoperativen Stadium dar. Formaler ausgedrückt bezeichnet von nun an ein Signifikant ein Signifikat; als solche können Worte, Gesten, Objekte oder Vorstellungsbilder dienen.

Einen Vorläufer zur wirklichkeitsgetreuen Verwendung von Signifikanten stellt die auf der sechsten senso- motorischen Stufe erworbene Nachahmung dar, sobald sich der Übergang vom manifesten Handeln zum Gebrauch eines mentalen Symbols vollzieht; im Lauf der Entwicklung werden solche reduzierten Nachahmungen zu inneren Symbolen. Neben Symbolen, die eine gewisse Ähnlichkeit mit den Objekten oder Phänomenen, für die sie stehen, haben und die sich oft im symbolischen Spiel zeigen, können auch Zeichen als Signifikanten dienen.

Anders als bei Symbolen ist die Beziehung zwischen Zeichen und Objekten oder Phänomenen willkürlich, jedoch ist die Vorstellung, dass Wörter oder Zeichen den Objekten willkürlich zugeordnet sind, für ein Kind nur schwerlich zu begreifen.

Das repräsentative Denken hat im Vergleich zum senso- motorischen Denken die Vorteile, dass es schneller und flexibler ist, Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft zusammenfassen und einzelne Teile neu kombinieren kann, um Vorstellungen hervorzubringen, die sich auf nichts Reales beziehen. Die senso- motorische Intelligenz dagegen beschreibt Piaget als einen langsam ablaufenden Film, bei dem man zwar nacheinander alle Bilder sieht, dies aber unabhängig voneinander, so dass das Verständnis für die Gesamtheit fehlt.

Piaget vertritt die Meinung, erst die Entwicklung des repräsentativen Denkens ermögliche den Gebrauch der Sprache und anderer Signifikanten, es gehe also der Sprache voraus und reiche über sie hinaus. Sprache wäre demnach primär ein Modus, in dem das Denken zum Ausdruck kommt. Aber auch wenn Denken nicht von der Sprache abhängt, kann Sprache die kognitive Entwicklung fördern, etwa indem sie die Aufmerksamkeit auf neue Objekte oder Zusammenhänge in der Umwelt lenkt oder dem Kind abstrakte Informationen vermittelt, die es sich nicht ohne weiteres unmittelbar erschließen kann.

Denken in Symbolen und Zeichen stellt zwar einen gewaltigen Fortschritt gegenüber dem senso- motorischen Denken dar, ist aber in vielerlei Hinsicht auch noch eingeschränkt. Wie der Begriff „präoperativ“ schon aussagt, können Kinder in diesem Stadium noch keine reversiblen geistigen Operationen ausführen. Piaget selbst beschrieb präoperative Kinder eher über das, was sie nicht können, als über das, wozu sie fähig sind. Das präoperative Stadium

stellt zu einem großen Teil eine Zeit der Vorbereitung auf die nachfolgende Periode dar, dennoch definierte Piaget eine Reihe neuer Errungenschaften wie Identität, Funktion und Regulierung (63,69,71,72,73,82,83,88).

### **Egozentrismus**

Eines der Hauptmerkmale des präoperativen Denkens stellt der Egozentrismus des Kindes dar, der nicht wertend im Sinne von Selbstsucht oder Arroganz gebraucht werden sollte, sondern vielmehr die noch unvollständige Unterscheidung des Kindes zwischen dem Selbst und der Außenwelt, einschließlich anderer Menschen, und die Tendenz, die Welt aus der Perspektive des Selbst wahrzunehmen, zu begreifen und zu interpretieren beschreibt. Daraus ergibt sich, dass ein Kind weder die Perspektive der Wahrnehmung noch die des Denkens eines anderen Menschen bemerkt. Egozentrisches Denken erschwert es, die Rolle oder den Blickwinkel einer anderen Person zu übernehmen, weshalb das Kind sich auch kaum bemüht, sich beim Sprechen nach den Bedürfnissen des Zuhörers zu richten; es empfindet nicht das Bedürfnis, auf den Gesprächspartner einzuwirken. Kinder innerhalb einer Spielgruppe sprechen zwar, dies aber nicht unbedingt *miteinander*. Die Äußerungen eines Kindes haben jeweils keinerlei Bezug zu den Äußerungen aller anderen Kinder, eher handelt es sich um eine Art „kollektiven Monolog“ als um ein Gespräch. Dennoch sind Kinder im präoperativen Stadium weniger egozentrisch als im sensomotorischen Stadium, das eine mangelnde Unterscheidungsfähigkeit zwischen dem eigenen Handeln und den Eigenschaften von Objekten widerspiegelt. Nach dem präoperativen Stadium nimmt der Egozentrismus weiter ab, verschwinden wird er jedoch nie ganz, auch nicht beim Erwachsenen (63,72,88).

### **Rigidität des Denkens**

Typisch für das präoperative Stadium ist auch die Rigidität des Denkens. Ein Beispiel hierfür stellt die Zentrierung dar, also die Tendenz, die Aufmerksamkeit nur auf ein herausragendes Merkmal eines Objekts oder Phänomens zu richten, oder nur über dieses Merkmal nachzudenken und dabei andere zu ignorieren. Zentrierung wie auch Egozentrismus reflektieren jeweils die Unfähigkeit, gleichzeitig mit verschiedenen Aspekten einer Situation umzugehen, was eine Verzerrung der Weltsicht nach sich zieht.

Rigidität oder mangelnde Flexibilität des Denkens zeigt sich auch in der Tendenz, sich auf Zustände und nicht auf Transformationen zu konzentrieren, die diese Zustände miteinander verbinden. Man kann vergleichsweise sagen, Kinder konzentrieren sich mehr auf den Schein als das Sein.

Am deutlichsten zeigt sich die Rigidität des Denkens im präoperativen Stadium vielleicht in der fehlenden Reversibilität. Präoperative Kinder können eine Folge von Ereignissen, Transformationen oder Denkschritten nicht mental umkehren, weil ihre Fähigkeit, Handlungen zu verinnerlichen, nicht bidirektional ist und noch vervollständigt werden muß. Gegen Ende des präoperativen Stadiums läßt sich allmählich eine Erweichung der Starre des Denkens in Form einer Korrektur der Zentrierung und Irreversibilität erkennen.

Die drei positiven Errungenschaften des präoperativen Stadiums, Gruppierung, Regulierung und Identität, bereiten den kognitiven Übergang zur mentalen Reversibilität im konkret-operationalen Stadium vor. Das Erkennen der Identität bezeichnet die Vorstellung, dass ein Objekt sein äußeres Erscheinungsbild verändern kann, ohne dass sich deshalb auch seine grundlegende Natur verändern muß. Das Denken wird weniger starr, weil ein Konzept trotz oberflächlicher äußerer Veränderungen aufrechterhalten werden kann (13,63,69,72).

### **Prälogische Schlußfolgerungen**

Ein drittes Merkmal des präoperativen Stadiums stellt das prälogische Schlußfolgern dar. Gedanken werden häufig nur lose verknüpft und noch nicht logisch in Beziehung gesetzt. Das Kind versucht, sich die rätselhaften Naturereignisse seines Alltags zu erklären; dies beispielsweise in Analogie zum menschlichen Verhalten. Ein präoperatives Kind könnte z.B. behaupten, es gebe Schnee, damit Kinder in ihm spielen können (63,82).

### **Soziale Kognition**

Typisch für dieses Stadium ist auch die begrenzte soziale Kognition. Piaget behauptet, seine Beschreibung des Denkens gelte gleichermaßen für natürliche wie soziale Objekte und Phänomene. Die Darstellung des präoperativen Denkens verweist auf die Parallele zwischen physischem und sozialem Bereich. Beispiele dafür sind die im Egozentrismus begründeten Defizite bei der Übernahme verschiedener Rollen und in der Kommunikation, die

Verwechslung von natürlichen und menschlichen Ereignissen, sowie die Vorstellungen, die Kinder zur Identität von Personen haben, wenn diese sich äußerlich verändern.

Was das soziale Denken betrifft, so beurteilt ein Kind dieser Entwicklungsstufe das Unrecht einer Handlung nach externen Variablen, etwa danach, wieviel Schaden angerichtet wurde, oder ob die Tat bestraft wurde. Interne Variablen, wie die Absicht einer Person, ignoriert es (13,63,72).

#### **4.14.1.3 Das konkret- operative Stadium**

Das konkret- operative Stadium erstreckt sich etwa vom siebten bis zum elften Lebensjahr. Piaget bezeichnet das Alter von zwei bis elf Jahren mitunter zusammenfassend als Alter der Vorbereitung und Vollendung der konkreten Operationen, wobei das präoperative Stadium mit all seinen Errungenschaften das Kind auf den Höhepunkt seiner kognitiven Entwicklung vorbereitet: die Operationen. Regulierungen, Funktionen und Identitäten entwickeln sich zu Operationen, indem sie vollständiger, differenzierter, quantitativ und stabil werden.

Die Denkleistungen des jüngeren Kindes stehen im Zeichen der allmählichen Überwindung des Egozentrismus. In den ersten beiden Schuljahren ist das Kind der Wirklichkeit bereits vollständig zugewandt, jedoch handelt es sich dabei noch um eine egozentrische Wirklichkeit, die sich auf das Erlebnisfeld des Kindes beschränkt, eine Beschäftigung mit Wirklichkeiten, die dem Eigenerlebnis nicht zugänglich sind, scheitert an mangelndem Interesse (13,63,69,82,83,88).

#### **Anschauliches Denken**

Das Kind gewinnt nun neue Kenntnisse aus der unmittelbaren Anschauung und dem agierenden Umgang mit den Dingen, Piaget bezeichnet diese Denkstruktur als das anschauliche Denken. Das teilinhaltliche Erfassen der gegenständlichen Umwelt stellt hierbei ein wichtiges Medium der kognitiven Expansion dar. Das Benennen von Details sowie das Feststellen des sichtbar Vorhandenen befriedigen das Kind und werden von ihm als Arbeitsertrag empfunden.

Ab etwa dem achten Lebensjahr erlangt das Kind größere Selbständigkeit und eine stärkere Distanz vom Eigenerlebnis; das Denken nimmt komplexere Formen an. Die Fähigkeit zu

planen und zu strukturieren wie auch die Abstraktionsfähigkeit nehmen zu. Auch dem Bereich der Sprache wird beim Lösen von Problemen nun größere Bedeutung beigemessen (63,69,72,82,83).

### **Orientierung im Raum**

Der wesentliche Fortschritt, der sich auf dieser Entwicklungsebene erkennen läßt, ist die zunehmende Fähigkeit zur Orientierung im Raum. Für den 6- und 7jährigen sind Wege, auch wenn er sie zum Teil schon allein zurücklegen kann, isolierte Bahnen, die keinen Zusammenhang aufweisen. Er hat noch keine Orientierung im Sinne eines Überblicks über die räumlichen Beziehungen der Orte und Straßen seiner Umgebung zueinander, diese gewinnt er erst ab dem 8. oder 9. Lebensjahr. Etwa zu diesem Zeitpunkt gelingt es zudem erstmals, sich vom Eigenerlebnis zu distanzieren. Das räumliche und zeitliche Interesse erweitert sich dann auch auf Gegenstände und Ereignisse, die das Kind bisher weder gesehen noch selbst erlebt hat (63,82,83,88).

### **Der Erhaltungsbegriff**

Eine herausragende Errungenschaft des konkret- operativen Stadiums ist die Entwicklung des Erhaltungsbegriffes. Das Kind begreift, dass die Flüssigkeitsmenge, die von einem Gefäß in ein anderes, sei es schmaler oder breiter, gegossen wird, die gleiche bleibt, auch wenn sich der Flüssigkeitspegel dabei verändert.

Der Erhaltungsbegriff ist deshalb so wichtig, weil er der äußeren Welt eine gewisse Stabilität verleiht; er zeigt an, ob geistige Operationen vollzogen werden oder nicht (71,82,83).

### **Operationen**

Als Operation wird eine verinnerlichte Handlung und Teil einer organisierten Struktur bezeichnet. Mit der Fähigkeit, solche Operationen oder Konzepte zu gebrauchen, sind die Repräsentationen des Kindes nicht mehr isoliert oder nebeneinander gestellt, sondern sie gewinnen ein Eigenleben.

Dafür, dass sich der Übergang von der Aktion zur Operation verzögert, gibt es drei Gründe: Das erste Hindernis für die Operation ist die Notwendigkeit, das, was schon auf der Ebene der Aktion erworben war, auf der neuen Ebene der Vorstellung zu rekonstruieren. Zum zweiten beinhaltet diese Rekonstruktion einen Bildungsprozeß analog zu dem, was sich auf der sensorischen Ebene vollzieht, dem Übergang von einem Anfangszustand, in dem alles auf den eigenen Körper und die eigene Aktion zentriert ist, in einen Zustand der Dezentrierung, welche schon auf der Ebene der Handlung mühselig war, auf der Ebene der Vorstellung jedoch noch viel schwerer fällt, da sie sich nun auf ein sehr viel komplexeres Universum erstreckt.

Zum dritten besteht das Universum der Vorstellungen nun nicht mehr nur ausschließlich aus Objekten, sondern zugleich aus Subjekten, die zugleich dem Ich analog und fremd sind. Alle Aspekte, die sich aus dieser Situation ergeben, müssen differenziert und koordiniert werden, das zuvor noch rein physische Universum wandelt sich zum interindividuellen oder sozialen Universum.

Zu abstraktem Denken und Diskutieren ist der Mensch nicht vor dem siebten oder achten Lebensjahr fähig, Piaget zufolge vermutlich aus dem Grund, weil das menschliche Gehirn erst wenn es über konkrete Kenntnis über seinen Körper, die Welt und die physikalischen Kräfte verfügt, in der Lage ist, abstrakte Vorgänge zu verarbeiten.

Parallel zu den logisch- mathematischen Operationen werden die räumlichen Operationen aufgebaut. Das Raummaß etwa wird unabhängig von der Zahl, aber in enger Isomorphie mit ihr ausgebildet, bildet aber nur einen Fall von räumlichen Operationen.

Gemäß der Theorie Piagets steht die Entwicklung der räumlichen Operationen dem theoretischen Aufbau sehr viel näher als der historischen Abfolge, da die topologischen Strukturen, wie z.B. Nachbarschaftsbeziehungen, den anderen deutlich vorausgehen. Aus ihnen als Grundstrukturen entstehen die projektiven Strukturen, wie die Koordinierung der Gesichtspunkte und die metrischen Strukturen, etwa Ortsveränderungen (13,63,68,70,71,72,73,82,88).

#### **4.14.1.4 Das formal- operative Stadium**

Während dieser Periode, die sich in etwa vom elften bis zum fünfzehnten Lebensjahr erstreckt, sind geistige Operationen nicht mehr auf konkrete Objekte beschränkt, sondern finden nun auch Anwendung auf rein verbale oder logische Aussagen, auf das Hypothetische

wie das Reale, sowie auf Zukunft und Gegenwart. Der junge Mensch löst sich in dieser Phase vom Konkreten und ordnet das Wirkliche in ein System von möglichen Transformationen ein. Diese letzte grundlegende Dezentrierung vollzieht sich am Ende der Kindheit und bereitet die Adoleszenz vor.

Die Besonderheit der konkreten Operationen besteht darin, dass sie sich direkt auf die Gegenstände, ihre Beziehungen, ihre Zählung oder ihre Klassen beziehen; neu an der formal-operativen Stufe ist, dass der Jugendliche durch eine Differenzierung zwischen der Form und dem Inhalt fähig wird, folgerichtig über Aussagen nachzudenken, an die er nicht oder noch nicht glaubt, also als reine Hypothesen betrachtet. Damit ist der Grundstein für das hypothetisch- deduktive oder formale Denken gelegt (13,63,68,72,83,88).

#### **4.14.2 Die Entwicklungsschritte des Kindes nach Jean Ayres**



**Abbildung 4: Jean Ayres (1920-1989)**

Der Mensch kommt nicht „fertig“ auf die Welt, sondern vielmehr verändert er sich im Zeitraum zwischen Geburt und Lebensende ständig, unmittelbar erkennbar in der äußeren Erscheinung, aber auch was Verhalten, Fertigkeiten, Kenntnisse und Interessen betrifft. Wenngleich diese Tatsache schon zu Beginn der Menschheitsgeschichte erkannt worden sein

dürfte, begann erst vor 200 Jahren, von der Philosophie ausgehend, ein Entwicklungsdenken zu entstehen: man begann, den Entwicklungsbegriff auf materielle, biologische, historische sowie seelische Geschehensreihen anzuwenden. Bis dahin stand der Begriff Entwicklung, der ursprünglich das Auseinanderrollen einer Buchrolle bezeichnete, in seinem übertragenen Sinne für die gedankliche Entfaltung oder Darlegung eines Sachverhalts.

Entwicklung stellt einen fortlaufenden, irreversiblen Prozeß dar, der zu einer Organisation auf höher integriertem Niveau führt und auf Wachstum, Reifung und Lernen basiert; es entsteht eine höhere, gemeint ist damit eine differenziertere Organisation des Verhaltens, welches nunmehr vielfältigere Möglichkeiten bietet. Hierbei stehen psychische Entwicklung und physisches Wachstum in enger Wechselwirkung miteinander. So ermöglicht z.B. die Zunahme der Gehirnfunktionen, dass ein Kind zu lächeln, gehen oder sprechen beginnen vermag. Aufgrund von Wachstum erreicht der Mensch ein höheres Entwicklungsniveau; dieser Prozeß wird als Reifung bezeichnet. Man spricht zwar von Laufenlernen, weiß jedoch, dass erst bestimmte Reifungsprozesse stattgefunden haben müssen, die das Lernen ermöglichen (7,18,82,90).

Nach der amerikanischen Psychologin und Ergotherapeutin Jean Ayres nutzt das Kleinkind im Laufe seiner Entwicklung jede Aktivität, die es ihm ermöglicht, sich Bausteine als Fundament für eine komplexere und reifere Entwicklung zu beschaffen, so daß es auf jeder Entwicklungsstufe seine Tätigkeiten verbessert und schließlich höher geordnete Funktionen erlangt; es lernt mit sensorischen und motorischen Elementen in seinem Leben umzugehen und immer mehr Situationen zu meistern, wozu es gelegentlich auch notwendig sein kann, vor dem Übergang zu etwas Neuem auf einer früheren Entwicklungsstufe noch einmal zu üben. Die Bausteine für manche Tätigkeiten, Laufen beispielsweise, sind relativ einfach zu erkennen, während es wesentlich schwieriger ist, zu sehen, wie sich die Sinne des Kindes synchron mit diesen Bausteinen entwickeln und reifen; das Endprodukt ist die optische Wahrnehmung. Ebenso beruhen emotionales Wachsen, Verhalten und auch akademische Fähigkeiten auf einer sensomotorischen Grundlage.

Die Evolution vollzieht sich sehr langsam und die Natur wird die Verhaltensweisen, die ihr über Jahrmillionen das Überleben gesichert haben, beibehalten. Daher basieren die Aktionen des menschlichen Nervensystems auf den Bedürfnissen niederer Tiere, von denen der Mensch abstammt und auf den Reaktionen, denen er vor seiner Zivilisierung unterlag (7,18).

Im Folgenden sollen die wesentlichen Schritte auf dem Weg zur sensorischen Integration, die einzelnen Entwicklungsschritte des Kindes nach Jean Ayres, aufgezeigt werden.

#### **4.14.2.1 Der erste Lebensmonat**

Viele der im ersten Lebensmonat auslösbaren Reaktionen werden bereits vor der Geburt entsprechend der erreichten Reife des Nervensystems aufgebaut und können bei entsprechenden Reizeinwirkungen in Gang gebracht werden. Ohne die Integration, die sich bereits in Form dieser einfachen sensomotorischen Aktivitäten ausbildet, wäre im späteren Leben eine entsprechende Entwicklung der dann wesentlich umfangreicheren Aktivitäten nicht möglich.

Da die Sinnesorgane für Berührungsreize bereits im Mutterleib intensiv geschult werden, kann ein Neugeborenes bereits einige Empfindungen seines Körpers deuten und sie mit Reflexbewegungen beantworten, die als Anpassungsreaktion für das Baby gedacht sind; diese helfen ihm, seine Mahlzeiten zu finden oder bewahren es vor Schaden.

Wenn auch solche angeborenen Reaktionen automatisch ablaufen, so müssen doch zuvor Empfindungen in den Reflexablauf eingegangen sein, um eine sinnvolle und zweckgerichtete Handlung entstehen zu lassen. Wenngleich das Kind Berührungen als angenehm empfindet, so ist es auf dieser Entwicklungsstufe noch nicht in der Lage zu lokalisieren, wo es berührt wurde, da sein Gehirn noch unfähig ist, einen Punkt von einem anderen zu diskriminieren. Körperliche Berührungen zwischen Mutter und Kind als wesentliche Quelle der emotionalen Befriedigung ist besonders zu diesem Zeitpunkt von Bedeutung für die Hirnentwicklung des Kindes und das Entstehen einer stabilen Mutter- Kind- Bindung.

Auch auf Schwerkrafteinwirkungen und Bewegungsabläufe zeigt das Neugeborene bereits Reaktionen, da Innenohr und Gleichgewichtsorgan dazu schon in der Lage sind. Klammer- oder Beugebewegungen des gesamten Körpers sind die ersten Ganzkörperbewegungsmuster des Neugeborenen; da es seine Hand noch nicht willentlich öffnen und die Finger strecken kann, bleibt die Hand in den ersten Lebenswochen in einer leichten Fausthaltung geschlossen. Da der Zug der Schwerkraft denjenigen Teil des Gehirns stimuliert, welcher beim Drehen die Nackenmuskulatur dazu stimuliert, den Kopf zu heben, wird das Kind bereits versuchen, eben dies zu tun, und zwar einige Wochen später selbst in Bauchlage. Diese Anpassungsreaktion ist im Alter von einem Monat noch unreif, so dass der Kopf pendelt und manuell gestützt werden muß, beim Erwachsenen jedoch handelt es sich um genau denselben neuralen Mechanismus, der den Kopf problemlos in aufrechter Position hält.

Leichte Körperbewegungen, wie sie beim Geschaukelt- und Getragenwerden auf das Kind einwirken, helfen seinem Gehirn, sich zu ordnen und darüberhinaus werden Grundsteine für andere Erlebnisse und selbstgewählte Körperbewegungen geliefert. Empfindungen, die das

Kind als angenehm empfindet, fördern seine Wahrnehmungsintegration, Bewegungen, die im ersten Lebensmonat noch ziellos und zufällig wirken, sind erforderlich, um später gut geordnete Bewegungen durchführen zu können; die nötigen Informationen hierfür liefern die Sinnesorgane in Muskeln und Gelenken.

Der Sehsinn ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht sehr gut geordnet; erkennt der Säugling auch das Gesicht der Mutter und wichtige Gegenstände, so kann er doch nur sehr vage fixieren, komplexere Formen sowie Farbkontraste nicht differenzieren und sich ihm nähernde Gefahren nur erahnen. Der erste Schritt bei der Entwicklung des Sehens beruht darauf, zu lernen, eine Person oder einen bewegten Gegenstand zunächst mit den Augen und später mit dem ganzen Kopf zu verfolgen, was Informationen seitens der Netzhaut und der Sinnesorgane in den Augenmuskeln sowie der Nackenmuskulatur im Zusammenwirken mit der Schwerkraft und den dadurch ausgelösten Impulsen von den Gleichgewichtsorganen im Innenohr erfordert.

Die Reaktion auf ein Geräusch stellt den ersten Baustein zur Entwicklung von Sprache dar; das Kind reagiert auf Geräusche, wenn es sie auch noch nicht deuten kann und bedient sich kleiner Kehllaute, die das Sprachzentrum im Gehirn anregen.

Wie der Sinn für Schwerkraft, Bewegung und Berührung scheinen auch der Geruchs- und Geschmackssinn, die bereits bei der Geburt sehr gut entwickelt sind und während der ersten Lebensmonate eine wichtige Rolle spielen, in der Evolution schon sehr frühzeitig aufzutreten. Der Geruchssinn verbessert sich, im Gegensatz zu anderen Sinnen wie Sehen und Hören, mit zunehmendem Alter des Kindes nicht. Der Saugreflex stellt eine Anpassungsreaktion auf Reize dar, die vom Geschmacks- und Geruchssinn ausgelöst werden.

#### **4.14.2.2 Der zweite und dritte Lebensmonat**

Die motorischen Funktionen des Säuglings entwickeln sich vom Kopf ausgehend zu den Zehen. Da optische Wahrnehmung mehr als das Blicken auf einen Gegenstand umfaßt und die Augen zusätzlich das Bild des Gegenstandes konstanthalten müssen, kommt der Fähigkeit, Augen und Kopf zu stabilisieren, ein beachtlicher Überlebenswert zu. Augen- und Nackenmuskulatur sind daher auch die ersten Körperteile, die zu beherrschen der Säugling lernt.

Neben der Reizaufnahme durch die optischen Sinnesorgane in der Netzhaut muß das Gehirn zusätzlich die Schwerkrafteinwirkung und Bewegungsempfindungen aus dem Innenohr,

Empfindungen seitens der Augenmuskeln und Muskelempfindungen, die von der Nackenmuskulatur kommen, als Wahrnehmungsimpulse integrieren, woraus sich die Information, wie Augen- und Nackenmuskulatur konstant gehalten werden können, ergibt. Durch den Prozeß des Zusammenfügens unterschiedlicher Impulseinwirkungen lernt das Kind, ein klares Bild von seiner Umgebung aufzunehmen, auch wenn es selbst in Bewegung ist, eine Fähigkeit, die einen elementaren Baustein für das Erlernen des Lesens, sowie für die Aufrechterhaltung des Gleichgewichts und die Körperbeherrschung darstellt.

Hat das Kind gelernt, seinen Kopf aufrecht zu halten, benutzt es als nächstes die Muskeln im Arm- und Schulterbereich, um seine Brust aus der Bauchlage heraus vom Boden zu heben. Beteiligt daran sind Schwerkrafteinwirkungen, die das Gehirn veranlassen, die Muskeln der oberen Rückenabschnitte zu kontrahieren; das Kind sollte dabei unterstützt werden, ohne es durch ein Übermaß an Hilfe jeglicher Herausforderung zu berauben.

Im Alter von drei Monaten fehlt dem Kind noch die Augen- Hand- Kontrolle, wenn es nach Personen oder Gegenständen greift, jedoch sind die Hände zu diesem Zeitpunkt meistens offen. Sobald es seine Körperempfindungen mit dem kombinieren kann, was es sieht, findet es sehr schnell heraus, wie es sein Ziel zuverlässig erreichen kann.

Der Tastsinn liefert dem Gehirn Informationen, welche dem Kind helfen, ein Objekt festzuhalten. Noch ist das Greifen, das mittels der Handinnenfläche und der drei gegenüberliegenden Finger ausgeführt wird, ein automatischer Vorgang, der nicht willentlich unterbrochen werden kann, doch im Lauf der nächsten Monate lernt das Kind, diese Berührungsempfindungen mit Impulsen von den Muskeln und Gelenken der Hand zu integrieren und es entwickelt sich Schritt für Schritt eine zweckmäßigere Greifbewegung zwischen dem Daumen und den übrigen Fingern.

#### **4.14.2.3 Der vierte bis sechste Lebensmonat**

Das Kind ist nun bereits in der Lage, große Bewegungen durchzuführen, wobei die aus der Erfahrung eines Zusammenstoßes mit der körperlichen Umwelt resultierende Freude den Baustein für sich später entwickelnde reifere Gefühlsausdrücke bildet.

In diesem Alter entwickelt sich auch das Bewußtsein, wo sich der eigene Körper im Raum befindet; im Gehirn werden die Reize, die durch das Sehen vermittelt werden, mit denjenigen koordiniert, die von Händen und Armen stammen und das Kind greift nun auch häufiger mit nur einer Hand, statt mit allen beiden.

Einer der bedeutendsten Entwicklungsschritte dieser Altersstufe besteht darin, die Hände spontan vor dem Körper zusammenzubringen, so dass sie sich berühren, ebenso zeugt das Zusammenschlagen zweier Spielzeuge vor dem Körper von intakter sensorischer Integration. Auch kurze Zeit selbständig zu sitzen, ohne dabei das Gleichgewicht zu verlieren ist das Kind nun in der Lage. Die automatischen Muskelreaktionen, die es dabei aufrecht halten, werden durch Einflüsse der Schwerkraft, der Eigenbewegungen und des Sehens gelenkt. Einen entscheidenden Schritt für die Ausbildung derjenigen Muskeln, die für das Drehen, Aufstehen und Gehen zuständig sind, stellt die Bauchstreckhaltung dar, das Kind balanciert dabei seinen ganzen Körper auf dem Bauch. Aufgrund der in diesem Alter besonders stark empfundenen Einflüsse der Schwerkraft verspürt es den ausgeprägten Drang, Kopf, Arme, Beine und Schultern gleichzeitig anzuheben und da es nun gesteigerte Schwerkraft- und Bewegungseinwirkungen zu integrieren vermag, genießt es das Kind, in der Luft herumgewirbelt zu werden. Schreit es jedoch dabei, so handelt es sich um einen Hinweis darauf, dass es diese Empfindungen nicht in Einklang bringen kann und sein Nervensystem sich zu desorganisieren beginnt.

#### **4.14.2.4 Der sechste bis achte Lebensmonat**

Je mehr Fortbewegungsmöglichkeiten dem Kind zur Verfügung stehen, desto stärker beginnt es, Orte und Dinge zu erforschen. Durch Krabbeln und Kriechen auf Händen und Knien entstehen viele Sinneseindrücke, die integriert werden müssen und das Kind sich selbst als ein unabhängiges Wesen empfinden lassen. Voraussetzung hierfür ist, dass es in der Lage ist, sich vom Rücken in die Bauchlage zu drehen, eine als Halsstellreflex bekannte Bewegung, die es auch der Katze ermöglicht, bei einem Sturz stets auf den Pfoten zu landen; Schwerkraft, wie auch Muskeln und Gelenke des Nackens liefern hierfür die notwendigen Empfindungen.

Auch die Grundlagen der Raumwahrnehmung werden in diesem Lebensabschnitt gebildet. Fortbewegung bringt für das Kind Erfahrung über den Raum und den Abstand zwischen ihm selbst und den Gegenständen seiner Umwelt mit sich. Um Entfernungen abschätzen zu können, ist es nicht ausreichend, Dinge zu sehen, sondern das Gehirn muß darüberhinaus die Art des Abstands durch die Eindrücke der Körperbewegungen fühlen. Durch Krabbeln und Kriechen von einem Ort zum anderen lernt das Kind die physikalische Struktur des Raums kennen, was ihm dabei hilft, besser zu verstehen, was es sieht. Eine gute Entfernungsschätzung erleichtert es ihm zudem, die Größe von Gegenständen abzuschätzen.

In den ersten sechs Monaten laufen die meisten Bewegungen automatisch ab. Danach beginnt das Kind, Handlungen vorab zu planen. Mittlerweile ist es in der Lage, Daumen und Zeigefinger in einem Scheren- oder Kneifzangengriff zu gebrauchen, kleine Gegenstände aufnehmen oder an einer Schnur zu ziehen, wobei es vom Tastgefühl sowie den Empfindungen aus Muskeln und Gelenken geleitet wird. Für feinere Handbewegungen sind jedoch genauere Informationen seitens der Augen nötig; als Grundlage hierfür dient die einfache Augenkontrolle, die sich bereits in Bauchlage ausbildete. Bewegungen müssen innerhalb des Gehirns geplant werden, um Handlungsabfolgen in einer genauen Ordnung vollbringen zu können. Auch hierfür sind Körperempfindungen die nötige Voraussetzung.

Der Beginn der geistigen Fähigkeit, sich Dinge vorzustellen, liegt darin begründet, dass das Kind nun anfängt, nach Gegenständen Ausschau zu halten, die bedeckt wurden oder aus seinem Sichtbereich entfernt wurden; es lernt zu begreifen, dass diese Dinge nichtsdestotrotz weiter existieren.

Durch das Wiederholen einfacher Silben verschafft sich das Kind Informationen vom Kiefergelenk, von den Muskeln und der Haut des Mundes. Je mehr diese Eindrücke vom Gehirn verarbeitet werden, desto komplexere Geräusche lernt es zu formen; dabei handelt es sich um die Grundlagen des Spracherwerbs.

#### **4.14.2.5 Der neunte bis zwölfte Lebensmonat**

In diesem Zeitraum wird vor allem die optische Wahrnehmung des Kindes, das nun viel Zeit damit verbringt, Gegenstände zu betrachten, geschult. Zudem lernt es, einen Bezug zwischen sich, seinem Körper und der Erde sowie dem umgebenden Raum herzustellen. Die Umwelt wird immer ausgiebiger erforscht, wobei das Nervensystem durch zahlreiche Empfindungen und Einflüsse, durch Muskeln, Knochen, das eigene Körpergewicht des Kindes und die Schwerkraft stimuliert wird. Die beiden Körperhälften werden mehr und mehr miteinander verknüpft, Bewegungen immer gezielter geplant. Das Kind entwickelt die wichtige Fähigkeit, mit den Händen die Mittellinie des Körpers zu überkreuzen und auch der Umgang mit Gegenständen und Werkzeugen wirkt nun schon geschickter.

Nunmehr bereits in der Lage, den Großteil dessen, was ihm die Eltern sagen, zu verstehen, kann das Kind selbst dennoch erst einige wenige Worte sprechen; anscheinend regen Reize, die den Körperbewegungen des Kindes entstammen, im Gehirn Zentren für die Erzeugung solcher Laute an.

In dieser Entwicklungsperiode ereignet sich einer der größten Meilensteine der frühen Kindheit, das Alleinaufstehen, das als Endprodukt der Verarbeitung aller Informationen, die von der Schwerkraft, den Bewegungen des Kindes, den Muskel- und Gelenkempfindungen in den vorangegangenen Monaten geliefert wurden, zu betrachten ist. Diese großartige Selbsterfahrung für das Kind erfordert die Integration von Empfindungen aus jedem Teil des Körpers und sollte ihm nicht durch ein Zuviel an Hilfestellung genommen werden.

#### **4.14.2.6 Das zweite Lebensjahr**

Wie die im ersten Lebensjahr stattgefundene sensorische Integration die Grundlage für all die Fähigkeiten des Kindes, die es nun beherrscht, bildet, so stellt seinerseits die zunehmende Reizverarbeitung, die im zweiten Lebensjahr erfolgt, die Voraussetzung für die Entwicklung während der folgenden Jahre dar. Das Kind lernt jetzt zu gehen, zu sprechen und komplexe Handlungen sowohl zu planen, als auch immer erfolgreicher durchzuführen.

Vom zweiten Lebensjahr an kann das Kind lokalisieren, wo es berührt wurde; Reaktionen aus Berührungen sind nun nicht mehr als Reflex zu verstehen, wie auch Reaktionen mittlerweile willentlich gesteuert werden können. Empfindungen, die es vom Sehen her nicht erfahren würde, informieren das Gehirn auf dem Umweg über die Berührung. Das Erleben von seitens der Haut vermittelten Gefühlen läßt das Kind seinen Körper fühlen, ihn begreifen lernen, auch seine Maße und Begrenzungen erfahren. Diese gefühlserlebte Bewußtheit des Körpers ist grundlegender als das optische Wissen über den Körper. Kinder, die diese Empfindungen nicht in der richtigen Weise verarbeiten können, etwa weil sie keine guten Tastempfindungsinformationen von ihren Händen erhalten, sind außerstande, exakt zu empfinden, wie ihr Körper strukturiert ist und wie jeder Teil für sich arbeitet. Zwar können sie lernen zu sitzen, aufzustehen und zu laufen, im Umgang mit Gegenständen zeigen sich jedoch Schwierigkeiten.

Während dieser Entwicklungsstufe übt das Kind immer andere und immer ausgefeiltere Bewegungsvariationen, um zusätzliches Sinnesbewußtsein über die Funktionen seines Körpers und die Prinzipien der physikalischen Umwelt zu erlangen. Die Gelegenheit, sich mit seiner Umwelt auseinanderzusetzen, ist für ein Kind nicht weniger elementar, wie Nahrung und Zuwendung, Kinder in diesem Alter genießen jede Form der Einwirkung der Schwerkraft auf die Gleichgewichtssinnesorgane im Innenohr und lieben es deshalb, herumzutoben. Dabei lassen sich immer stärker das Zusammenwirken der einzelnen Körperteile, die Einheit des

Körpers, aber auch seine Grenzen erfahren. All diese sinnlichen Wahrnehmungen formen ein inneres Vorstellungsbild des Körpers innerhalb des Gehirns, das als Körperschema bezeichnet wird. Während sich das Kind bewegt und Erfahrungen über die Konsequenzen dieser Bewegung sammelt, misst es seinen Körper aus, sein Gehirn speichert unzählige Informationseinheiten, die das Gehirn später zum Planen und Steuern seiner Körperbewegungen benutzen kann. Klettern beispielsweise dient dazu, den inneren Drang des Kindes, den Raum nicht nur in horizontaler, sondern auch in vertikaler Richtung zu erforschen, zu befriedigen. Voraussetzung auch hierfür sind gut geordnete Empfindungen über Schwerkraft und Körperbewegungen, die durch das Klettern selbst noch auf visueller Ebene sowie durch weitere Empfindungen ergänzt werden. Da Klettern eine ausgeprägte sensomotorische Intelligenz erfordert, stellt es einen wesentlichen Schritt in Richtung der Entwicklung der visuellen Raumwahrnehmung dar.

Dadurch, dass es sich selbst immer mehr als autonomes Wesen zu begreifen lernt, entwickelt das Kind ein wachsendes Selbstwertgefühl, im Alter von zwei Jahren eine wichtige Aufgabe. Es beherrscht die Dimensionen seines Körpers, ist der Erdschwere nicht länger passiv unterlegen und genießt es, sich zu verstecken und wiederzuerscheinen, sowie seine Umwelt zu durchforsten. Die richtige Verarbeitung seiner Sinneswahrnehmungen birgt die Grundlage für gute Beziehungen zu den Mitmenschen. Findet ein Kind schlecht Kontakt zu anderen Menschen, so kann dies ein Hinweis auf seine Unfähigkeit sein, seine Eindrücke zu verarbeiten.

Um ihre neugewonnene Unabhängigkeit zum Ausdruck zu bringen, verwenden viele Kinder zu diesem Zeitpunkt erstmals das Wort „nein“, ein wichtiger, wenn auch teilweise für die Umwelt, speziell die in ihrer Autorität beschnittenen Eltern, frustrierender Schritt zur Entwicklung sozialer Eigenschaften. Dennoch ist das Kind noch weit davon entfernt, ein eigenständiges Wesen zu sein, nach wie vor bedarf es großer Unterstützung, um sich zu organisieren und die Integration seiner Sinneswahrnehmungen zu fördern.

#### **4.14.2.7 Das dritte bis siebte Lebensjahr**

Während dieser Zeit wird das Kind ein aus sensomotorischer Sicht reifes Wesen, das sprechen und zu seinen Mitmenschen Kontakt aufnehmen kann. Höhere intellektuelle Funktionen entwickeln sich, auf der Grundlage der bereits erworbenen sensomotorischen Fähigkeiten, erst mit Ende des siebten Lebensjahres.

Die Zeit zwischen dem dritten und siebten Lebensjahr stellt die Periode dar, während der das Gehirn gegenüber Wahrnehmungseinwirkungen am aufnahmefähigsten ist und daher über die besten Voraussetzungen verfügt, diese zu gliedern. Folglich befindet sich das Kind in einer kritischen Phase der sensorischen Integration. Jede seiner Anpassungsreaktionen an Umwelteinwirkungen, die immer komplexer werden, erweitert die Fähigkeit des Kindes zu mehr Wahrnehmungsverarbeitung. Dinge, die seine Wahrnehmungsintegration fördern, bereiten dem Kind Freude und es wird sie wiederholen. Beachtliche Fortschritte werden in Bezug auf das Gleichgewicht halten, die Augen- Hand- Kontrolle und die Planung von Bewegungsabläufen erzielt. Durch gefährliche Manöver lernt es, die Grenzen seiner sensomotorischen Fähigkeiten auszuloten und indem es sich gegen die Schwerkraft fallen läßt, erfährt es, wie es mit dieser gewaltigen Kraft fertig wird. Kinderspielplätze erfüllen somit die Aufgabe, das Nervensystem zu komplettieren. Auch der Umgang mit Werkzeugen aller Art wird vervollkommnet, wobei bei jedem Lernschritt auf die vom Gehirn bei früheren Aktivitäten bereits gespeicherte sinnliche Wahrnehmungsverarbeitung zurückgegriffen wird. Im Alter von acht Jahren sind die Sinnesorgane des Kindes in etwa so reif, wie sie es für den Rest des Lebens bleiben werden, die meisten sinnlichen Empfindungen und Wahrnehmungen sind gut integriert und die Fähigkeit, Handlungsabläufe zu planen, ist weit ausgereift, wird sich im Laufe der Zeit aber noch verbessern. Das Gefühl für Körperbewegung und Erdschwere ist nun vollständig entwickelt, Berührungen können exakt lokalisiert werden. Auch der Sprache bedient sich das Kind in ausreichendem Maße, um seine Bedürfnisse und Interessen auszudrücken und sich mit seiner Umwelt auseinanderzusetzen (7,18,88,99).

## **5. Störungen der Raumwahrnehmung**

Die Dinge, die wir um uns herum sehen, bekommen erst dann einen richtigen Sinn, wenn das Gehirn darüber informiert ist, wo sich die Erde befindet und ob Kopf und Körper bewegt werden. Jegliche Störung in der Verarbeitung von Sinnesinformationen, sei es aus dem Gleichgewichtsorgan, von den Augen oder der Halsmuskulatur, beeinträchtigt die visuelle Wahrnehmung und damit die Raumwahrnehmung und kann sich auf verschiedenste Art und Weise äußern (7).

Auf die möglichen Ursachen und Manifestationsformen einer gestörten Raumwahrnehmung sowie auf verschiedene Einteilungskriterien der räumlichen Defizite soll nun spezieller eingegangen werden.

### **5.1 Einteilungsaspekte räumlicher Störungen**

Räumliche Störungen können nach ihrem wesentlichen Störungsaspekt in 4 Kategorien unterteilt werden, nämlich räumlich- perzeptive, räumlich- kognitive, räumlich- konstruktive und räumlich- topographische Beeinträchtigungen. Einbußen in den ersten drei Kategorien wurden dabei vergleichsweise häufig nach Hirnschädigung beschrieben, Angaben zur Inzidenz reichen von etwa 30-50% bei Patienten mit linkshemisphärischer Schädigung und bis zu 50-70% nach rechtshemisphärischen Hirnläsionen (51).

#### **Räumlich- perzeptive Störungen**

Räumlich- perzeptive Störungen können in allen wichtigen Sinneskanälen auftreten, so dass sie in visuell- räumliche, taktil- räumliche und akustisch- räumliche Störungen unterteilt werden können. Sie bezeichnen eine Einbuße in der Verarbeitung basaler perzeptiver Leistungen, wie etwa der Position eines Objektes, seiner Entfernung, seines Neigungsgrades, seiner Größe, des Abstandes zur eigenen Person oder zu benachbarten Gegenständen. Betroffene Patienten zeigen in Tests häufig Probleme im Einschätzen der Vertikalen und der

Horizontalen, also der Haupttraumachsen, der Position und Entfernung eines Objektes im Raum, sowie wenn sie die Mitte eines Gegenstandes zeigen sollen. Viele dieser Beeinträchtigungen werden von den Betroffenen selbst im Alltag nicht berichtet und erst dann manifest, wenn eine motorische Leistung damit verbunden ist, etwa die Halbierung eines Brotes.

### **Räumlich- kognitive Störungen**

Im Unterschied dazu ist bei Patienten mit räumlich- kognitiven Defiziten die mentale Manipulation oder Veränderung eines vorgegebenen Reizes nach räumlichen Gesichtspunkten beeinträchtigt. Bei Patienten mit parietalen Läsionen lassen sich häufig Probleme beobachten beim Versuch, sich den Verlauf einer Linie vorzustellen, wenn diese an einer Achse gespiegelt werden soll. Ebenso bestehen oft Schwierigkeiten, sich vorzustellen, wie eine gegenüber sitzende Person die Position von Gegenständen auf dem Tisch vor ihr wahrnimmt, oder die Vorstellung eines Gegenstandes aus einer unüblichen Perspektive gelingt nur schwer bzw. gar nicht.

### **Räumlich- konstruktive Störungen**

Räumlich- konstruktive Störungen, auch als konstruktive Apraxie bezeichnet, sind gekennzeichnet durch die Unfähigkeit, einzelne Elemente einer Figur manuell in der visuellen oder taktilen Modalität zu einem Ganzen zusammenzufügen. Betroffene Patienten fallen häufig dadurch auf, dass sie Probleme beim Ankleiden oder Zusammenlegen von Kleidungsstücken haben, beim Tischdecken oder anderen Alltagstätigkeiten. Das Zusammenbauen technischer oder elektrischer Einzelteile nach Plan ist ebenso oft beeinträchtigt. Der wesentliche Unterschied zu anderen räumlichen Defiziten besteht dabei im manuell- konstruierenden Akt, der die Umwandlung visueller oder taktiler Informationen von retinalen oder primär- somatosensiblen Koordinaten in entsprechende Aktionen erfordert.

### **Räumlich- topographische Störungen**

Mit dem Begriff der räumlich- topographischen Störung oder der räumlichen Orientierungsstörung werden Probleme bezeichnet, die sich bei der Fortbewegung durch eine dreidimensionale Umgebung zeigen, sei es mental oder in der Realität. Diese Störungen sind vergleichsweise selten und nicht zwingend mit anderen räumlichen Defiziten verknüpft. Die Betroffenen berichten über einen Vertrauensverlust in vormals bekannter Umgebung und sie erkennen wichtige Landmarken nicht mehr, so dass sie sich im Alltag, insbesondere unter ungünstigen Bedingungen, Dunkelheit etwa, verlaufen. Besonders stark ausgeprägt sind die Schwierigkeiten hierbei in unvertrauter Umgebung, denn Patienten mit dieser Störung lernen neue Wege nur schwer. Darüberhinaus scheint auch das mentale Vorstellen von Wegen betroffen zu sein, da die Patienten keine Verknüpfungen zwischen verschiedenen Positionen im vorgestellten Raum vornehmen können, etwa um Abkürzungen zwischen zwei Punkten festzustellen (51).

## **5.2 Cerebrale Ursachen für Störungen der Raumwahrnehmung und ihre Erscheinungsformen**

Räumliche Leistungen sind unabdingbar zur Steuerung jeglichen Verhaltens im Raum, etwa um die Position eines anderen Individuums wahrzunehmen, die Richtung eines sich nähernden Fahrzeugs abzuschätzen oder um sich in einer dreidimensionalen Umgebung orientieren und bekannte Orte wiederfinden zu können. Die Fülle der perzeptiven und kognitiven Funktionen dabei verdeutlicht, dass der Begriff Raum kein homogenes, einheitliches Konzept darstellt, wenn dies auch subjektiv so erscheinen mag, sondern dass er multiple, mitunter dissoziierbare Aspekte umfasst, die im Zuge einer Hirnschädigung gestört sein können.

Der Raum, im Idealfall subjektiv als multisensorisches Ganzes erlebt, wird aus einer Vielzahl sensorischer, kognitiver und motorischer Leistungen konstruiert, wobei je nach erforderlicher Leistung die Umwandlung von Informationen aus einem Sinnessystem in ein anderes oder in Handlungen unter Beteiligung vieler Hirnregionen notwendig ist.

Isolierte Ansätze zur Erklärung der Vielfalt und Komplexität räumlicher Störungen führen daher nicht zum Ziel; vielmehr scheinen bei der Analyse räumlich- perzeptiver Stimulusmerkmale Informationen über die räumliche Ausdehnung innerhalb und zwischen Objekten in posterioren Hirnregionen, den okzipito- parietalen Übergangsregionen, verarbeitet zu werden, während Informationen über die relative Position und

Achsenorientierung in weiter anterior bzw. parietal gelegenen Verarbeitungsstufen kodiert werden. In diesen späten Verarbeitungsstufen wird in erster Linie die Integration verschiedener sensorischer Informationen in mehrere netzhautunabhängige räumliche Repräsentationssysteme vorgenommen, von denen vermutlich sehr viele existieren, die individuell auf das jeweilige Effektororgan, etwa für Laufen, Hören, Körperausrichtung und andere Bewegungen, abgestimmt sind. Aufgrund komplexer anatomischer Verbindungen zwischen dorsalen visuellen Arealen und motorischen Hirnarealen ist es naheliegend, dass eine enge Verknüpfung räumlicher und motorischer Leistungen besteht.

Es hat sich erwiesen, dass Läsionen der rechten Hemisphäre häufigere und schwerere räumlich- perzeptive Störungen nach sich ziehen, obgleich dies nach linksseitigen Läsionen in der Frühphase vorübergehend auch der Fall sein kann. Räumlich- konstruktive Störungen treten nach Hirnschädigungen unterschiedlichster Lokalisation auf und dies annähernd gleichhäufig nach rechts- wie linksseitigen Läsionen, insbesondere des parietalen Kortex, der Basalganglien, des dorsolateralen Frontallappens und infolge subkortikaler Läsionen.

Rechtshemisphärische Läsionen scheinen eher elementar- räumliche Defizite sowie Probleme mit der Gesamtgestalt zu bewirken, linkshemisphärische Schädigungen dagegen Störungen in der sequentiellen Planung und Durchführung der einzelnen Teilschritte.

Eine rechtsparietale Schädigung zieht einen ausgeprägten kontralateralen Neglect nach sich; dies bedeutet, dass nach einer rechtshemisphärischen Läsion des parietalen Kortex die Betroffenen die kontralaterale Seite ihrer Umwelt und den kontralateralen Teil ihres Körpers in Bezug auf alle sensorischen Modalitäten ignorieren, während eine vergleichbare linkshemisphärische Schädigung zu andersartigen Ausfällen führt.

Räumlich- kognitive Störungen, also Defizite im mentalen Perspektivenwechsel, finden sich nach parietalen Läsionen. Die frontalen Augenfelder, der obere Scheitellappen und Areale des mittleren Temporallappens, die für die visuelle Bewegungsanalyse relevant sind, werden bei mentalen Rotationsaufgaben signifikant aktiviert; Defizite in der mentalen Rotation finden sich bei Patienten mit rechts- und linksseitigen Hirnläsionen gleichermaßen.

Störungen räumlich- topographischer Leistungen treten nach unilateralen rechts- oder linksseitigen parahippocampalen Läsionen meist infolge eines mediobasalen Posteriorinfarktes oder epilepsiechirurgischer Resektionen im Bereich des posterioren Hippocampusanteils auf. PET- Untersuchungen zu simulierten Navigationsaufgaben haben ergeben, dass sich eine Arbeitsteilung dorsaler und ventraler Projektionssysteme für unterschiedliche Aspekte der Orientierung im dreidimensionalen Raum andeutet.

Störungen in der Wahrnehmung oder Einstellung der Hauptraumachsen treten häufig nach rechts- parietaler, seltener nach linksseitiger Hirnschädigung auf und finden sich auch nach Thalamusläsionen, Hirnstammläsionen sowie peripher- vestibulären Schädigungen. Diese Befunde lassen sich als Beeinträchtigung einer gravizeptiven Bahn interpretieren, die vom Hirnstamm über Mittelhirnareale durch den hinteren Thalamus in den temporoparietalen (vestibulären) Kortex zieht. Beide Hauptraumachsen werden nach einseitiger, parietaler Hirnschädigung kontraversiv verdreht, d.h. im Uhrzeigersinn nach linksseitiger und gegen den Uhrzeigersinn nach rechtsseitiger Schädigung, wodurch es zur Kippung des visuellen Raumes zur Herdgegenseite kommt.

Störungen in der Unterscheidung schiefer Linienorientierungen finden sich häufig nach rechtsseitiger, meist temporoparietaler Schädigung sowie Läsionen der Stammganglien rechts, jedoch auch nach links- frontalen Läsionen.

Die Längenschätzung als eindimensionale Variante einer visuellen Formschätzungsaufgabe spezifiziert die Größe oder Ausdehnung von Objekten, d.h. den Raum innerhalb eines Objektes oder einer Fläche. Demgegenüber geht es in der Distanzschätzung um räumliche Abstände zwischen Objekten. Neglectpatienten etwa weisen Defizite in der horizontalen Längenschätzung im vernachlässigten Halbraum auf; vermutlich deshalb, weil jede Hemisphäre die relative Größe der jeweils kontralateralen Objekt- oder Raumhälfte kodiert.

Defizite in der visuellen Distanz-, Längen- und Formschätzung ergeben sich auch bei Patienten mit bilateralen posterioren Hirnläsionen, wobei sich die größten Probleme in diesem Fall jedoch in der Tiefenschätzung zeigen. Weniger ausgeprägte Defizite der zweidimensionalen Distanzschätzung finden sich bei Patienten mit unilateralen okzipitoparietalen Läsionen. Eine beeinträchtigte Formschätzung tritt meist nach bilateralen Läsionen okzipitotemporal, oder nach diffus- disseminierten Läsionen auf, etwa infolge einer cerebralen Hypoxie oder einer Kohlenmonoxidvergiftung. Abweichungen in der Linienhalbierung konnten bisher nicht direkt mit fokalen Läsionen in Zusammenhang gebracht werden, sondern sind vielmehr als Symptom bei Patienten mit Hemineglect sowie bei homonymen Gesichtsfeldausfällen beschrieben worden. Die Verschiebung der subjektiven Geradeausrichtung erfolgt bei den Neglectpatienten in der Frühphase nach ipsiläsional, bei den Hemianopsiepatienten ohne Neglect nach kontraläsional in Richtung des Skotoms. Entsprechende Verschiebungen der subjektiven Geradeausrichtung finden sich auch im Alltag, etwa beim Gehen durch eine Tür oder Sitzen vor einem Tisch.

Die visuelle Positionsschätzung betreffend, welche relevant ist für die Lokalisation von Objekten oder Positionen im Raum über Augen- oder Handbewegungen, finden sich zwei

unterscheidbare Defizite: ein Genauigkeitsverlust sowie eine systematische Verschiebung der reproduzierten Positionen, welche oft kovariert mit der Verschiebung der subjektiven Geradeausrichtung bei Neglect oder Hemianopsie. Beide Aspekte werden am häufigsten nach rechtshemisphärischer Hirnschädigung beobachtet, insbesondere bei Patienten mit parietalen Läsionen unter Einbeziehung des supra- ventrikulären Marklagers.

Eine Störung der Wahrnehmung der eigenen Körperlängsachse tritt am häufigsten nach Läsion der Insel, des Gyrus postcentralis inferior, des Gyrus supramarginalis sowie des Gyrus angularis auf. Läsionen parietaler Areale ziehen Störungen der Orientierungsschätzung nach sich, Läsionen posteriorer, parietaler bzw. parietookzipitaler Kortexregionen und Läsionen des parietalen Marklagers korrelieren mit Störungen der Positionsschätzung.

Nach wie vor wird kontrovers diskutiert, ob es sich bei Störungen der Raumoperationen und der räumlich- konstruktiven Leistungen um eigenständige Defizite handelt, oder ob sie nur als Folge visuell- räumlicher Wahrnehmungsstörungen aufzufassen sind. Der Versuch, die einzelnen Störungen räumlich- visueller Wahrnehmungsleistungen mit Hirnläsionen in Bezug zu setzen zeigte, dass die subjektive visuelle Vertikale fast immer kontralateral zur Läsionsseite verschoben ist, wobei unter den kortikalen Arealen am häufigsten die hintere Inselregion betroffen ist, die vermutlich den vestibulären Kortex darstellt (9,23,34,38,40,41,50,51,58,75,88, 92).

### **Die räumlich- konstruktive Störung**

Bei der räumlich- konstruktiven Störung handelt es sich um eine der häufigsten hirnorganisch bedingten neuropsychologischen Teilleistungsstörungen; sie manifestiert sich z.B. in Form eines falschen Zusammensetzens von Teilen einer Figur zu einer Gesamtfigur oder eines fehlerhaften freien Zeichnens bzw. Abzeichnens von Figuren. Diese früher auch als konstruktive Apraxie bezeichnete, meist nach rechtshemisphärischen Hirnfunktionsstörungen beobachtete Störung, äußert sich in erster Linie in Schwierigkeiten bei Abstandsschätzungen, bei der räumlichen Anordnung von Wörtern beim Lesen, beim Ablesen der Uhrzeit an der Analoguhr (Winkeleinschätzung) und beim Einhalten einer angemessenen räumlichen Distanz im Umgang mit anderen Menschen. Überdies werden häufig Buchstaben wie „b“ und „d“ vertauscht, betroffene Kinder malen ungern, können selbst einfache Objekte nicht nachzeichnen und haben Schwierigkeiten beim Basteln oder Lego- Spielen.

Sehr häufig findet sich dieses Syndrom, dem genetische Erkrankungen, Alkoholembryopathie, Hydrocephalus, Epilepsie, Schädel- Hirn- Trauma, Encephalopathien aufgrund von Intoxikationen, apoplektische Insulte oder auch das Tourette- Syndrom zugrunde liegen können, nach angeborenen oder in der frühen Kindheit erworbenen Hirnfunktionsstörungen. Auch Frühgeburtlichkeit hat sich als auslösender Faktor räumlich-konstruktiver Störungen erwiesen, die, wie sich gezeigt hat, mitunter auch mit Lese-Rechtschreibschwäche sowie Rechenstörung einhergehen (38,43,51,58,75).

### **Taktil- räumliche und akustisch- räumliche Störungen**

Zu taktil- räumlichen und akustisch- räumlichen Störungen gibt es kaum Untersuchungen, sie spielen jedoch bei der Interaktion sensomotorischer mit räumlichen Leistungen eine wichtige Rolle, etwa wenn es um die Position des eigenen Körpers oder einzelner Körperteile im Raum oder in Relation zu anderen Objekten geht, sowie bei der akustischen Lokalisation von Personen oder Fahrzeugen. Als wesentliche Leistungen in der taktilen Modalität sind die Unterscheidung der Achsenorientierung sowie die Positionsschätzung in der Horizontalebene untersucht worden und es wurde dabei sowohl an Normalpersonen wie auch an hirngeschädigten Patienten eine relative Dominanz der rechten Hemisphäre festgestellt; im Bereich der räumlich- konstruktiven Störungen ist in aktuelleren Studien keine Hemisphärenasymmetrie mehr festgestellt worden.

In der akustischen Modalität sind das Richtungshören und die akustische Halbierung zwischen zwei Schallquellen als räumlich- akustische Leistung genauer untersucht worden. Dabei zeigte sich, dass rechtshemisphärisch- posterior geschädigte Patienten bei beiden Aufgaben schlechter als alle anderen Gruppen hirngeschädigter Patienten abschneiden, und zwar unabhängig vom Vorliegen eines kontralateralen Neglects. Es fanden sich akustische Lokalisationsdefizite in beiden Raumhälften nach rechts- posteriorer Hirnschädigung, nicht nur in der kontraläsionalen, wie dies aufgrund eines Neglects zu erwarten wäre.

Ähnlich wie beim Neglect werden räumliche Störungen vom Patienten oft nicht bewußt erlebt und daher auch in der Anamnese nicht berichtet, was dafür spricht, dass Leistungen, die überwiegend innerhalb des dorsalen visuellen Projektionsgebietes erbracht werden, subjektiv nicht bewußt erlebt werden und nur kurzzeitig repräsentiert sind, so dass auch im Falle einer Schädigung dieser Areale keine subjektive Bewertung der eigenen Einschränkungen möglich ist.

Dies hat zur Folge, dass räumlich gestörte Patienten in den seltensten Fällen über ihre Probleme klagen, so dass der Therapeut auf fremdanamnestische Angaben und objektive Testdaten angewiesen ist. Zur Fremdanamnese eignen sich hierfür Hinweise aus den Bereichen Selbsthilfe, Neglect, Greifen, Entfernungsschätzung sowie Störungseinsicht.

Störungen der räumlichen Wahrnehmung können durch Orientierungstests, wie etwa dem Lesen einer Analoguhr ohne Ziffern, nachgewiesen werden. Eine eventuell zusätzlich bestehende konstruktive Apraxie mit Störung der räumlichen Gestaltung läßt sich beispielsweise prüfen, indem man den Patienten ein Haus aufzeichnen läßt (38,43,51,58,75).

### **5.3 Manifestationsformen räumlicher Wahrnehmungsstörungen bei Kindern**

Besteht eine räumliche Wahrnehmungsstörung, so kann es vorkommen, dass ein Kind, das einen Sehtest völlig normal bestanden hat, sich plötzlich an einem Möbelstück stößt oder eine Stufe auf der Treppe verfehlt, ohne dies zu erkennen; zwar sieht es sowohl das Möbelstück als auch die Treppe, aber es erkennt nicht ohne weiteres deren Beziehungen zu seinem Körper. Beim Überqueren einer Straße verfehlt es die Bordsteinkante und verstaucht sich den Knöchel, oder aber es läuft gegen die Bettkante, als ob es angenommen hätte, Fußboden und Bett befänden sich auf gleicher Höhe (7).

Wenn keine gute Verbindung zwischen den visuellen Areale in der Großhirnrinde und dem vestibulären System, sowie der Eigenwahrnehmung und den Berührungsempfindungen der Haut besteht, verschlechtert sich das optische Unterscheidungsvermögen gravierend. Aus diesem Grund haben Kinder mit einer ungenauen Körperwahrnehmung oft auch Schwierigkeiten mit ihrer visuellen Wahrnehmung; besteht das Hauptproblem in der Verarbeitung von Gleichgewichtsreizen, so werden oftmals auch schlechte Ergebnisse bei Untersuchungen des Sehvermögens erzielt.

Bestehen Schwierigkeiten beim Erkennen räumlicher Lagen, so verwechselt das Kind Buchstaben, die nicht durch Form-, sondern durch Lageänderung einen anderen Laut symbolisieren (b und d, p und q, M und W), oder es verdreht beim Schreiben oder Malen Buchstaben, Ziffern bzw. Formen in ihrer Raumlage. Eine Störung beim Herstellen räumlicher Beziehungen äußert sich beispielsweise darin, dass es nicht gelingt, Muster oder komplizierte Dinge nachzulegen oder zu -bauen oder Perlen nach einem vorgegebenen Muster aufzureihen. Des Weiteren hat das Kind Probleme, den Stellenwert eines Buchstabens im

Wort oder einer einzelnen Zahl innerhalb einer mehrstelligen Zahl zu erfassen und zu behalten, es schreibt dann z.B. 345 statt 354.

Allgemeine Raumorientierungsprobleme führen dazu, dass bei Kreisspielen das Kind den Platz, den es verlassen hat, nicht wieder findet, dass es Ortsangaben wie vor, neben, unter, links oder rechts nicht versteht, auf einem Arbeitsblatt die Orientierung verliert und nicht weiß, wo es beginnen soll. Selbst in bekannter Umgebung verläuft sich ein betroffenes Kind wiederholt, bestimmte Räume wie z.B. das Klassenzimmer findet es nicht wieder.

Ein Kleinkind mit einer Störung des Gleichgewichtssinns kann Schwierigkeiten dabei haben, ein Stück Papier mit einem anderen zusammenzukleben, weil sein Gehirn diese beiden Papierstücke im Raum nicht einander zuordnen kann. Ein älteres Kind mit ähnlichen Beschwerden ist vielleicht nicht in der Lage, die Buchstaben, die es schreibt, richtig anzuordnen.

Bestehen gravierendere Störungen, kann es vorkommen, dass ein Kind nicht mehr allein außerhalb des Hauses spielen will, da es sich selbst im eigenen Garten verloren vorkommt. Da sein Gehirn nicht die räumlichen Beziehungen zwischen Bäumen, Sträuchern und dem Haus sowie seinem eigenen Körper herzustellen vermag, fürchtet es, möglicherweise nicht mehr den Weg zurück ins Haus zu finden (6,7,43,82,83,99).

Von allen Beziehungen, denen ein menschliches Wesen unterworfen ist, stellt sein Verhältnis zum Schwerkraftfeld der Erde die elementarste dar; sie scheint noch grundlegender zu sein als die Mutter- Kind- Bindung, da die Schwerkraftsicherheit, das Vertrauen, fest mit der Erde verbunden zu sein und jederzeit einen sicheren Platz zum Stehen zu haben, das Fundament für zwischenmenschliche Beziehungen bildet.

Kinder mit Störungen im Gleichgewichtssystem fühlen sich, als ob sie im Raum verloren wären; da die Erde für sie keinen sicheren Ort darstellt, kann auch die liebevollste Zuwendung durch die Mutter oder andere Bezugspersonen ihnen nicht wirklich helfen. Aus Angst vor dem, was ihnen möglicherweise zustoßen könnte, folgen viele diese Kinder nicht ihrem inneren Drang, ihre Umwelt zu erforschen, wodurch ihnen ein großer Teil der sensomotorischen Erfahrungen entgeht, die die Grundlage für ein ausgereiftes Gefühlsleben und Verhalten darstellen.

Die Sicherheit im Umgang mit der Schwerkraft wird, obwohl sie eine so große Rolle spielt, meist als selbstverständlich hingenommen, läuft auf neurologischer Ebene in Verbindung mit der Schwerkraft jedoch etwas falsch, so können diese Probleme in vielen Fällen bis auf eine schlechte Verarbeitung von Gleichgewichtsreizen während des fetalen Lebens im Mutterleib und der Neugeborenenperiode zurückgeführt werden (6,7,18,82,88).

Durch Anpassungsreaktionen und die sich daraus entwickelnden Sinneswahrnehmungen lernt der Mensch, den Raum und seine körperlichen Beziehungen zu diesem wahrzunehmen; ohne die Raumwahrnehmung, die sich durch Körperschema und Schwerkraftempfindung formt, ist es schwer möglich, sich vom umgebenden Raum ein Bild zu machen. Daher ist eine betroffene Person außerstande, Wegbeschreibungen zu liefern, selbst wenn diese ihr bekannt sind. Unter Behandlung mit vestibulärer Stimulation verbessert sich daher auch die Raumwahrnehmung; betroffene Kinder lernen die Beziehungen zwischen ihrem Körper und dem Raum kennen, beginnen zu klettern oder ihre Umgebung zu erforschen (7,18,52,88).

Kinder mit einer räumlich- konstruktiven Störung zeigen deutliche Einschränkungen in der Fähigkeit zu ortsbezogenen Raumoperationen und haben Probleme beim Integrieren von einzelnen Elementen zu einem räumlichen Gebilde. Um raumanalytische Anforderungen bewältigen zu können, muß ein Kind Visualisierungsaufgaben beherrschen, das bedeutet, es muß in der Lage sein, zwei- oder dreidimensionale Bilder in der Vorstellung zu verändern, zu klappen oder zu drehen, was die Voraussetzung für das Erlernen des Lesens, der Grundrechenarten und später der Geometrie sowie des Schreibens bildet.

Das Erkennen, das Vergleichen mit der kognitiv gespeicherten Information und der Abruf einer bestimmten räumlichen Anordnung bilden den Prozeß des Visualisierens, der von Kindern mit einer räumlich- konstruktiven Störung nicht korrekt ausgeführt werden kann (43).

Eng verbunden mit der motorischen Entwicklung ist die Fähigkeit, das Schreiben zu lernen. Während sehr junge Kinder aus dem Oberarm heraus zeichnen, verlagert sich die Bewegungsführung im Vorschulalter in das Ellbogengelenk und den Unterarm. Neben der Koordination von Arm-, Hand- und Fingerbewegung als nötige Voraussetzung verlangt der Schreibvorgang auch eine visuomotorische Koordinationsleistung, was zur Folge hat, dass visuelle Wahrnehmungen mit motorischen Abläufen koordiniert werden.

Für Fähigkeiten wie Lesen, Schreiben und Rechnen ist eine gute Raumwahrnehmung erforderlich. Nicht nur, dass das Gehirn in der Lage sein muß, sehr unterschiedliche Empfindungen zu verarbeiten und sich an präzisen motorischen und geistigen Reaktionen zu beteiligen, auch das visuelle System muß zwischen den sehr geringen Abweichungen, die bei Buchstaben, Zahlen und Schriftzeichen bestehen, unterscheiden können. Soll die Hirnrinde den optischen Eindruck verarbeiten, so müssen die die Sprache verarbeitenden Hirnabschnitte mit den Arealen, die mit optischer Wahrnehmung und Gedächtnis in Verbindung stehen, zusammenwirken. Beim Schreiben muß das Gehirn darüberhinaus Finger- und Handempfindungen verarbeiten und sie gleichzeitig mit der Erinnerung vergleichen, in

welcher Haltung sich Finger und Hände beim Schreiben befinden. Um einen Stift richtig zu führen, müssen Muskelbahnung und -hemmung fein reguliert werden. Wenn ein Kind nicht gelernt hat, zu erkennen, wieviel Raum ihm zur Verfügung steht und wie es sich in diesem Raum orientieren kann, wird es ihm schwerfallen, sich mit seiner physikalischen Umwelt auseinanderzusetzen. Am deutlichsten wird diese Schwierigkeit sichtbar in der Art, wie es mit Buntstiften umgeht oder mit einem Federhalter schreibt, wie es einer Druckschriftlinie folgen kann, einen Ball wirft, oder wie es sein Zimmer in Ordnung hält.

Berücksichtigt das Gehirn nicht unentwegt Informationen von der Schwerkraft und den Körperbewegungen, so kann es diese Aufgaben nicht fehlerfrei erfüllen, weswegen Kinder mit Störungen des Gleichgewichtsorgans aufgrund zahlreicher ungeordneter sensomotorischer Muster im Gehirn sich mitunter nicht mehr erinnern können, was ein gedrucktes Wort bedeutet oder wie es geschrieben wird (6,7,18,82,83,88,99).

Damit Sprache sich entwickeln und auftreten kann, müssen die höheren und die niedrigeren Gehirnzentren konstant zusammenarbeiten. Sind die Gleichgewichtsinformationen in den niederen Zentren mangelhaft, so müssen die höher gelegenen Bereiche umso größere Anstrengungen unternehmen, um eine normale Sprache entwickeln zu können; vestibuläre Einwirkungen üben dabei einen bahrenden Effekt auf die Lautbildung aus.

Kinder mit Störungen der Sprache und des Sprechvermögens bei gleichzeitig bestehender Gleichgewichtsstörung haben zudem Schwierigkeiten mit der Körperbewegung und der Bewegungsplanung. Der Muskeltonus der meisten Kinder mit Störungen des Gleichgewichtsorgans ist schlaff, was zu einer Verringerung des Anteils an Tiefensensibilität der Muskulatur führt, der dem Nervensystem zurückgesandt wird (6,7,52).

Das Zeichnen ist zwar vor allem ein Ausdrucksmittel des frühen Schulalters, seine Anfänge reichen aber bis ins Vorschulalter. Das interessanteste Problem der frühen Kinderzeichnungen ist die Bewältigung der Dreidimensionalität des Raumes. Das Kind ist hier völlig naiv und erkennt gerade dort keine Probleme, wo sie in Wirklichkeit am größten sind. In der Analyse der kindlichen Raumdarstellung kommt man mit den topographischen Begriffen des Nebeneinander, Ineinander und Übereinander nicht ganz aus, obwohl sie zweifellos eine große Rolle spielen. Die kindliche Raumdarstellung ist eine Kombination von Aufriß- und Grundrißzeichnungen, hintereinanderliegendes wird in die Ebene umgeklappt oder übereinandergelagert.

Fordert man ein Kind mit gestörter Raumwahrnehmung dazu auf, sich selbst in einem Zimmer zu malen, so kann es vorkommen, dass es sich dabei an der Decke anstelle auf dem Boden zeichnet, weil es mangels einer intakten Körperwahrnehmung nicht gelernt hat, die

richtigen Beziehungen seines Körpers zum Raum herzustellen. Beim Spielen mit anderen Kindern kann es sein, dass die gestörte Raumwahrnehmung weniger offensichtlich zum Tragen kommt (7,82,88).

Wahrnehmungsstörungen führen zu Störungen des Handlungsmusters, da die betroffenen Kinder über andersartige Erfahrungen verfügen. Äußern kann sich dies z.B. in Lokalisationsproblemen. Hierbei fehlt das taktile Erkennen eines Gegenstandes; Muster können nicht unterschieden werden, die Bewegungen sind unharmonisch und hastig, der Blickkontakt fehlt, die taktil- kinästhetische Wahrnehmung ist vermindert, und es gelingt keine Kompensation durch die Sprache.

Auffälligkeiten bei der Verarbeitung von Funktionssignalen führen zu Störungen der Reihenfolge von Wahrnehmungsleistungen. Das Kind hat Probleme, wenn mehr als ein Sinnesbereich beansprucht wird; beispielsweise dreht es sich nicht um, wenn es gerufen wird, hat Schwierigkeiten bei der Nachahmung, beim Sprechen und beim selbständigen Gestalten.

Es entwickeln sich Veränderungen im problemlösenden Verhalten mit mangelnder Aktivität bei der Informationsgewinnung, bei der Hypothesenbildung, bei der Aufstellung von Folgerungen und beim Treffen von Entscheidungen, was bis zu autistischen Verhaltensweisen führen kann.

Schwere Sprachstörungen und andere komplexe Entwicklungsstörungen sind oft mit Störungen der Wahrnehmungsleistungen verbunden, woraus folgt, daß Verbesserungen auf dem einen auch zu Verbesserungen auf dem anderen Gebiet führen können. Vor allem bei sprachgestörten Kindern sind Zusammenhänge mit dem Wahrnehmen, Wiedererkennen, Planen und Ausführen ersichtlich, wobei meist die auditiven Leistungen schlechter als die visuellen sind (6,52,88).

Im Grundschulalter haben viele Kinder noch Probleme, räumliche Beziehungen zu erfassen, sind unsicher im Verstehen von Begriffen wie gegenüber, zwischen, davor und danach. Abgesehen von den Schwierigkeiten, die es dadurch in der Rechtschreibung geben kann, weil die Beziehung der Buchstaben untereinander und ihre Reihenfolge im Wort nicht erfaßt und behalten wird, kann sich dies auch auf das Sprachverständnis auswirken, was sich oft zeigt, wenn Geschichten nacherzählt werden sollen oder bei Inhaltsangaben, wobei es hierbei zwar mehr um zeitliche Beziehungen geht, aber auch berücksichtigt werden muß, dass Zeit und Raum untrennbar miteinander verbunden sind. Nicht umsonst spricht man ja auch von einem Zeitraum und einem Zeitpunkt. Wo Beziehungen wie „benachbart“, „getrennt“, „Reihenfolge“, „umgeben“ und „kontinuierlich“ nicht entwickelt sind, ergeben sich für das

Kind auch in anderen Bereichen Schwierigkeiten, die Reihenfolge von Ereignissen zu erfassen, z.B. in Bildgeschichten oder wo sonst serielle Leistungen erforderlich sind .

Schwächen im Erfassen räumlicher Beziehungen können sich auf den sprachlichen wie auf den mathematischen Bereich auswirken, da es sich beim mathematischen Denken um das Denken in Räumen handelt. Nicht nur die Geometrie, die Raumlehre, auch die Grundrechenarten erfordern räumliches Denken und Vorstellungsvermögen (64,82,83,88).

Wie sich zeigte, bestehen Korrelationen zwischen Störungen einiger Basisleistungen und Alltagsproblemen. So zeigen Patienten, die beim horizontalen Schreiben eine Tendenz aufweisen, nach oben oder unten abzudriften, Störungen der subjektiven visuellen Horizontalen; bei Patienten mit einer räumlichen Rechenstörung liegt häufig eine gestörte Positionsschätzung vor. Auch die visuelle oder visuomotorische Ataxie im Sinne eines Vorbeigreifens scheint meist auf einer Störung der Positions- bzw. Distanzschätzung zu beruhen. Die Hand greift dorthin, wo sich das Objekt zu befinden scheint, wenn auch nicht wirklich befindet. Im Alltag lassen sich Probleme etwa beim Ankleiden, beim Zeichnen oder beim Essen beobachten. So kann es beispielsweise vorkommen, dass das Messer verkehrt herum gehalten und versucht wird, mit der stumpfen Seite zu schneiden. Die Unfähigkeit, Abstände richtig einzuschätzen und die Mißachtung der rechten Winkel führen oft zu einem wilden Durcheinander im Zimmer des betroffenen Kindes (6,18,38,43,88).

#### **5.4 Auswirkungen auf den sozialen Bereich**

Zuweilen scheinen Kinder, die in der Wahrnehmung räumlicher Beziehungen beeinträchtigt sind, auch Probleme im sozialen Bereich zu haben; untersucht man beziehungsgestörte Kinder im Hinblick auf das Erfassen von Raumbeziehungen, so scheinen sich teilweise Zusammenhänge zu ergeben.

Eine vestibuläre Störung kann sich auch auf zwischenmenschliche Beziehungen und den sozialen Bereich allgemein auswirken. Für betroffene Personen ist es oft schwer zu erkennen, wie nahe sie an andere Leute herantreten, wodurch diese sich mitunter belästigt fühlen. Besonders in einer Menschenmenge fällt es ihnen schwer, zu erkennen, wo sich eine Person befindet, sie können des Öfteren nicht sicher abschätzen, wieviel Raum sie benötigen, um an einem anderen Menschen vorbeizugehen, so dass sie diesen anrempeln. Die unabsichtliche Handbewegung eines anderen spielenden Kindes kann beim räumlich- konstruktiv gestörten

Kind eine aggressive Reaktion hervorrufen, da kommunikative Signale nicht angemessen gedeutet werden.

Störungen im Bereich der Raum- Lage- Verarbeitung stehen häufig in enger Verbindung mit Störungen des Körperschemas, vor allem mit unausgeprägter Seitigkeit. Die Unsicherheit, an seinem Körper nicht eine Seite bevorzugt vor der anderen zum Gebrauch zu haben und keine sichere Übertragung auf den extrakorporalen Raum zustande zu bringen, kann sich in extremen Fällen bis hin zu emotionalen Störungen auswirken.

Für Kinder mit vestibulären Störungen ist es nicht ungewöhnlich, wenn sie beim Ballspielen in einer Mannschaft in die falsche Richtung laufen. Manche Kinder fürchten sich auch davor, in ein Schwimmbecken zu springen, weil sie nicht sicher sind, wie weit vom Wasser entfernt sie sich befinden.

Als Konsequenz der sich ergebenden Frustration verlieren viele Kinder an Selbstachtung und Selbstwertgefühl und können nur schwerlich Beziehungen zu anderen Kindern aufbauen, was zur Isolation führen kann. Dies zeigt, dass die betroffenen Kinder mitunter auch im Umgang mit ihren Mitmenschen in ihrer Lebensqualität beeinträchtigt sind und verdeutlicht wiederum, welche große Bedeutung einer frühzeitigen Diagnosestellung und Förderung zukommt (6,7,18,64,82,88,99).

## **6. Möglichkeiten der Wahrnehmungsförderung**

Störungen räumlicher Leistungen werden oftmals nur unzureichend untersucht und dementsprechend, trotz der immensen Bedeutung für den Rehabilitationserfolg, oft nicht spezifisch trainiert. So konnte nachgewiesen werden, dass das Maß der Selbständigkeit bei alltäglichen Tätigkeiten ganz erheblich von der Verbesserung gestörter räumlicher Leistungen abhängt. Dies veranschaulicht wiederum den hohen Stellenwert der Früherkennung von Wahrnehmungstörungen mit dem Ziel, eine gezielte Therapie in die Wege leiten zu können (6,43,99).

### **6.1 Früherkennung von Wahrnehmungsstörungen**

Für die Gründerin des Sankt Galler Zentrums für Wahrnehmungsstörung, Dr. Felicié Affolter, stellen das vestibuläre und propriozeptive System, der Tastsinn sowie die Wahrnehmung von Druck, Berührung und Vibration, also das taktile System, die Grundlage der Entwicklung der auditiven und visuellen Wahrnehmung dar. Dabei entwickelt sich gemäß ihrer Theorie die Integration der Wahrnehmungssysteme in drei Stufen:

#### **Intramodale Leistungen**

Auf der ersten Stufe kann das Kind zum Beispiel nur sehen oder nur hören, beiden Wahrnehmungssystemen zugleich Aufmerksamkeit zu schenken, überfordert es. Dies stellt die Stufe der intramodalen oder modalitätsspezifischen Leistungen dar.

## **Intermodale Leistungen**

Auf der nächsten Stufe können auch intermodale Leistungen erbracht werden, das heißt, zwei Wahrnehmungssysteme können gleichzeitig aktiviert werden. Als Beispiel wäre die Auge-Hand- Koordination anzuführen.

## **Seriale Leistungen**

Auf der dritten Stufe schließlich können seriale Leistungen erbracht werden. Auch andere Leistungen, die auf einem Zusammenspiel verschiedener Wahrnehmungssysteme beruhen, sind jetzt möglich, das Kind ist in der Lage, verschiedene Wahrnehmungen oder Aktivitäten hintereinander oder zeitgleich auszuführen.

Erst wenn die Wahrnehmungsentwicklung diese Stufe erreicht hat, können Integrationsprozesse höherer Art, wie die Spezialisierung der Hirnhälften, die Lateralitätsentwicklung oder das Lesen- und Schreibenlernen erfolgversprechend stattfinden. Folgende für den Erwerb von Schrift und Sprache entscheidenden Basisfunktionen sind beispielsweise bei Kindern mit Sprachbehinderung häufig gestört:

- auditive Wahrnehmung
- phonematische Diskrimination
- Wahrnehmungskonstanz (Laute wiedererkennen)
- auditiv- visuelle Koordination (Phonem eindeutig einem Graphen zuordnen)

Hieraus resultieren Schwierigkeiten bei der Lautanalyse und der Lautsynthese (3,4,88,99).

### **6.1.1 Früherkennung von Wahrnehmungsstörungen im visuellen Bereich**

Das Auge ist das höchstentwickelte Sinnesorgan des Menschen, etwa 80% aller Informationen werden über die Augen aufgenommen. Sind diese nur eingeschränkt funktionstüchtig, gehen viele Informationen verloren. Auf allen Altersstufen dominiert die

visuelle Wahrnehmung; vor allem dann, wenn sich die Informationen der Sinne in Konfliktsituationen widersprechen, wird zuerst die Information des visuellen Systems genutzt. Daran lässt sich ermessen, von welcher tragender Bedeutung die Sehleistung und die Entwicklung des Sehvermögens für ein Kind ist; leider läuft dieser Prozess jedoch nicht immer normal ab, sondern kann teilweise gestört sein. Umso wichtiger ist es, z.B. durch genaues Beobachten Sehstörungen frühzeitig zu erkennen und gezielt zu behandeln; nur rechtzeitiges Eingreifen verspricht zufriedenstellende Erfolge.

Einschränkungen im Bereich der visuellen Wahrnehmung wirken sich auf viele Lebensbereiche negativ aus. Sie führen bereits beim Erkennen von Graphemen zu Problemen, weshalb die Analyse komplexer Informationen nicht gelingt. Durch die Verwendung kleinster Verarbeitungseinheiten, wie z.B. von Einzelgraphemen, kann die Redundanz von Wortbildern unterstützt werden, jedoch gelingt dies nur, sofern das Kind keine Schwierigkeiten auf dem Gebiet der visuellen Segmentierung zeigt (99).

Die Arbeitsgruppe Optomotorik der Freiburger Universität unter der Leitung von Prof. Dr. B. Fischer entstand mit dem Ziel, die Funktionsweise des Gehirns genauer zu entschlüsseln. Indirekt erfolgt dies durch die Beobachtung der Augenbewegungen bei speziell ausgewählten Experimenten. Dabei werden weder die Sinnesorgane noch die Sprachverarbeitung untersucht, sondern die dazwischen stattfindende Signalverarbeitung im Gehirn auf dem Weg vom Sinnesorgan zu den höheren Hirnfunktionen. Als Gemeinsamkeit aller untersuchten Funktionen stellte sich heraus, dass ihre Entwicklung zum Zeitpunkt des Schuleintritts noch nicht abgeschlossen ist und von Kind zu Kind individuell sehr schwankt. Bei Kindern mit Schulschwierigkeiten finden sich häufig auch Entwicklungsrückstände.

Laut Arbeitsgruppe Optomotorik wird die Güte des statischen Sehens hauptsächlich durch die Sehschärfe bestimmt, eine entscheidende Rolle spielt aber auch, dass schnell genug gesehen werden kann, weil durch die ständig ausgeführten Sakkaden pro Sekunde 3-5 Bilder ins Gehirn gesendet werden.

Die Wahrnehmung schneller Prozesse (beispielsweise die Bewegungswahrnehmung) wird dynamisches Sehen genannt und kann mittlerweile auf einfache Weise geprüft werden. Dabei lässt sich ein Anstieg der Leistung etwa vom 7. bis zum 15. Lebensjahr erkennen, während der Zeitraum zwischen dem 15. und 35. Lebensjahr ein Plateau darstellt; bis zum 55. Lebensjahr erfolgt dann ein Abfall der Leistung. Im Falle einer Legasthenie bestehen in 40% aller Fälle Entwicklungsrückstände und es stellte sich überdies heraus, dass oft auch die sprachfreie Hörwahrnehmung gestört ist.

Dynamisches Sehen bedeutet eine Leistung des magnozellulären Systems, die bei Kindern noch nicht richtig entwickelt ist und schon relativ früh im Leben wieder nachlässt. Im Zusammenhang damit lässt sich auch ein relativer Verlust der Kontrolle über die Sakkaden beobachten. Es hat sich gezeigt, dass ein großer Prozentsatz von Kindern mit Dyslexie Schwierigkeiten bei der Wahrnehmung sich schnell verändernder Reize zeigt - in erster Linie eine Leistung des magnozellulären Systems (10,21,27,28,30,80,122).

Mitarbeiter des Blicklabors der Albert- Ludwigs- Universität Freiburg führten eine Studie zum Training der Simultanerfassung und des Rechnen- Lernens durch. Dafür wurden 21 rechenschwache Kinder im Alter von 8 und 9 Jahren, bei denen Entwicklungsrückstände in der Simultanerfassung festgestellt worden waren, in eine Trainingsgruppe und eine Wartegruppe eingeteilt. Beide Gruppen besuchten weiterhin den Schulunterricht, doch im Gegensatz zur Wartegruppe unterzog sich die Trainingsgruppe einem Programm zur Förderung der Simultanerfassung. 8 Wochen nach Ende des Trainings wurde ein Rechentest (DEMAT 2+), den beide Gruppen gleich im Anschluß an das Förderprogramm absolviert hatten, in einer zweiten Version wiederholt. Diejenigen Kinder, deren Simultanerfassungsvermögen trainiert worden war, konnten dabei ihre Leistungen im Mathe-Test deutlich (im Durchschnitt um 4 Punkte) steigern, während die Kinder aus der Wartegruppe im Mittel sogar schlechter abschnitten als vorher. Die 7 Besten gehörten zur Trainingsgruppe, die 5 Schlechtesten zur Wartegruppe. Was die übrigen Variablen betrifft, so konnten in beiden Gruppen weder eine Verbesserung noch signifikante Unterschiede festgestellt werden, was bedeutet, dass das Training die Lernprozesse spezifisch begünstigt und nicht durch Plazeboeffekte andere Variablen verbessert werden (29,122).

Der Sehsinn ist der bei der Geburt am wenigsten ausgereifte Sinn, da der Säugling noch nicht über genügend Erfahrungen verfügt, um das Gesehene sinnvoll einordnen zu können. Das visuelle System liefert Informationen über alles, was sich in der Struktur des umgebenden Lichts, über Dinge, Lebewesen, Bewegungen, Orte und Ereignisse ausdrückt. Insbesondere während der ersten beiden Lebensjahre entwickelt sich die Sehschärfe, die zur optimalen Aufnahme von Informationen entscheidend ist, rasant. Während ein sechs Monate altes Kind über ca. 30% der Sehschärfe eines Erwachsenen verfügt, beträgt die Sehschärfe eines einjährigen Kindes bereits 50%. Ab dem zweiten Lebensjahr schreitet die Sehschärfenentwicklung dann langsamer voran. Bleiben optische Fehler oder Schielen im Kleinkindalter unerkannt, so kann sich die Sehschärfe nicht normal entwickeln, da die Netzhaut und die Sehrinde des Gehirns nur unvollständig beansprucht werden.

Laut American Academy of Pediatrics ist der frühestmögliche Zeitpunkt für eine Prüfung der Sehfähigkeit im Alter von etwa 2 Jahren anhand von Bildkarten gegeben. Um jedes Auge einzeln gezielt zu untersuchen, wird das jeweils andere Auge abgedeckt, wobei das Kind geradeaus auf ein etwa 3 Meter entferntes Objekt blicken soll. Bei sehr kleinen Kindern empfiehlt sich die Verwendung eines farbigen und eventuell auch lärmenden Spielzeugs. Kinder, die bereits eine Brille haben, sollten auch getestet werden, während sie diese tragen (99,111,120).

Etwa 10% der Kleinkinder haben eine Sehschwäche, aber nur 1/50 bis 1/20 von ihnen fallen bei den frühen Vorsorgeuntersuchungen auf. Stellungsfehler der Augen (Strabismus) werden nur in 10% der Fälle erkannt. Zwar beinhalten die späteren Vorsorgeuntersuchungen U8 (3,5-4 Jahre) und U9 (5 Jahre) eine Funktionsprüfung der Augen, doch lässt sich in diesem Alter Versäumtes nur noch schwer nachholen. Das zu spät behandelte Auge bleibt lebenslang schwach-sichtig (amblyop), weder Brille noch Kontaktlinsen führen dann noch zum Erfolg. Mehr als 5% aller Kinder beginnen das erste Schuljahr mit einer Sehschwäche zumindest eines Auges. Betroffene Kinder sind nicht nur massiv unfallgefährdet, sondern auch später bei der Berufswahl eingeschränkt.

Ein erhöhtes Risiko für Schielen, Fehlsichtigkeit und/oder für erbliche Augenerkrankungen liegt z.B. bei Frühgeborenen, Kindern mit Entwicklungsrückstand, Geschwistern oder Kindern von Schielern oder stark Fehlsichtigen vor, sowie bei Kindern aus Familien mit bekannten erblichen Augenerkrankungen. Diese Kinder sollten bereits im Alter von 6 bis 12 Monaten dem Augenarzt vorgestellt werden. Aber auch unauffällige Kinder sollten zur frühzeitigen Entdeckung eines kleinwinkeligen Schielens, von optischen Brechungsfehlern und anderen Anomalien mit 24 bis 36 Monaten augenärztlich untersucht werden, denn besonders einseitige Fehler werden oft zu spät erkannt.

Sofort hellhörig werden sollten Eltern und Betreuer beispielsweise bei sichtbaren Auffälligkeiten der Augen, wie Hornhauttrübungen, Augenzittern, grau-weißlichen Pupillen, großen, lichtscheuen Augen oder bei Lidveränderungen wie Hängelidern, welche die Pupille verdecken (111).

Im Folgenden sollen einige Störungen im visuellen Bereich, auf die es während der kindlichen Entwicklung besonders zu achten gilt, sowie die entsprechenden Diagnosemöglichkeiten kurz erläutert werden:

### 6.1.1.1 Strabismus

#### Definition

Unter Schielen oder Strabismus versteht man die meist beständige oder aber wiederholt auftretende Fehlstellung eines oder beider Augen, einfach ausgedrückt schauen beide Augen nicht in die gleiche Richtung. Vom Schielen betroffen sind in Deutschland nach Aussage des Berufsverbandes der Augenärzte Deutschlands e.V. (BVA) vier Millionen Bürger, die dabei nicht nur unter der sichtbaren, kosmetisch störenden Abweichung leiden, sondern oft mehr noch unter den mit dem Schielen verbundenen Sehstörungen.



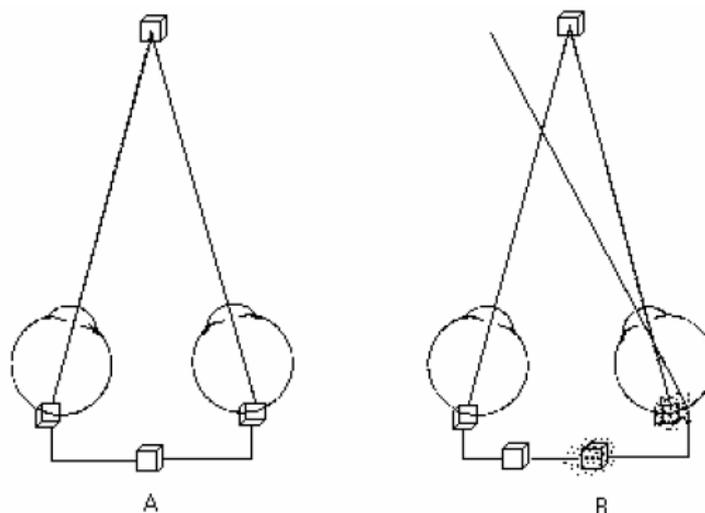
**Abbildung 5: Frühkindliches Schielen bei einem 10 Monate alten Kind**

Strabismus ist nicht nur ein harmloser oder gar niedlicher Schönheitsfehler (umgangssprachlich auch „Silberblick“ genannt), sondern oft mit einer schweren bleibenden Sehbehinderung verbunden. Je früher das Schielen im Leben eines Kindes auftritt und je später es vom Augenarzt behandelt werden kann, desto schwerer wird sowohl die Sehbehinderung als auch die Behandlung der Schiel- Schwachsichtigkeit. Bereits im Alter von drei Jahren sinken die Erfolgsaussichten der Behandlung erheblich, bei Eintritt des Schulalters lässt sich bei einer schielbedingten Schwachsichtigkeit trotz Behandlung in der Regel keine normale Sehschärfe mehr erreichen. Anhand dieser Fakten wird deutlich, dass schielende Babys und Kleinkinder einer möglichst frühzeitigen Behandlung bedürfen; je eher

die Therapie einsetzt, desto wirkungsvoller und weniger belastend ist sie für das Kind (23,85,111).

### Entstehungsmechanismen

Damit wir räumlich, also dreidimensional wahrnehmen können, müssen beide Augen auf dieselbe Stelle gerichtet sein. In beiden Augen entsteht dabei jeweils ein geringfügig unterschiedliches Bild. Die beiden Bilder werden im Gehirn zu einem einzigen gesamten Seheindruck verschmolzen, woraus das räumliche Sehen oder auch Tiefensehen resultiert. Beim Strabismus hingegen treffen die Sehachsen nicht auf dieselbe Stelle, so dass die Differenz der beiden Bilder, die die Augen liefern, zu groß wird, als dass sie im Gehirn richtig zur Deckung kommen und verschmolzen werden könnten; räumliche Wahrnehmung ist somit nicht möglich. Zudem entstehen störende Doppelbilder. Das kindliche Gehirn kann sich zwar, im Gegensatz zum Erwachsenen, der Doppelbilder erwehren, indem es das vom schielenden Auge übermittelte Bild unterdrückt, jedoch zieht dieser Mechanismus meist verhängnisvolle Konsequenzen nach sich: das nicht benutzte Auge wird nach einiger Zeit amblyop (84,111).



**Abbildung 6: Sehachsen bei beidäugigem Einfachsehen und bei Schielen**

**A: Ein von beiden Augen gemeinsam angesehener Würfel wird in beiden Augen umgekehrt und etwas unterschiedlich abgebildet. Im Gehirn werden die Bilder zu einer einzigen Wahrnehmung verschmolzen.**

**B: Bei einem Einwärtsschielen des rechten Auges sieht das rechte Auge links am Würfel vorbei. Das Bild des Würfels trifft auf unterschiedliche Netzhautstellen, was Doppelbilder auslöst. Kinder unterdrücken die Doppelbildwahrnehmung.**

## **Amblyopie**

Amblyopie wird die Schwachsichtigkeit eines organisch ansonsten gesunden Auges genannt. Ohne Behandlung entwickeln nahezu 90% aller schielenden Kinder eine einseitige Amblyopie. Wird diese Schielschwachsichtigkeit nicht rechtzeitig diagnostiziert und behandelt, bleibt sie lebenslang bestehen. Das betroffene Kind kann dann nie mehr lernen, richtig beidäugig oder gar dreidimensional zu sehen, was schwere Beeinträchtigungen im täglichen Leben mit sich bringt. Nicht nur, dass das Unfallrisiko erheblich ansteigt, auch bei der Berufswahl ist das Kind eingeschränkt, da Berufe wie beispielsweise Pilot, Polizist oder Berufsfahrer beidäugiges Sehen voraussetzen.

Bereits kurz nach der Geburt können Babys mit ihren Augen die Umwelt wahrnehmen, wenn auch zunächst noch undeutlich. Die Fähigkeit, Farben zu sehen, hell und dunkel zu unterscheiden und Bewegungen und Gesichter zu erkennen ist bereits sehr früh gegeben. Die Sehschärfe, die das Kind später zum Lesen benötigt, muß sich innerhalb eines begrenzten Zeitraumes durch ständiges unbewusstes Einüben erst entwickeln. Mit Schulbeginn ist dieser Lernprozeß der Augen praktisch abgeschlossen. In den ersten Lebenswochen kann ein Kind die Bewegungen der beiden Augen noch nicht richtig koordinieren. Da auch das Fixieren erst erlernt sein will, ist gelegentliches Schielen in diesem Alter kein Grund zur Beunruhigung. Wenn jedoch ein Auge ständig von der Richtung des anderen abweicht, muß eingegriffen werden, weil das schielende Auge wegen der sonst auftretenden Doppelbilder vom Gehirn „abgeschaltet“ und in Folge amblyop wird. Da sich die Sehschärfe hauptsächlich in den ersten beiden Lebensjahren entwickelt, ist dies auch der ideale Zeitpunkt, um mit der Therapie der Schiel- Schwachsichtigkeit zu beginnen (23,85,111).

## **Mikrostrabismus**

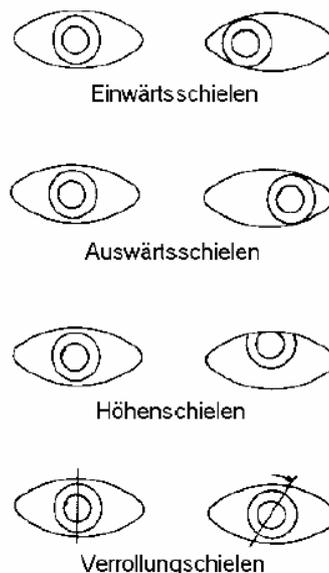
Die Abweichung des einen Auges von der Blickrichtung des anderen kann so gering sein, dass sie selbst aufmerksamen Eltern entgeht, man spricht vom Mikrostrabismus. Diese Form

birgt nichtsdestotrotz die Gefahr einer besonders ausgeprägten Einschränkung der Sehschärfe des schielenden Auges in sich, da der Mikrostrabismus aufgrund seines unauffälligen Erscheinungsbildes häufig zu spät erkannt und behandelt wird (111).

### Formen des Schielens

Oftmals ist es immer das gleiche Auge, welches schielt, weil es schlechter sieht und/oder weniger beweglich ist (monolaterales Schielen). Sind beide Augen gleichwertig, beobachtet man meist ein zwischen rechtem und linkem Auge wechselndes (alternierendes) Schielen.

Das schielende Auge kann in verschiedenen Richtungen vom nicht-schielenden Auge abweichen. Unterschieden werden Einwärtsschielen, Auswärtsschielen, Höhenschielen und Verrollungsschielen.



**Abbildung 7: Die unterschiedlichen Formen des Schielens**

Ist eine Fehlstellung permanent vorhanden, so spricht man vom manifesten Schielen, zu dem auch der bereits erwähnte Mikrostrabismus zählt, und zwar meist einseitig und nach innen gerichtet. Eine weitere Sonderform des manifesten Schielens ist das in der Regel nach außen gerichtete, nur phasenweise auftretende „intermittierende“ Schielen (111).

## **Heterophorie**

Weit verbreitet ist das latente Schielen, auch Heterophorie genannt. Es lässt sich bei über 70 % der Bevölkerung nachweisen, wenn das beidäugige Sehen etwa durch Abdecken eines Auges unterbunden wird. Eine Heterophorie verursacht in den meisten Fällen keine Beschwerden, kann aber zu Müdigkeit, Spannungsgefühl, Kopfschmerzen und Leseunlust führen. Ist die Heterophorie mit derartigen Beschwerden vergesellschaftet, wird sie auch als Pathophorie bezeichnet (111).

## **Strabismus concomitans und paralyticus**

Beim Strabismus concomitans (Begleitschielen) begleitet das schielende Auge das führende Auge in allen Blickrichtungen; der Schielwinkel ist in allen Richtungen annähernd gleich. Das Lähmungsschielen (Strabismus paralyticus) hingegen beruht auf der Lähmung eines oder mehrerer Augenmuskeln. Der Schielwinkel ist in den Blickrichtungen unterschiedlich und in Zugrichtung des paretischen Muskels am größten. Daher wird diese Art des Schielens auch Strabismus incomitans genannt (105).

## **Ursachen**

Die Tatsache, dass Strabismus in manchen Familien gehäuft auftritt, legt den Schluß nahe, dass eine erbliche Veranlagung besteht. Auch Risikofaktoren, die während Schwangerschaft oder Geburt auftreten, können Schielen bewirken. Oft sind die Ursachen im Auge selbst zu suchen, z.B. angeborene hohe und/oder seitenbezogen ungleiche Brechungsfehler, einseitige Linsentrübungen, selten auch Tumore im Auge oder Verletzungen. In manchen Fällen beginnen die Augen plötzlich zu schielen, etwa bei Kinderkrankheiten mit hohem Fieber, nach Unfällen wie Gehirnerschütterung, bei Linsentrübung, Netzhautablösung oder aber nach schweren seelischen Krisen. Kinder, die bislang beidäugig sehen konnten, nehmen dann kurzzeitig Doppelbilder wahr, bis das Gehirn lernt, diese zu unterdrücken (111).

## **Diagnostik**

Jedes plötzliche Schielen im Kindesalter bedarf einer umgehenden augenärztlich-orthoptischen Diagnostik, die auch über die Notwendigkeit einer kinderärztlich-neurologischen Abklärung entscheiden muß.

Vor allem, wenn ein Elternteil schielt oder wegen Schielens behandelt wurde, sollte das Kind schon im Alter von sechs bis zwölf Monaten dem Augenarzt vorgestellt werden. Häufig ist jedoch nur ein Familienmitglied betroffen und zwar Jungen und Mädchen gleichermaßen.

Kinder, die auffällig schielen, haben die besten Chancen, rechtzeitig entdeckt und behandelt zu werden, weil ihre Eltern schon aufgrund des deutlich sichtbaren Schönheitsfehlers rechtzeitig mit ihnen zum Augenarzt gehen, die kosmetisch wenig oder gar nicht beeinträchtigenden Formen des Strabismus sind jedoch (leider) in der Überzahl.

In beinahe der Hälfte der Fälle sind Amblyopien nicht durch Schielen, sondern durch eine einseitige und/oder hohe Fehlsichtigkeit bedingt. Sie fallen oftmals erst dann auf, wenn eine verlässliche Sehschärfenbestimmung möglich ist, etwa bei den Vorsorgeuntersuchungen U8 oder U9, oder gar erst beim Einschulungssehtest, wenn es für eine erfolgreiche Behandlung meist schon zu spät ist. Laut Berufsverband der Augenärzte Deutschlands e.V. leiden allein aus diesem Grund 4% der Bürger unter einer erheblichen einseitigen Schwachsichtigkeit.

Auf die Vorsorgeuntersuchungen U1 - U9 haben alle Kinder gesetzlichen Anspruch. Es ist aber erwiesen, dass selbst durch die Untersuchungen U1 - U7 nur 10% der Fehlsichtigkeiten und Stellungsfehler rechtzeitig, das heißt bis zum 24. Lebensmonat, aufgedeckt werden. Werden insbesondere sehr früh aufgetretene Amblyopien erst bei den Untersuchungen U8 oder U9, die für den Zeitraum vom 43. bis zum 48., bzw. vom 60. bis zum 64. Lebensmonat anberaumt sind und eine einseitige Sehprüfung beinhalten, erkannt, ist es für eine erfolgreiche Amblyopie- Behandlung meist zu spät.

Ein Grund dafür liegt darin, dass leider längst nicht alle Eltern das Angebot der Vorsorgeuntersuchungen wahrnehmen, darüber hinaus findet bislang keine Vorsorgeuntersuchung in der augenärztlichen Praxis statt, wo eine Amblyopie schon im Säuglings- und Kleinkindalter zu erfassen wäre.

Da es im Kleinkindalter leider noch keine eindeutigen Hinweise auf eine Schwachsichtigkeit welcher Genese auch immer gibt, sollten Eltern angehalten werden, die angebotenen

Vorsorgeuntersuchungen zu nutzen und ihr Kind darüber hinaus, selbst wenn es unauffällig erscheint, etwa im Alter von 2 Jahren augenärztlich- orthoptisch untersuchen zu lassen (111).

### **Therapie des Strabismus**

Die Therapie des Strabismus basiert auf der Versorgung mit Brillengläsern, um Brechungsfehler zu korrigieren, auf der Behandlung der Amblyopie, wozu das bessere Auge abgedeckt wird, um das schwächere gezielt zu fördern und auf der operativen Korrektur der äußeren Augenmuskeln. Letzteres ist etwa bei der Hälfte der betroffenen Kinder nötig und zwar dann, wenn der Schielwinkel so groß ist, dass keine beidäugige Zusammenarbeit erbracht werden kann.

Teilweise stellt die operative Stellungskorrektur die Voraussetzung für weitere Maßnahmen wie Schulungen oder die Abdeckbehandlung dar. In der Regel erfolgt die Operation erst dann, wenn das Kind die Brille verlässlich trägt, mit beiden Augen annähernd gleich gut sieht und bei der Untersuchung mitarbeitet.

Beim Augenarzt wird zunächst einmal die Ursache des Schielens ermittelt. Einwärtsschielen, das erst im zweiten Lebensjahr oder später auftritt, wird bei mehr als der Hälfte der Kinder durch nicht korrigierte Fehlsichtigkeit verursacht. Dabei handelt es sich normalerweise um eine stärker ausgeprägte Übersichtigkeit, auch Weitsichtigkeit genannt. Wird die Brille exakt angepasst, so kann in vielen Fällen das Schielen gebessert oder sogar behoben werden. Eine Brillenbehandlung ist bereits im ersten Lebensjahr möglich. In diesem Alter wird eine Brille oftmals auch noch besser akzeptiert als später in der Trotzphase.



**Abbildung 8: Kindgerechte, sehr gut sitzende Brille bei einem 12 Monate alten Kind**

Zur Vermeidung bzw. Therapie einer Amblyopie dient die Okklusionsbehandlung, bei der in einem bestimmten Rhythmus Pflaster über das nicht schielende Auge zum Zwecke der gezielten Förderung des schielenden Auges geklebt werden. Durch das Einhalten von Intervallen wird einer Schwachsichtigkeit des besseren Auges entgegengewirkt.



**Abbildung 9: Abklebebehandlung**

Führen die genannten Methoden nicht zum gewünschten Erfolg, etwa weil die Amblyopiebehandlung nicht rechtzeitig begonnen wurde, kann bisweilen auch eine gezielte,

zum Teil computergestützte Schulungsbehandlung durch Augenarzt oder Orthoptistin weiterhelfen. Die in der Orthoptik erlernten Übungen sollen auch zu Hause täglich durchgeführt werden.

Meist muß die Amblyopiebehandlung über Jahre, zusätzlich zur Brille und auch nach erfolgreicher Operation fortgesetzt werden; wird die Amblyopie erstmals beim älteren Kind oder Schulkind behandelt, ist in den meisten Fällen keine volle Sehschärfe mehr zu erreichen (85,111).

### **6.1.1.2 Astigmatismus**

Als Astigmatismus (griech. „Punktlosigkeit“) bezeichnet man zum einen in der Optik eine Art der Abbildungsfehler, bei der schräg eintretende Lichtbündel, die auf dem Bild als Punkt erscheinen sollten, zu (elliptischen) Lichtflächen verzerrt werden. Zum anderen wird in der Medizin unter Astigmatismus eine Erkrankung des Auges, auch Stabsichtigkeit genannt, verstanden.

Landläufig ist Astigmatismus (Zylinder) auch als Hornhautverkrümmung bekannt, die zumeist bei Kurzsichtigkeit auftritt. Man unterscheidet dabei zwischen dem meist angeborenen regulären Astigmatismus, bei dem die Hornhaut des Auges entweder stärker gekrümmt oder schwächer ist als normalerweise, und dem irregulären Astigmatismus, bei dem die Oberfläche der Hornhaut an mehreren Stellen erhöht und vertieft ist. Ursachen dafür können Operationen oder ein Unfall sein, die Narben entstehen lassen, aber auch inhomogene Trübungen der Linse bei einer Katarakterkrankung.

Eine Sonderform des irregulären Astigmatismus stellt der Keratokonus dar, bei dem es sich um eine Fehlbildung der Hornhaut handelt, die sich durch eine zunehmende kegelförmige Vorwölbung der Hornhautmitte äußert.

Der reguläre Astigmatismus ist in der Regel vererbt und verändert sich während des Lebens kaum. Ein vorübergehender Astigmatismus kann nach Glaukom- oder Kataraktoperationen durch die OP- bedingte Verziehung der Hornhaut auftreten. Astigmatismus ist zu verstehen als eine Brennpunktlosigkeit bzw. Stabsichtigkeit infolge nicht rotationssymmetrischer Brechkraft von Hornhaut oder Linse, was bedeutet, dass die Linsenoberfläche unterschiedliche Radien bzw. Krümmungen aufweist.

Im Brennpunkt treffen sich alle Strahlen, die die Linse passiert haben. Dahinter teilen sie sich wieder und bilden ein seitenverkehrtes und auf dem Kopf stehendes Bild auf der Netzhaut.

Beim Auftreten von Astigmatismus treffen sich die Strahlen nicht in einem, sondern in mehreren Brennpunkten, bedingt durch die unterschiedliche Krümmung der Linsenoberfläche. Es kann nur immer in einem Brennpunkt „scharf gestellt“ werden, wodurch das Bild insgesamt unscharf erscheint. Durch Zusammenkneifen der Augen (bei einer Kamera entspricht dies dem Abblenden) kann die Schärfentiefe und damit der Schärfebereich vergrößert werden. Gleichzeitig nimmt die Menge des durchgelassenen Lichtes ab, das Bild wird dunkler. Den Astigmatismus kann der Augenarzt diagnostizieren und seinen Ausprägungsgrad quantitativ genau messen.

Die unterschiedlichen Brennweiten der Linse beim regulären Astigmatismus werden durch eine Brille mit speziell geschliffenen Zylindergläsern oder auch durch entsprechende Kontaktlinsen korrigiert. Ein irregulärer Hornhautastigmatismus kann nicht durch eine Brille korrigiert werden, ist die Hornhautmitte frei von Narben, können harte Kontaktlinsen eine deutliche Sehverbesserung erzielen. Andernfalls muß eine Hornhautverpflanzung (Keratoplastik) erwogen werden; prinzipiell ist auch eine Behandlung durch Laser oder Operation beim Astigmatismus möglich.

Wichtig ist die rechtzeitige Erkennung und Behandlung des Astigmatismus bereits in der frühen Kindheit, um einer Schwachsichtigkeit vorzubeugen. Daher sollten vor allem auch selbst betroffene Eltern schon früh die Augen ihrer Kinder beim Ophthalmologen speziell dahingehend untersuchen lassen, denn Astigmatismus kann bei Kindern auch einen Grund für Schulprobleme darstellen, wird aber leider bei augenärztlichen Routineuntersuchungen meist nicht erfasst (23,100,101,102).

### **6.1.1.3 Isokorie**

Unter Isokorie wird eine Pupillenstarre verstanden, bei der eine oder beide Pupillen nicht mehr durch Verengung bzw. Weitstellung auf die veränderten Lichtverhältnisse z.B. bei Tag und Nacht reagieren. Die gleichbleibende Größe der Pupillen führt bei Pupillenweitstellung zu erhöhter Blendempfindlichkeit bzw. bei dauerhafter Engstellung zu Gesichtsfeldbeeinträchtigungen. Ursache dafür können afferente, supranukleäre und andere Störungen, aber auch Vergiftungen, Pilze, Drogen, Krankheiten wie Meningitis oder Enzephalitis, Tumoren oder ein Trauma sein (103,104).

#### **6.1.1.4 Visuell evozierte Potentiale**

Bei einer Untersuchung mittels visuell evozierter Potentiale wird wiederholt ein bestimmter Reiz gesetzt. Auf dem Kopf oder an der Wirbelsäule wird dann über einem definierten Punkt die elektrische Reaktion des Gehirns oder Rückenmarks auf diesen Reiz abgeleitet und von den anderen elektrischen Aktivitäten des Gehirns isoliert. Dazu wird die Elektrode am Kopf exakt über dem Hirnareal platziert, in dem diese Reize wahrgenommen und verarbeitet werden können, wodurch es möglich wird, auf einfache Art Verletzungen und Unterbrechungen der neuronalen Leitungsbahnen zu erkennen.

Evozierte Potentiale sind, verglichen mit dem Spontan- EEG, niedrigamplitudige Signale. Um sie abzuleiten, müssen die Reize wiederholt dargeboten werden, um aus dem Rauschen der anderen Signale herausgefiltert werden zu können.

Zur Erzeugung visuell evozierter Potentiale sieht sich der Patient ein auf einem Bildschirm dargebotenes Schachbrettmuster an, wobei Signale von den Nervenzellen in der Netzhaut über das Mittelhirn zur Sehrinde im Großhirn gelangen, welche Nervenzellen aktivieren, die an der Erkennung von Mustern beteiligt sind. Sie erzeugen schwache Reaktionspotentiale, die sich mit Elektroden, die im Bereich der Sehrinde auf der Kopfhaut befestigt sind, ableiten lassen. Über der Sehrinde am Hinterkopf wird das Potential abgeleitet. Die Darbietung des Bildes wird mit wechselndem Kontrast in so großen zeitlichen Abständen wiederholt, dass das Gehirn zwischendurch immer wieder zur Ruhe kommen kann. Auf jedes der Signale reagiert das Gehirn mit einem neuen Reaktionspotential. Ein Messgerät registriert die Spannungsänderungen, speichert und überlagert die gemessenen Kurven mit Hilfe eines Computers, so dass das Reaktionspotential schließlich sichtbar wird.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass ein Fourier- Analysator eingesetzt wird, der nur diejenigen Potentialänderungen aufzeichnet, die dieselbe Frequenz haben wie das Signal oder ein ganzzahliges Vielfaches dieser Frequenzen. Auch mit dieser Methode lässt sich das evozierte kleine Potential aus dem Rauschen herausmitteln.

Auf die genannte Weise können z.B. Entzündungen des Sehnerven, wie sie, oft auch unbemerkt, bei manchen entzündlichen oder degenerativen Hirnerkrankungen vorkommen, diagnostiziert werden.

#### **Somatosensorisch evozierte Potentiale**

Als eine Erweiterung der sensiblen Neurographie in das zentrale Nervensystem hinein kann die Untersuchung der somatosensorisch evozierten Potentiale (SEP) nach Milnik und Emmert aufgefaßt werden. Ein peripherer Nerv wird dabei elektrisch stimuliert, wodurch Aktionspotentiale ausgelöst werden, die afferent über Nervenhauptstamm, Plexus, Hinterwurzeln, Rückenmark (Hinterstränge), Hirnstamm und Thalamus zum postzentralen Kortex weitergeleitet werden. Mittels Elektroden, die auf der Körperoberfläche entlang der Afferenz lokalisiert sind, lässt sich das evozierte Nervensignal von peripher nach zentral verfolgen.

SEP- Untersuchungen sind hilfreich bei der Lokalisationsdiagnostik von Erkrankungsprozessen im Bereich der sensiblen Nervenbahnen, von den Hintersträngen bis zum parietalen Kortex. Hierbei werden sämtliche Schädigungen in diesem Bereich berührt, im Wesentlichen entzündliche Erkrankungen, Rückenmarkskompressionen oder Raumforderungen, wie auch die zervikale Myelopathie. Es werden somatosensible Nervenfasern gereizt, in ihrer Rückenmarksleitung verfolgt und schließlich die Reizantwortpotentiale über den entsprechenden kortikalen Repräsentationsfeldern abgeleitet (5,60,110).

### **6.1.2 Früherkennung von Wahrnehmungsstörungen im auditiven Bereich**

Zu den einzelnen Bereichen der auditiven Wahrnehmung zählen die auditive Aufmerksamkeit, also die Fähigkeit, sich auf auditive Reize konzentrieren und einstellen zu können, die auditive Figur- Grund- Wahrnehmung, das heißt, die Fähigkeit, wichtige von unwichtigen Reizen im Hintergrund herauslösen zu können, die auditive Lokalisation, die es ermöglicht, eine Geräuschquelle räumlich einzuordnen, des weiteren die auditive Diskrimination, die Unterschiede bzw. Ähnlichkeiten zwischen auditiven Sinnesreizen zu erkennen und einzuordnen vermag, die auditive Merkfähigkeit, also die Fähigkeit, Gehörtes speichern und auch wieder abrufen zu können, und schließlich auch das Verstehen des Sinnbezugs, welches besagt, dass Gehörtes verstanden und inhaltlich zugeordnet werden kann.

Es genügt nicht, verschiedene Töne wahrzunehmen, sie müssen auch unterschieden und interpretiert werden können. Die Voraussetzungen hierfür werden durch noch sprachfreie

Hörverarbeitungsprozesse im Gehirn geschaffen, die mittels der Prüfung der auditiven Unterscheidungsfähigkeit beurteilt werden können. Genaues Hören ist nicht nur wichtig zum Verstehen der gesprochenen Sprache, sondern oftmals liefert das Hören auch wichtige Hinweise auf die korrekte Rechtschreibung.

Gutes Hören erfordert mehr als nur gesunde Ohren. Gehörtes wird vom Gehirn auf viele verschiedene Aspekte hin untersucht, deren Funktion mit einfachen Tests getrennt geprüft werden kann. Einige dieser Tests wurden von der Arbeitsgruppe Optomotorik der Universität Freiburg in Zusammenarbeit mit der Klinik für Phoniatrie und Pädaudiologie der Medizinischen Hochschule Hannover unter Leitung von Herrn Prof. Ptok entwickelt.

Wie auch das Sehen und die Blicksteuerung durchläuft die auditive Differenzierungsfähigkeit eine lang anhaltende Altersentwicklung, die bis ins Erwachsenenalter hinein reicht. Dies bedeutet, dass während der gesamten Schulzeit nicht die Leistungen eines Erwachsenen erzielt werden. Entwicklungsrückstände lassen sich häufig in der Gruppe der legasthenischen Kinder feststellen, doch wie andere Hirnfunktionen auch lässt sich die auditive Differenzierungsfähigkeit durch gezieltes tägliches Üben verbessern (30,80,81,122,124).

Unter auditiver Wahrnehmung versteht man die Fähigkeit, Hörphänomene jeglicher Art differenziert wahrzunehmen, sich vorzustellen, erlebnismäßig- emotional zu erfassen, zu verbalisieren und/oder selbst zu produzieren. Nicht immer aber nimmt deren Entwicklung ihren normalen Verlauf. Defiziten können Defekte des Sinnesapparates oder des Gehirns zugrunde liegen, aber auch umweltbedingte Ursachen wie mangelnde sprachliche Anreize oder soziale Kontakte, außerdem eine verzögerte Entwicklung, psychische Ursachen wie Neurosen oder Konzentrationsschwierigkeiten und auch andere Ursachen, wie z.B. eine Erkältung. Betroffen sein können das äußere Ohr (z.B. durch Wachs oder andere Blockaden), das Mittelohr (z.B. durch eine Infektion oder Flüssigkeit), das Innenohr (Cochlea), der Hörnerv und das Hörzentrum im Gehirn (56,99,120).

Wie die American Academy of Pediatrics betont, glauben viele Eltern, sie wären imstande, eine Hörbehinderung ihres Babys selbst festzustellen, dies trifft jedoch in den meisten Fällen nicht zu. Bei 2 von 1000 Kindern liegt in unseren Breiten eine schwere frühkindliche Hörstörung vor, mehr als die Hälfte der betroffenen Kinder wird aber erst nach dem 2. Lebensjahr auch erfasst. Nach einer Statistik der Audiopädagogen der deutschen Schweiz wurden 1998 die von schweren Hörstörungen betroffenen Kinder (20 bis 30 pro Jahr) nicht früher erfasst als 1992. Dabei ist gerade eine frühzeitige audiopädagogische Betreuung und die rechtzeitige Versorgung mit Hörapparaten von entscheidender Bedeutung für eine ungestörte Entwicklung der Kommunikation mit der Umwelt. Ziel der audiologischen

Früherfassung ist es daher, Kinder mit Hörschäden bereits im zweiten Lebenshalbjahr mit Hörapparaten versorgt zu haben (107,120).

In Forschung und therapeutischer Praxis hat sich erwiesen, dass die Schnelligkeit der Hörwahrnehmung eine wesentliche Voraussetzung für die korrekte Unterscheidung von Lauten darstellt, die beim Sprechen nur sehr kurz anklingen. Gerade aber in diesem für sie so bedeutenden Bereich weisen beispielsweise Legastheniker eine verlangsamte Wahrnehmung auf und sind aus diesem Grund nur schwer in der Lage, Laute wie d und t, b und p, g und k und andere ähnlich klingende Laute richtig zu unterscheiden. Daraus resultiert zwangsläufig auch eine falsche Schreibweise (30,115).

Zur Diagnostik von Hörschädigungen stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, von denen einige im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen. Sie lassen sich unterteilen in objektive und subjektive Verfahren, wobei die objektiven Verfahren unabhängig sind von der Kooperation des Kindes, da dieses passiv bleibt und das Testergebnis nicht beeinflussen kann. Subjektive Verfahren dagegen sind angewiesen auf die Mitarbeit der Testperson, häufig geht es dabei um das Verhalten des Kindes. Das Testergebnis wird durch die Kooperationsbereitschaft des Kindes bestimmt, wird also auch stark durch andere Faktoren als das Hören mitbeeinflusst.

Objektive Verfahren, zu denen unter anderem die Otoskopie, die Tympanometrie, die otoakustischen Emissionen (OAE), die Elektro- Cochleographie sowie die Brainstem Electric Response Audiometry (BERA) zählen, testen in der Regel das Hören nur auf der Detektionsebene, etwa ob die Schallwahrnehmung intakt ist oder nicht (11,61,107).

#### **6.1.2.1 Otoskopie**

Mittels der Otoskopie ist eine optische Untersuchung des äußeren Gehörgangs und des Trommelfells in Hinblick auf Fremdkörper oder Entzündungen im Gehörgang, Rötungen des Gehörgangs oder des Trommelfells, Veränderungen des Trommelfells durch eine otitis media, Verletzungen des Trommelfells, ein eingezogenes oder vorgewölbtes Trommelfell, Flüssigkeitsansammlungen hinter dem Trommelfell oder eine chronische Mittelohrentzündung schon beim Neugeborenen möglich (11,61,107).

#### **6.1.2.2 Tympanometrie**

Die Tympanometrie misst die Beweglichkeit des Trommelfells. Mit Hilfe der Impedanzmessung wird die Schwingungsfähigkeit des Trommelfells bestimmt. Der Impedanzwert, der aus einem dauerhaften Schallreiz resultiert, wird durch die Messung des reflektierten Schalls festgestellt. Das Ergebnis wird in einer Kurve, dem Tympanogramm dargestellt. Die Beweglichkeit des Trommelfells und damit auch die Höhe des Widerstandes hängt vom Mittelohr ab, d.h. vom Druck und von der Beweglichkeit der Gehörknöchelchen. Je nach Widerstand wird mehr oder weniger Schall durch das Trommelfell reflektiert.

Die Beweglichkeit des Trommelfells kann beispielsweise beeinträchtigt werden durch Tubenkatarrh, Paukenhöhlenerguss, Unterbrechung der Gehörknöchelchenkette oder eine pathologisch eingeschränkte Beweglichkeit des Trommelfells. Eine Beeinträchtigung der Beweglichkeit des Trommelfells kann eine Schalleitungsstörung von bis zu 30 dB zur Folge haben.

Bei der Tympanometrie handelt es sich nicht um eine Messung, die ein Ergebnis liefert bezüglich des genauen Hörverlusts, sondern vielmehr um eine Indikationsstellung. Sie beansprucht nur 4-5 Sekunden und kann bereits beim Neugeborenen durchgeführt werden (11,61,107,108).

### **6.1.2.3 Otoakustische Emissionen**

Zur Messung der otoakustischen Emissionen, die 1978 entdeckt wurden, existieren verschiedene Formen:

- SOAE: Spontane otoakustische Emissionen
- TEOAE: Transient evozierte otoakustische Emissionen
- DPOAE: Distorsions Produkte otoakustische Emissionen  
(frequenzspezifische Messung)

TEOAE werden ausgelöst durch einen nicht frequenzspezifischen „Klick“, der nur im Bereich von 1000 und 3000/4000 Hz erzeugt werden kann. Bei akustischer Stimulation eines

normalhörenden Ohres ist im Gehörgang ein leises Echo messbar, bei dem es sich nicht um eine passive Schallreflexion, sondern um eine aktive Schallaussendung aus dem Innenohr handelt. Erzeugt werden die otoakustischen Emissionen dadurch, dass die empfindlichen äußeren Haarzellen den Schall verstärken, der von den inneren Haarzellen wahrgenommen wird. Diese Verstärkung wird in den Gehörgang zurückgeführt und als otoakustische Emissionen gemessen, allerdings nur sofern die Schalleitung bis zu den äußeren Haarzellen intakt ist. Liegt ein peripherer Hörverlust von mehr als 35dB vor, so können keine otoakustischen Emissionen mehr nachgewiesen werden.

Mittels TEOAE ist keine genaue Ermittlung der Hörschwelle möglich, mit Hilfe der DPOAE ist dies mit mehr oder weniger befriedigendem Erfolg durchführbar.

Das Verfahren der Messung von otoakustischen Emissionen ist bei Neugeborenen als Screeningverfahren anwendbar (11,61,107,108).

#### **6.1.2.4 Elektro- Cochleographie**

Bei der Elektro- Cochleographie handelt es sich um eine Untersuchung, in deren Rahmen die Funktion der Cochlea zuerst elektrisch gemessen und dann graphisch dargestellt wird. Dabei wird eine Elektrode durch das Trommelfell an die Schneckenwand, das Promotorium, geführt. Dieses Vorgehen erfordert bei Kindern eine Sedierung, wenn nicht sogar eine Narkose. Als angebotener Schallreiz fungiert ein Klickgeräusch im Frequenzbereich von 1-3 kHz, der 1000 Mal dargeboten wird. Die Messungen werden summiert, wodurch Störsignale ausgefiltert werden können. Gemessen werden die Aktivität aller Haarzellen und die Primärübertragung. Die Elektro- Cochleographie ist durchführbar bis zu einem Hörverlust von 90-100 dB, der maximalen Intensität, mit der durch Klick- Reize stimuliert werden kann; zur Anwendung kommt sie jedoch nur in seltenen Ausnahmefällen zur differentiellen Diagnostik, etwa beim Verdacht auf einen Hirnstammtumor (11,61,107).

#### **6.1.2.5 Brainstem Electric Response Audiometry (BERA)**

Hierbei handelt es sich um akustisch evozierte Hirnstammpotentiale. Diese Form der Hirnstammaudiometrie, bei der Hirnstammpotentiale im Schlaf auf akustische Reize abgeleitet und die Reizantworten gemessen werden, findet bereits seit 15 Jahren Anwendung.

Ein Klick wird 1000 Mal dargeboten, die Messungen werden summiert und Störsignale dadurch ausgefiltert. Die Ableitung der Hirnstammpotentiale erfolgt über Hautelektroden am Vertex- und Nackenansatz, sowie eine Erdelektrode an der Wange. Diese Messung, die etwa 5-10 Minuten dauert, ist anwendbar für ein Screening bis 40 dB und bei der Diagnostik bis zu einem Hörverlust von 90-100 dB. Der Frequenzbereich beschränkt sich auf 1-3 kHz, da Klicks nur in diesem Frequenzbereich erzeugt werden können. Für den Fall, dass keine Hirnstammpotentiale festgestellt werden können, rechtfertigt dies nicht den Schluß auf eine Gehörlosigkeit, da lediglich ein Hörverlust von 80-90 dB im Bereich von 1-3 kHz diagnostiziert werden kann. Die Dauer eines Klick- Reizes beträgt 2-3 ms, das Gehör benötigt jedoch 200- 400 ms, um die maximale Lautstärke aufzubauen. Die maximale Intensität, mit der durch Klicks stimuliert werden kann, liegt bei 90-100 dB.

Das Screeningverfahren ist schon bei Neugeborenen anwendbar und durch eine hochgradige Sensitivität und Spezifität gekennzeichnet, jedoch muß berücksichtigt werden, dass die gemessenen Potentiale einem Reifungsprozess unterliegen (11,61,107,108).

#### **6.1.2.6 Positronen- Emissions- Tomographie (PET)**

Die Positronen- Emissions- Tomographie bezeichnet ein nuklearmedizinisches Verfahren, mit dem Stoffwechselprozesse des Körpers auf molekularer Ebene in einer Untersuchung erforscht und in ihrer räumlichen Verteilung sichtbar gemacht werden können. Da mit Diagnoseverfahren wie Röntgen, Ultraschall, Computer- und Kernspintomographie raumfordernde Prozesse erst ab einer Größe von etwa 1 cm als krankhaft erkannt werden können, besteht ein Bedarf an Methoden, die bereits bei geringerer Tumorgöße, z.B. bezüglich Gut- oder Bösartigkeit, eine Aussagekraft besitzen, weshalb der PET in Zukunft eine stetig wachsende Bedeutung bei der frühzeitigen Erkennung bösartiger Erkrankungen zukommen wird.

Dies spielt eine tragende Rolle bei der Erfassung frühkindlicher Hörstörungen, da diese ebenfalls durch cerebrale Tumoren bedingt sein können. Die Positronen- Emissions- Tomographie eignet sich natürlich nicht nur zur Diagnose von Ursachen einer Wahrnehmungsstörung im auditiven, sondern auch im visuellen Bereich.

Durch die frühestmögliche Diagnose einer Tumorerkrankung sinkt zudem das Risiko auf eine Metastasierung, die unter anderen Verfahren bei Diagnosestellung oft bereits erfolgt ist und die Prognose des Patienten meist drastisch verschlechtert.

Da die PET nicht das Ausmaß einer Gewebsveränderung misst, sondern deren Stoffwechselaktivität, die bei bösartigen Tumoren fast immer gegenüber gesundem Gewebe erhöht ist, bietet sich hier eine Ergänzung und unter Umständen auch Alternative zur Frühdiagnose und zum Ausbreitungsverhalten mancher Krebsarten an. Ergänzt werden muß an dieser Stelle jedoch, dass auch entzündete, verletzte und in Abheilung begriffene Gewebe eine erhöhte Stoffwechselaktivität aufweisen, woraus sich das Problem einer genauen Tumordiagnose mittels PET stellen kann. Als Screening- Verfahren, ob überhaupt ein Krebsleiden vorliegt, wenn noch keine anderen Hinweise darauf vorhanden sind, ist die PET derzeit daher ungeeignet.

Nicht nur auf dem Gebiet der Onkologie, auch in der Hirnforschung brachte die PET bereits viele neue Erkenntnisse, etwa bezüglich Erkrankungen wie Morbus Alzheimer, Parkinson, Chorea Huntington, Epilepsie oder in Hinblick auf Hirntumoren.

Der Fachbereich der Kardiologie profitiert vor allem auf dem Sektor der koronaren Herzerkrankung und des Myokardinfarktes von den neuen Erkenntnissen; mittels PET kann nicht nur der koronare Blutfluss gemessen, sondern auch die Stoffwechselaktivität des Myokards beschrieben werden.

Bei der Untersuchung wird dem Patienten über einen intravenösen Zugang radioaktiv markierter Traubenzucker injiziert und, sobald sich die Substanz ausreichend im Körper verteilt hat, die Untersuchung im PET- Scanner gestartet, welche zwischen einer halben und zwei Stunden betragen kann (109).

## **6.2 Testverfahren**

Das folgende Kapitel soll einen kurzen Überblick über gebräuchliche Testverfahren aus dem psychologischen und psychomotorischen Bereich, sowie zur Intelligenztestung bei Kindern und Jugendlichen vermitteln.

### **6.2.1 Psychologische Testverfahren**

Frühförderung stellt eine besondere Hilfe für Kinder dar, die in ihrer Entwicklung gefährdet sind. Eine Entwicklungsdiagnostik mit einem normierten psychologischen Testverfahren ist daher wie die ärztliche Diagnostik obligatorischer Teil der Diagnostik in der Frühförderung.

Psychologische Tests, die bestimmte Gütekriterien erfüllen, erlauben es, eine Aussage darüber zu treffen, ob ein Kind mit seiner Entwicklung innerhalb der normalen Schwankungsbreite liegt, oder ob es in einzelnen oder mehreren Bereichen erheblich von den alterstypischen Fähigkeiten abweicht, eine Frage, von deren Beantwortung viel für das Kind und seine Familie abhängt.

Um die Entwicklung zuverlässig beurteilen und Prognosen stellen zu können, sollten Verfahren verwendet werden, die den etablierten Standards psychologischer Testdiagnostik genügen. Folgende in der Frühförderung gebräuchliche Testverfahren dienen diesem Normvergleich und genügen laut Arbeitsstelle Frühförderung Bayern strengeren Testgütekriterien:

- **Bayley Scales of Infant Development II (BSID- II, Bayley 1993)**

Die Bayley- Skalen sind für das erste Lebensjahr derzeit konkurrenzlos in der Einschätzung der Entwicklung. Leider sind sie nur in der amerikanischen Originalfassung erhältlich und werden wohl auch aus diesem Grund in der Frühförderung kaum verwendet; zudem bilden sie nur die kognitive und motorische Entwicklung ab, der ebenso wesentlichen Dimension der sozial- emotionalen bzw. Bindungsentwicklung wird keine Rechnung getragen.

Eine entwicklungsneurologische Diagnostik durch den Kinderarzt in Kombination mit geschulter Beobachtung der Verhaltenszustände und des Verhaltens dürfte auf dieser ganz frühen Altersstufe im ersten Lebensjahr grundsätzlich die praktikablere Variante gegenüber einem standardisierten Verfahren sein.

- **Snijders- Oomen Nonverbaler Intelligenztest- Revised 2 ½ -- 7 (Son- R 2 ½ -- 7, Tellegen u.a. 1996)**

Ein methodisch solider Intelligenztest, der durch die Möglichkeit der sprachfreien Darbietung auch für sprachentwicklungsverzögerte, hörgeschädigte und ausländische Kinder geeignet ist.

- **Münchener Funktionelle Entwicklungsdiagnostik (MFED, Köhler & Egelkraut 1984)**

Obwohl die Normierung dieses Testverfahrens bereits an die 20 Jahre zählt, handelt es sich bei der MFED um die am weitesten verbreitete allgemeine Entwicklungsdiagnostik, die nach wie vor eine realistische Einschätzung des Entwicklungsstandes und eine aussagekräftige Entwicklungsprognose liefert.

- **Wiener Entwicklungstest (WET, Kastner & Deimann 1998)**

Der neu normierte und jetzt auch für Deutschland repräsentative WET stellt ein inhaltlich nur teilweise neues, testtheoretisch sorgfältig konstruiertes Verfahren mit zeitgemäßen Referenzwerten dar, das in vielen Bereichen dem HAWIK ähnelt. Bessere Dienste als auf dem Gebiet der Förderplanung leistet der WET für die Prognose der Schullaufbahn.

- **Sprachentwicklungstest für zweijährige Kinder (SET- K 2, Grimm 2000)**

Für die frühe Diagnostik der Sprachentwicklung, die sich in den ersten Lebensjahren in engem Zusammenhang mit der kognitiven Entwicklung vollzieht, kann seit dem Jahr 2000 auf einen speziellen Sprachtest zurückgegriffen werden, der in Deutschland normiert, sorgfältig konstruiert und ökonomisch in der Anwendung ist. Auch für die Planung von Fördermaßnahmen liefert der SET- K 2 differenzierte Hinweise.

Bei bekannten Entwicklungsdefiziten wie etwa geistiger oder sensorischer Behinderung oder Autismus kann dieser Test auch noch angewandt werden, wenn die Kinder bereits älter sind. Mit Hilfe einer Kurzform im Sinne eines Screeninginstrumentes ist auch die Identifikation von Risikokindern möglich.

- **SET- K 3 - 5, Grimm 2001**

Mit dem SET- K 3- 5 steht für die Altersgruppe der Drei- bis Fünfjährigen ein Sprachtest zur Verfügung, der in der Theorie der Testkonstruktion und der Normierung zeitgemäße Anforderungen erfüllt. Er liefert eine ausgezeichnete Möglichkeit für die differenzierte Diagnostik von sprachlichen und Gedächtnisfähigkeiten und für die Erstellung eines Förderplans (89,113).

## 6.2.2 Psychomotorische Testverfahren

Bei der Erkennung und Therapie von Entwicklungs- und Lernstörungen ist auch die psychomotorische Entwicklung von entscheidender Bedeutung. Störungen der Bewegungskoordination, der Balance, der Gewandtheit und Einschränkungen im Bereich der Kraft und Schnelligkeit fein- und grobmotorischer Bewegungen können Beeinträchtigungen in vielen Lebensbereichen nach sich ziehen.

Um gezielt therapeutische Maßnahmen ergreifen zu können, ist eine differenzierte Diagnostik unentbehrlich. Eine Möglichkeit, die Körperkoordination zu beurteilen, stellt der Körperkoordinationstest (KTK) nach Kiphard und Schilling von 1987 dar.

Dieser Test prüft beispielsweise die Fähigkeit zur schnellen und gewandten Überschreitung der Körpermitte (z.B. durch seitliches Hin- und Herhüpfen) und zu ganzkörperlichen Bewegungen, bei denen die Körpermitte ebenfalls überquert werden muß (z.B. durch seitliches Umsetzen), er misst Balanceleistungen, wie etwa rückwärts Balancieren auf unterschiedlich schmalen Stangen und einbeinige Sprung- und Kraftleistungen, um die Leistung des einzelnen Beines (lateralisierte Leistungen) genauer beurteilen zu können (115).

## 6.2.3 Intelligenztests für Kinder und Jugendliche

Der Begriff des Intelligenzquotienten wurde im Jahre 1912 von William Stern eingeführt und stellt das auf den durchschnittlichen Entwicklungsstand von Gleichaltrigen bezogene Maß für die intellektuelle Leistungsfähigkeit einer Person dar.

Der Intelligenzquotient ergibt sich aus dem Verhältnis von Intelligenzalter (I A) zum Lebensalter (L A) nach der Formel:

$$IQ = 100 \times IA / LA$$

Der Wert von 100 bedeutet hierbei eine genau durchschnittliche Intelligenz. Das Intelligenzalter ergibt sich aus der Anzahl der Testaufgaben, die für die jeweilige Altersgruppe als lösbar ermittelt wurden. Werden neben den Aufgaben der eigenen Altersgruppe auch solche einer höheren Altersgruppe gelöst, so übersteigt das Intelligenzalter das Lebensalter und der Intelligenzquotient liegt über 100 (114,116).

Im Folgenden sollen einige der gebräuchlichsten Verfahren zur Intelligenztestung bei Kindern und Jugendlichen kurz vorgestellt werden:

- **Kaufmann Assessment Battery for Children (K- ABC, Melchers & Preuß 1991)**

Dabei handelt es sich um einen vor allem für Kinder im späteren Vorschulbereich sehr gut geeigneten Intelligenztest, der aber für Kinder in der Frühförderung unterhalb einer Altersstufe von 4- 4 ½ Jahren oft noch nicht aussagekräftig einsetzbar ist.

Der K- ABC Test ist eine differenzierte Intelligenz- und Fähigkeitsdiagnostik für Kinder im Alter von 2,6 bis 12,5 Jahren. Die Dauer beträgt zwischen 40 und 90 Minuten. Die Besonderheit bei diesem Test besteht, im Gegensatz zu anderen gängigen Testverfahren, in der Trennung von intellektuellen Fähigkeiten von sogenannten Fertigkeiten. In der Beschreibung zum K- ABC heißt es: „Intelligenz wird definiert als die Art und Weise, in der ein Individuum Probleme löst und Informationen verarbeitet.“

Im K- ABC werden Untertests, die schulische Fertigkeiten prüfen, von Skalen zur Erfassung intellektueller Fähigkeiten getrennt; angestrebt wird die Erfassung der prozessualen Aspekte der Aufgabenlösung, es soll also die Art und Weise ermittelt werden, auf die ein Kind ein Problem löst, um daraus Leistungsbesonderheiten abzuleiten.

Insgesamt endet der Test bei einem IQ von ca. 145 mit einer gewissen Abweichung nach oben und unten. Er wird bei Vorschulkindern sehr gerne verwendet, weil er so viele Einzelskalen beinhaltet; so werden gute Rechenergebnisse zum Beispiel nicht von Defiziten im Bereich des Wortschatzes verschleiert.

Aufgebaut ist der K- ABC unter anderem aus einer Skala der intellektuellen Fähigkeiten (SIF) als Maß für die Gesamtintelligenz, die die Problemlösefähigkeiten in neuartigen Situationen erfasst und sich wiederum aus der Skala einzelheitlichen Denkens (SED) und der Skala ganzheitlichen Denkens (SGD) zusammensetzt.

Desweiteren gibt es eine Fertigkeiten- bzw. Fähigkeitenskala (FS), die Faktenwissen und Fertigkeiten prüft, wie sie gewöhnlich durch aufgeschlossenes Verhalten seitens des Kindes gegenüber seiner Umwelt erworben werden.

Das Testergebnis wird in sogenannten Standardwerten angegeben, die letztendlich eine Aussage darüber erlauben, ob und wie weit das betreffende Kind in seiner Entwicklung beschleunigt, also Gleichaltrigen überlegen ist. Standardwerte ab 120 Punkte deuten mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine Hochbegabung hin (89,113,114,116).

### - **Hamburg- Wechsler- Intelligenztest für Kinder (HAWIK- III)**

Bei den Wechsler- Tests (die Originalbezeichnung lautete Wechsler- Bellevue- Test), entwickelt in den 30er Jahren am Bellevue- Hospital in New York von David Wechsler, praktizierender klinischer Psychologe mit jahrzehntelanger Erfahrung in der Individualdiagnostik, handelt es sich um Individualtests, die intellektuelle Begabungen in 13 verschiedenen Untertests messen, die sich jeweils einem der zwei Testteile Verbalteil und Handlungsteil zuordnen lassen. Wechsler wollte möglichst viele verschiedene geistige Fähigkeiten erfassen, aus diesen aber Aussagen über die allgemeine geistige Begabung des jeweiligen Kindes ableiten können. Als Kliniker hat Wechsler immer auf die Notwendigkeit weiterer Informationsgewinnung hinsichtlich der Entwicklung eines Kindes, etwa über die Anamneseerhebung, hingewiesen.

Neben dem Hamburg- Wechsler- Intelligenztest für Kinder im Alter von 6-15 Jahren (HAWIK) existiert auch ein Hamburg- Wechsler- Intelligenztest für Erwachsene, der HAWIE. Beide Versionen gleichen sich in ihrem Aufbau. Die dem HAWIK- III vorangegangene Version, der Hawik- R, orientierte sich stark am amerikanischen Vorbild. Mittlerweile müssen seine Testnormen als veraltet angesehen werden, da sie es nicht erlauben, die Leistung eines Kindes oder Jugendlichen verlässlich einzuschätzen.

Die Aufgaben im Verbalteil sind stark wissensorientiert; sie testen beispielsweise den Wortschatz des Kindes, die Fähigkeit und Bereitschaft, sich Wissen anzueignen sowie die Fähigkeit zu logischen Verknüpfungen. Der Verbalteil besteht aus den Untertests allgemeines Wissen, rechnerisches Denken, Gemeinsamkeiten finden, Wortschatztest, Figurenlegen und fakultativ Zahlen nachsprechen.

Die übrigen Subtests gehören dem Handlungsteil an, der weniger sprachgebundene Intelligenzleistungen wie das räumliche Vorstellungsvermögen prüft. Dazu zählen ein Zahlen-

Symbol Test, Bilderergänzen und - ordnen, ein Mosaiktest, allgemeines Verständnis und fakultativ Labyrinthtest und Symbolsuche.

Die Durchführung des Tests dauert insgesamt 1-1,5 Stunden. Bei der Auswertung wird je nach erreichter Punktzahl und in Abhängigkeit vom Lebensalter ein Gesamtintelligenzquotient, ein Verbalintelligenzquotient, sowie ein Handlungs- oder praktischer Intelligenzquotient ermittelt. Zudem ist es im HAWIK- III möglich, 4 Indexwerte zu bilden, nämlich sprachliches Verständnis, Wahrnehmungsorganisation, Unablenkbarkeit und Arbeitsgeschwindigkeit. Der ergänzende Untertest „Labyrinth- Test“, der die Arbeitsgeschwindigkeit ermittelt, geht nicht in die Berechnung ein.

In Hinblick auf die Gütekriterien verweisen die Herausgeber in erster Linie auf die amerikanischen Ergebnisse, im deutschsprachigen Raum gibt es diesbezüglich noch wenig Erfahrung. Im separaten Handbuchabschnitt „Hochbegabungsdiagnostik“ weisen die Autoren ausdrücklich darauf hin, dass der HAWIK- III in den Extrembereichen keine besonders gute Differenzierung liefert und empfehlen daher, den Test eher als erstes Screeningverfahren einzusetzen und danach Tests zu verwenden, die in den oberen Bereichen der Intelligenz stärker differenzieren. Ein weiterer Schwachpunkt besteht darin, dass Intelligenzleistung und Schulwissen im Verbalteil nicht ausreichend voneinander getrennt werden (114,115,117,118).

#### - **Adaptives Intelligenz Diagnostikum (AID, AID 2, für Kinder von 6- 16 Jahren)**

Die Intelligenztestbatterie AID 2 stellt die Revision bzw. Neunormierung des AID dar, beansprucht einen Zeitraum von 20-70 Minuten, einschließlich der Zusatztests etwa 90 Minuten, und dient der Erfassung der komplexen und basalen Erkenntnisfähigkeit bei Kindern und Jugendlichen; Ziel ist es, möglichst viele Fähigkeiten zu erfassen. Thematisch orientieren sich die einzelnen Untertests, in denen unter anderem die verbal- akustischen und die manuell- visuellen Fähigkeiten geprüft werden, grob an denjenigen der frühen Wechsler-Tests. Zudem kommen einige Zusatztests zur Anwendung, in denen es beispielsweise um unmittelbares Reproduzieren, Merken und Einprägen und um visuomotorisches Strukturieren geht.

Das umfangreiche Testmaterial der meisten Untertests erlaubt es, einen breitgefächerten Fähigkeitsbereich zu messen. Das Besondere am AID ist seine Gestaltung als adaptiver Test, was bedeutet, dass die Materialauswahl pro Untertest antwortabhängig, je nach Leistungsniveau der Testperson erfolgt. Auf diese Weise kann der Test schneller und

effizienter durchgeführt werden, ohne dabei an Genauigkeit einzubüßen. Darüber hinaus werden negative Effekte wie Leistungsdemotivation infolge vieler zu leichter Aufgaben und Frustration durch eine Serie von zu schweren Aufgaben vermieden.

Das Diagramm zur Diagnostik von Teilleistungsstörungen ermöglicht ein entsprechendes Screening in Bezug auf ausgewählte Teilleistungsfähigkeiten, das Beiblatt für Beobachtungen der Arbeitshaltungen dient der qualitativen Beurteilung des Arbeits- und Kontaktverhaltens bei Leistungsanforderung.

Abgesehen von der standardmäßig vorgesehenen Testform können auch personenspezifische und -unspezifische Kurzformen, Screeningverfahren, mit lediglich zwei Aufgabengruppen vorgegeben werden. Außerdem existieren - für den Fall einer Testwiederholung - Parallellformen mit gänzlich anderen Aufgaben (114).

- **Raven Matrizen Test (Coloured Progressive Matrices: CPM und Advanced Progressive Matrices: APM)**

Beim Raven Matrizen Test handelt es sich um ein gebräuchliches Verfahren für Personen zwischen 6 und 80 Jahren zur Messung der fluiden und generellen Intelligenz, der den Anspruch erhebt, intellektuelle Begabung weitgehend unabhängig von Sprache und Kultur zu erfassen. Zur Anwendung kommt ein nonverbales Verfahren zur Registrierung des schlussfolgernden Denkens, einer Komponente der allgemeinen Intelligenz, das die Fähigkeit, eine Ordnung in der Unordnung zu erkennen, mit anderen Worten die Fähigkeit zum klaren Denken und Erkennen, bewertet. Der Test ist nicht zeitbegrenzt, ausgelassene Aufgaben können später bearbeitet werden.

Der Hauptnachteil der Raven- Matrizen besteht darin, dass sie nicht speziell für Kinder konzipiert wurden, wobei der CPM durch seine farbige Gestaltung für Kinder ansprechender ist und hilft, ihre Motivation aufrecht zu erhalten. Ursprünglich entwickelt wurde er jedoch zum Testen von Personen im unteren Grenzbereich, weshalb er zur Erfassung einer Hochbegabung wenig geeignet scheint.

Aufgebaut ist der Raven Matrizen Test aus 36 Einzelblättern, die in 3 Sets zu 12 Aufgaben nach steigendem Schwierigkeitsgrad dargeboten werden, um der Testperson die Möglichkeit zu bieten, sich mit der Art der Problemstellung und den Lösungen vertraut zu machen. Inhalt ist das Erkennen von Symmetrie, Asymmetrie, Differenz, Ähnlichkeit und Gestaltbildung von Mustern (114).

- **Der Developmental Test of Visual Perception (DTVP) und Frostigs Entwicklungstest der visuellen Wahrnehmung (FEW)**

Der von Marianne Frostig und Kollegen 1958-1961 für Kinder im Alter von 4-9 Jahren entwickelte Developmental Test of Visual Perception (DTVP) und die 1972 veröffentlichte deutsche Version Frostigs Entwicklungstest der visuellen Wahrnehmung (FEW) gehören zu den am häufigsten verwendeten Tests im Umgang mit Kindern mit visuellen Wahrnehmungsstörungen. Die Idee dabei war, dass es möglich sei, mit Hilfe von DTVP bzw. FEW fünf Bereiche oder Faktoren der visuellen Wahrnehmung zu erfassen und damit einen Ansatzpunkt für eine differenzierte Behandlung zu gewinnen.

Die Übertragung des DTVP zum FEW, der in Bezug auf Testmaterial, Testdurchführung und Signierung mit dem amerikanischen Vorbild praktisch identisch ist, wurde 1972 von Lockowandt veröffentlicht; Abweichungen gibt es lediglich in der Auswertung. Seit 1994 wird in den USA die neuere Version des amerikanischen Frostig- Tests, der DTVP-2 verwendet, der sich von seinem Vorgänger v.a. im Design und in der Durchführung unterscheidet und ein deutlich differenzierteres Bild der Fähigkeiten eines Kindes im Bereich der visuellen Wahrnehmung ermöglicht.

Der Test dauert etwa 35- 45 Minuten und erfasst mittels verschiedener Untertests Grundfunktionen der Wahrnehmung wie Auge- Hand- Koordination, Figur- Grund- Unterscheidung, Formkonstanz und die Identifikation und Reproduktion von Gestalten. Überprüft wird dabei die visuomotorische Koordination, die Formkonstanz- Wahrnehmung, das Erkennen der Lage im Raum und das Erfassen räumlicher Beziehungen. So sollen beispielsweise 3 geometrische Figuren nach Einzelvorlage korrekt nachgezeichnet oder in 2 komplexen Abbildungen 2 Figuren isoliert und richtig umfahren werden. Störungen speziell in diesen Bereichen stehen in engem Zusammenhang mit Schwierigkeiten in der Schule und Lernproblemen (19,20,64,88,114).

- **Denver- Test**

Der Denver- Test bietet eine ausführliche Aufstellung von grob- und feinmotorischen Fähigkeiten, Sprachentwicklung und sozialen Fertigkeiten in Bezug auf das Alter, in dem sich

diese Fähigkeiten entwickeln. Er stellt ein Grobuntersuchungsverfahren dar, das es ermöglicht, Kinder vom ersten Lebensmonat bis zum sechsten Lebensjahr zu testen. Vielfach wird er bereits beim Kinderarzt im Rahmen einer Vorsorgeuntersuchung durchgeführt. Es handelt sich in diesem Fall nicht um einen Intelligenz- oder Entwicklungstest, sondern um einen Suchtest; bei Auffälligkeiten sollte der Arzt einen Spezialisten hinzuziehen. Die Denver- Entwicklungsskalen enthalten 105 Aufgaben, anhand derer die soziale Kontaktfähigkeit, die Feinmotorik und Adaption, die Sprache und die Grobmotorik überprüft werden (114).

#### - **Kramer- Test**

Der erstmals im Jahre 1954 erschienene und nun in revidierter Form vorliegende Kramer-Test stellt eine wissenschaftliche Erweiterung und Umarbeitung der Stufenmethode nach Binet- Simon für den deutschen Sprachraum dar. Dieser Test wurde vorrangig in Hinblick auf weniger begabte Kinder, Lernbehinderte und Schulversager überarbeitet, allerdings genügt die Testkonstruktion den heutigen Ansprüchen nicht mehr und die Normen, also die Vergleichswerte zur Einstufung der Intelligenz, müssen als veraltet betrachtet werden.

Beim Kramer- Test handelt es sich um einen Entwicklungstest, mit dem der augenblickliche Entwicklungsstand eines Kindes in Bezug auf sein Alter überprüft wird. Vom Aufbau her ist es ein Staffeltest, bei dem sich die Aufgaben, die Kindern auf verschiedenen Altersstufen gestellt werden, überlappen (114).

#### - **Münchener Funktionelle Entwicklungsdiagnostik**

Wird eine Entwicklungs- oder Leistungsstörung diagnostiziert oder vermutet, so beginnt die eigentliche psychologische Diagnostik mit der Erfassung des allgemeinen intellektuellen Entwicklungsstandes. Vom frühen Kindesalter bis zum dritten Lebensjahr kommt hierfür die Münchener Funktionelle Entwicklungsdiagnostik zum Einsatz, die auf spielerische Art und Weise, mittels kindgerechter Aufgaben, Testungen durchführt, anhand derer Schlüsse auf das Sitz-, Krabbel- und Laufalter, des weiteren auf das Handgeschicklichkeitsalter, das

Perzeptionsalter, das Sprechalter, das Sprachverständnisalter, das Sozialalter sowie auf das Selbständigkeitsalter gezogen werden können.

Werden die Ergebnisse auf ein Entwicklungsprofil aufgetragen, so können Abweichungen zwischen dem Lebensalter und dem im Test ermittelten Entwicklungsalter in den einzelnen Entwicklungsbereichen anschaulich dargestellt werden, woraus sich gezielte Schwerpunkte für therapeutische Maßnahmen ableiten lassen (115).

### **6.3 Förderung der Wahrnehmungstätigkeit**

Dr. Felicié Affolter zufolge gibt es drei Modelle der Wahrnehmungsentwicklung, wobei vieles dafür spricht, dass jedes von ihnen zutrifft:

- Das hierarchische Entwicklungsmodell
- Das Teilleistungsmodell
- Das Modell des problemlösenden Alltagsgeschehens

Gemäß dem hierarchischen Entwicklungsmodell sollte bei der Wahrnehmungsförderung an Leistungen gearbeitet werden, die der gestörten Stufe vorausgehen. Um dem Teilleistungsmodell gerecht zu werden, ist es angebracht, direkt die beeinträchtigten Leistungen zu trainieren. Das Modell des problemlösenden Alltagsgeschehens wiederum besagt, dass das Kind seine Wahrnehmung entwickelt, indem es in seiner Alltagswelt Probleme löst und dabei Hypothesen und Regeln aufstellt; es erlebt die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung.

Liegt eine Störung der Wahrnehmung vor, so kommt es zu einem strukturell andersartigen Entwicklungsverlauf; das Kind sammelt „gespürte“ Informationen. Wichtig ist es, Kinder sowohl mit lebensbedeutsamen Problemstellungen zu konfrontieren, als auch Leistungen der vorausgehenden wie auch der aktuellen Stufe zu fördern.

Schwierigkeiten im Bereich der Feinmotorik ließen sich beispielsweise bearbeiten, indem mit dem Kind als Ausdruck der Ebene der lebensbedeutsamen Alltagsprobleme Weihnachtsschmuck hergestellt wird, zudem graphomotorische Übungen zur Bearbeitung der Teilleistungsstörung durchgeführt werden und Förderansätze zur Bearbeitung der für die Teilleistung relevanten Basisfunktionen wie vestibuläre, taktil- kinästhetische und propriozeptive Wahrnehmung zur Anwendung kommen. Eine Möglichkeit hierfür stellt z.B.

die „Sensorische Integrationstherapie nach Jean Ayres“ dar, auf die weiter unten eingegangen werden soll (3,4,88,99).

### **6.3.1 Förderung der visuellen Wahrnehmung**

Aufbauend auf das Wahrnehmungskonzept der Wiener Psychologin Marianne Frostig ließen sich etwa folgende kleine Übungen als Fördermöglichkeiten, spielerisch z.B. in den Kunstunterricht eingebaut, anwenden, um die einzelnen Wahrnehmungsbereiche gezielt zu trainieren:

Förderung der *visuomotorischen Koordination* durch:

- Imitationsspiele („Ich bin ein Elefant“, andere nachahmen,...)
- Mit einem Magneten Linien nachziehen
- Beidhandzeichnen
- Malen mit Fingerfarben
- Nachfahren von Linien
- Ausschneiden von Figuren
- Linien entlanglaufen
- Malen mit langstieligen Pinseln
- Zeichnen vor dem Spiegel
- Hindernislauf mit selbstgemachten Hindernissen
- Laubsägearbeiten

Förderung der *Figur- Grund-Wahrnehmung* durch:

- Zeichnen und Betrachten von weißen Figuren auf schwarzem Papier
- Formen ertasten
- Drucken
- Ausschneiden von Formen z.B. aus gemusterter Tapete
- Scherenschnitt

- Suchbilder
- Verfremden von Portraits
- Eigene Photos anmalen
- Schattenspiele
- Doppeldeutige Bilder (je nach Betrachtung wechselt Figur und Grund)

Förderung der *Wahrnehmungskonstanz* durch:

- Suchbilder
- Größenvergleich
- Photographie
- Technisches Zeichnen
- Ausmalen von Gegenständen
- Gegenstände verpacken
- Ertasten von Gegenständen
- Plastizieren
- Collagen anfertigen

Förderung der *Wahrnehmung der Raumlage* durch:

- Aktionen mit Seilen
- Aktionen mit Kartons
- Photographie
- Collagen anfertigen
- Spannen von Fäden im Raum
- Technisches Zeichnen
- Sortieren, Verlegen und Verändern von Gegenständen
- „Ich sehe was, was Du nicht siehst“

Förderung der *Wahrnehmung räumlicher Beziehungen* durch:

- Spiele (z.B. Plätzetauschen)
- Bauen
- Puzzle legen
- Modellieren und Kneten mit Ton und Knetmasse
- Spannen von Fäden
- Stickarbeiten
- Weben und Knüpfen
- Drucken von Geschenkpapier
- Kopieren (99)

### **6.3.2 Förderung der auditiven Wahrnehmung**

Frühe Wahrnehmungsstörungen bei Kindern führen laut Felicié Affolter zu Verhaltensstörungen und Sprachentwicklungsverzögerungen, die sowohl die Oberflächen- als auch die Tiefenstruktur der Sprache betreffen können. Zur Förderung der auditiven Wahrnehmung bietet sich folgende Vorgehensweise an:

- Sensibilisierung für Hörerfahrungen
- Bereitstellung von Wortmaterial
- Gliederung von Sätzen in Wörter
- Reimwörter finden
- Silbengliederung
- Hervorhebung von gleichen Teilen aus zusammengesetzten Wörtern
- Silbenanalyse und Silbensynthese
- Phonemanalyse und Phonemsynthese (3,99)

### **6.4 Rehabilitation von Patienten mit Störungen der Raumwahrnehmung**

In der Rehabilitation von in der Raumwahrnehmung gestörten Patienten können zwei Ansätze unterschieden werden, die einander nicht ausschließen. Der eine Ansatz baut die Therapie räumlicher Fähigkeiten in die Rehabilitation alltagspraktischer Handlungen mit ein, während der andere direkt einzelne Komponenten der räumlichen Fähigkeiten trainiert.

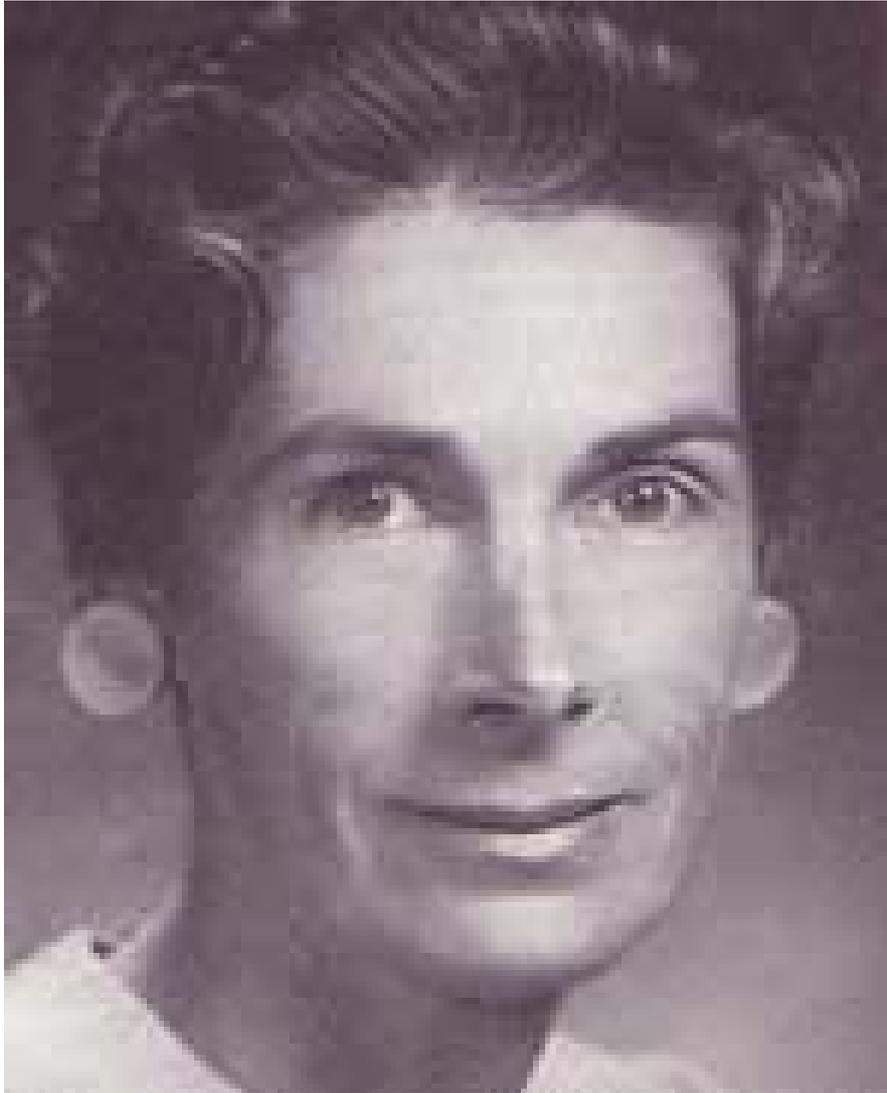
Wenn Alltagshandlungen durch mangelhafte Raumauffassung und visuokonstruktive Störungen beeinträchtigt sind, besteht ein möglicher therapeutischer Ansatz in der Kompensation des Mangels an Überblick und spontaner Einschätzung räumlicher Verhältnisse durch Konzentration auf Details und Handlungsabläufe und durch Verbalisierung; die Patienten können beispielsweise das Vorgehen beim Ordnen eines Kleidungsstückes in eine Folge von Handlungsschritten aufteilen, die sich an einzelnen Details orientiert und sich angewöhnen, den ordentlichen Vollzug jeden Schrittes bewußt zu kontrollieren, sowie die jeweils erreichten Positionen des Stücks verbal zu beschreiben. Bei der Orientierung in ihrer Umgebung können sie sich verstärkt an Landmarken orientieren und sich Wege als eine Folge verbalisierbarer Handlungsschritte einprägen.

Beim direkten Training der Raumauffassung und der visuokonstruktiven Leistungen wird Übungsmaterial verwendet, das aus dem Testmaterial abgeleitet ist, mit dem die einzelnen Komponenten der Störung analysiert werden. Ist etwa die Schätzung von Winkeln mangelhaft, so wird der Vergleich von Winkeln oder Richtungen geübt, wobei die Patienten Rückmeldungen bekommen über die Richtigkeit ihrer Lösungen.

Therapiestudien konnten zeigen, dass mit solchen Verfahren meßbare Verbesserungen der trainierten Leistungen auch bei Patienten erzielt werden, bei denen vor dem Training keine Spontanremission der Störung auftrat; teilweise konnte auch eine Übertragung des Erfolgs auf nicht direkt trainierte Leistungen festgestellt werden.

Als sehr erfolgreich besonders bei Kindern hat sich auch die Durchführung eines neuropsychologischen Gruppentrainings erwiesen (38,43,51).

## **6.5 Die Sensorische Integrationstherapie nach Jean Ayres**



**Abbildung 10: Jean Ayres (1920-1989)**

Das folgende Kapitel soll einen Überblick über die „Sensorische Integrationstherapie nach Jean Ayres“ vermitteln, die aus dem Konzept der Ergotherapie hervorgegangen ist.

Grundsätzlich sollte man bei der Therapie des wahrnehmungsgestörten Kindes immer von einem Ereignis ausgehen. Sinnvoll sind hierbei Aktionen zur Förderung der Lokalisation und Wiedererkennung, der Planung und der Interaktion; eine wesentliche Förderung geschieht v.a. durch Alltagstätigkeiten, bei denen einfache Gegenstände „begriffen“ werden und strukturierte Handlungsabläufe stattfinden. Deshalb sollten auch die Situationsbedingungen variiert werden, bis das Kind Verhaltensmuster zeigt, die für möglichst hohe Aufmerksamkeit sprechen (6,88,99).

## **Ergotherapie**

Die Ergotherapie hat sich historisch aus der Arbeitstherapie für psychiatrisch Kranke entwickelt, ihr Aufgabengebiet jedoch speziell im Kindesalter wesentlich erweitert. Ergotherapie dient der „Wiederherstellung bzw. erstmaligen Herstellung normaler Funktionen von Körper, Seele und Geist, um den gesamten Menschen am Leben teilhaben zu lassen“ (88, S 265).

Ziel ist, dass der Patient seine alltäglichen Verrichtungen selbständig ausführen kann. Die Ergotherapie beschäftigt sich vor allem mit dem Zusammenspiel verschiedener Formen der Motorik, z.B. der Grob- und Feinmotorik, sowie der augengesteuerten Motorik, mit verschiedenen Wahrnehmungsqualitäten, z.B. der Oberflächen- und Tiefenperzeption, dem Gleichgewicht, der visuellen und akustischen Wahrnehmung, sowie mit der Kontrolle von Bewegung und Wahrnehmung durch den Intellekt. Die Integration der verschiedenen Wahrnehmungsbereiche wird als intermodale Funktion bezeichnet.

Wichtigstes Medium der Ergotherapie ist, besonders bei Patienten mit Teilleistungsstörungen, das Spiel: Spielplanung und -gestaltung, das Geschick, spielerische Aufgaben zu bewältigen, die dabei stattfindende Kommunikation, sowie das Gewinnen- und Verlierenkönnen sind von entscheidender Bedeutung.

## **Sensorische Integrationsbehandlung**

Gemäß dem Konzept der „Sensorischen Integrationsbehandlung“ (SI-Therapie) nach der amerikanischen Psychologin und Ergotherapeutin Jean Ayres, das ab 1973 entwickelt wurde, wird die Wahrnehmung innerer und äußerer Reize in unterschiedlicher Form mit Motorik beantwortet. Störungen von Wahrnehmung und Motorik und damit der allgemeinen Lernfähigkeit werden als Abweichung von Gehirnfunktionen angesehen, die neurologisch oft nicht erkennbar sind. Hierbei werden Sinneswahrnehmungen nicht ausreichend geordnet, koordiniert und zu einer angepassten Reaktion organisiert, weshalb die Reaktionen nicht mehr dem Reiz angemessen erfolgen.

Jean Ayres hat als Therapeutin viele Jahre an den perzeptiven Störungen Hirnverletzter gearbeitet. Aus ihren Publikationen und vermittelten Äußerungen geht hervor, dass sie hier Parallelen zu den perzeptiven Störungen von Kindern mit Lernstörungen sah, doch schienen

ihr die damaligen Behandlungsmöglichkeiten unzureichend auf diese für sie erkennbaren Zusammenhänge einzugehen.

In den sechziger Jahren stieg die Zahl der lerngestörten und schwierigen Kinder in den amerikanischen Schulen sprunghaft an. Aus diesem Grund wurde ein staatlicher Forschungsauftrag vergeben, um die Ursachen für die hohe Zahl an Lerngestörten zu erklären und Interventionsmodelle zu entwickeln, an dem Jean Ayres mitarbeiten konnte, so dass ihr Zeit und Mittel zur Verfügung standen, dieser Fragestellung genauer nachzugehen.

Systematisch untersuchte sie die Ausfälle bei Hirnverletzten, um Rückschlüsse auf die Funktionsweisen der neuronalen Verarbeitung zu ziehen. Sie wertete im Rahmen ihrer Forschungsarbeit auch Ergebnisse von Tierbeobachtungen und Tierversuchen aus und zog daraus wichtige Schlüsse für die zentrale Lokalisierung der Wahrnehmungsverarbeitung auf den verschiedenen Hirnebenen. Als Wissenschaftlerin und Therapeutin untersuchte sie erstmalig den Einfluß bestimmter therapeutischer Einwirkungen. Die gezielte Fragestellung des Forschungsauftrags brachte Jean Ayres zu ihren Erkenntnissen über die Hirnfunktionsweisen und deren Beeinflussung; daraus konnte sie neue Therapiekonzepte erarbeiten.

Die Therapie nach Jean Ayres erfolgt mittels einer Stimulierung der Körperwahrnehmung durch Aktivierung der Basissinne, das heißt der Signale von Muskel-, Sehnen- und Hautrezeptoren und dem Gleichgewichtsorgan. Störungen von Gleichgewichtssystem, Haltungsapparat, Handgeschicklichkeit, taktiler Abwehr, visueller Wahrnehmung und Lateralität führen zu Auffälligkeiten der Motorik, der Sprache, der Emotion und des Sozialverhaltens und können sich unter anderem als Hyperaktivität, vermehrte Ablenkbarkeit, verminderte Verhaltenssteuerung, erhöhte Aggressivität oder Lernstörung äußern.

Es sollte immer versucht werden, die Wahrnehmungsprobleme im Kontext des gesamten Verhaltens zu verstehen. Gerade bei Kindern können Wahrnehmungsstörungen Ausdruck komplexer psychologischer Vorgänge sein, das heißt, sie sind nicht oder nicht nur als Folge einer Störung des zentralen oder peripheren Nervensystems anzusehen, sondern können auch äußerer Ausdruck einer überwiegend psychischen oder psychosozialen Belastung sein.

Umgekehrt können natürlich auch primär organische Störungen von Motorik und Wahrnehmung das psychische Wohlbefinden beeinträchtigen, so dass bei der Beurteilung und Therapie eine psychologische Mitbetreuung oft von großer Bedeutung ist.

Grundlage der Diagnostik nach Jean Ayres ist der sprachfreie Southern California Sensory Integration Test (SCSIT) für Kinder im Alter von 4-9 Jahren, der mittlerweile in den USA durch den Sensoric Integration Praxis Test (SIPT) ersetzt wurde.

Mittels der folgenden 17 Subtests erfolgt eine Diagnostik von sensorischen Integrationsstörungen:

- 1.) Räumliche Wahrnehmung
- 2.) Figur- Grund- Wahrnehmung
- 3.) Stellung im Raum
- 4.) Nachzeichnen von Mustern
- 5.) Kinästhetische Wahrnehmung, z.B. Bewegungsgefühl, Wahrnehmung der Gelenkbewegungen
- 6.) Formwahrnehmung durch die Hände
- 7.) Figurunterscheidung
- 8.) Graphische Wahrnehmung, z.B. Erkennen von Zeichen auf der Haut
- 9.) Berührungslokalisation
- 10.) Erkennen gleichzeitiger Hautberührung
- 11.) Nachahmung mit Beurteilung von Schnelligkeit und Genauigkeit auch bei schwierigen Bewegungsabläufen.
- 12.) Überqueren der Körpermitte
- 13.) Beidseitige motorische Koordination
- 14.) Rechts- Links- Unterscheidung, Konzeption eines Körperschemas
- 15.) Einbeinstand bei offenen Augen
- 16.) Einbeinstand bei geschlossenen Augen
- 17.) Auge- Hand- Koordination

Die Durchführungszeit der Tests beträgt 1,5 bis maximal 4 Stunden. Das Ergebnis wird als Rohwert zusammengefaßt, wobei auch die benötigte Zeit berücksichtigt wird, und entsprechend altersspezifischer Umrechnungstabellen in eine Normalverteilungskurve eingetragen.

Als Indikation für eine SI- Therapie gelten vielfältige Verhaltensstörungen besonders im Kleinkindalter, vor allem Unruhezustände, allgemeine Bewegungsstörungen, expressive Sprachentwicklungsstörungen, taktil- kinästhetische Störungen und eventuell auch autistische Verhaltensweisen.

Ziel der „Sensorischen Integrationstherapie“ ist es, vielfältige aber wohldosierte Sinneseindrücke anzubieten. Durch eine Stimulation der Wahrnehmungsverarbeitung auf niedriger Ebene, nach Jean Ayres auf Hirnstammniveau, soll die kortikale Verarbeitung und somit die bewußte Wahrnehmung verbessert werden, wozu unter anderem Übungen des Gleichgewichts, der Tiefensensibilität, des Tastsinns, der Sehleistung, der Augenbeweglichkeit und der Lateralität dienen, was mit einer Vielzahl verschiedenster Bewegungen und Spielgeräte erreicht werden soll. Es wird darauf abgezielt, beim Kind Freude an den ihm adäquaten Bewegungen zu wecken und es anzuregen, weitere Wahrnehmungs- und Bewegungserfahrungen zu sammeln.

Im praktischen Vorgehen werden eine Basistherapie und 3 aufbauende Förderstufen in Form eines gezielten Angebots für die jeweiligen Bedürfnisse des Kindes zusammengestellt, so dass es seine eigenen Fähigkeiten im Spiel entwickeln kann.

Aufgabe des Therapeuten ist es, die spontanen Bewegungen des Kindes zunehmend zu lenken, z.B. durch Abgrenzen des Raumes, Zeitvorgaben, Konstruktionsaufgaben und bestimmte Übungen (6,7,18,88,99).

## **Teil C**

### **Diskussion**

Zusammenfassend lässt sich unschwer erkennen, welche weite Kreise eine Störung im Bereich der Raumwahrnehmung und der visuellen Wahrnehmung allgemein ziehen kann. Betroffene Personen sind in den meisten, wenn nicht in allen Bereichen ihres alltäglichen Lebens, sei es in beruflicher wie auch privater Hinsicht, mehr oder weniger stark beeinträchtigt. So wirken sich etwa Störungen im Wahrnehmungsbereich nicht nur auf den Erwerb von Sprache und Sprachverständnis oder auf das Rechnen- und Lesenlernen aus, sondern auch auf Anforderungen, die das tägliche Leben mit sich bringt, sei es beim Essen, sich Ankleiden, beim Aufräumen oder beim Zurechtfinden in der Umgebung. Selbst in Hinsicht auf die spätere Berufswahl kann ein Heranwachsender mit einer räumlichen und/oder visuellen Wahrnehmungsstörung eingeschränkt sein. Darüber hinaus entwickeln betroffene Kinder, hervorgerufen und verstärkt durch ständige Misserfolgs-Erlebnisse, oft nur ein schwaches Selbstwertgefühl, das sie wiederum daran hindert, soziale Kontakte zu knüpfen und sich einen stabilen Freundeskreis aufzubauen.

Ebenso wird deutlich, dass in der Kindheit einmal Versäumtes, sowohl auf dem Gebiet der Früherkennung, wie auch im Bereich der gezielten Förderung und Therapie, oft nie mehr wieder gut zu machen ist. Aus diesem Grund muß die Tragweite einer alsbaldigen Erfassung von kindlichen Defiziten gerade im visuellen Bereich vermehrt ins Bewußtsein gerufen werden.

Nichtsdestotrotz werden Störungen räumlicher Leistungen oftmals weder ausreichend untersucht noch spezifisch trainiert, obwohl gerade dies unabdingbar wäre für ein erhöhtes Maß an Selbständigkeit der Betroffenen. Nicht zuletzt ist die Entwicklung der Wahrnehmungsleistung maßgeblich am Entstehen höherer Integrationsprozesse, wie der Ausbildung einer funktionierenden Lateralität, dem Erlernen von Lesen und Schreiben etc. beteiligt.

Noch immer aber wird gerade der Sektor der Früherkennung von Wahrnehmungsstörungen im visuellen Bereich eher stiefmütterlich behandelt. So existieren keinerlei Screening-Verfahren, die Sehstörungen bzw. Störungen der visuellen Wahrnehmung bereits im Säuglingsalter ans Licht brächten. Ebenso hat sich das bisher geltende Programm der

gesetzlichen Vorsorgeuntersuchungen bei Kindern leider als unzureichend erwiesen. Nur ein kleiner Teil der Kinder mit angeborenen und in den ersten Lebensmonaten auftretenden Sehschäden kommt rechtzeitig, das heißt während einer Phase, in der eine erfolgreiche Therapie noch möglich ist, zum Augenarzt; die gesetzlichen Vorsorgeuntersuchungen U8 und U9, die auch eine Prüfung der Sehfähigkeit vorsehen, sind somit zu spät anberaumt. Nicht nur, dass leider zu wenige Eltern das Angebot der gesetzlichen Vorsorgeuntersuchungen beim Kinderarzt nutzen, bislang existieren überdies keine gesetzlichen Vorsorgeuntersuchungen in der augenärztlichen Praxis, die zu einer früheren Diagnose beitragen könnten.

Aus der Summe all dieser Gründe werden visuelle Wahrnehmungsstörungen bei Kindern meist erst im Alter von 4 Jahren diagnostiziert, wenngleich die Mitglieder der American Academy of Pediatrics auf die Wichtigkeit einer Prüfung der Sehfähigkeit bereits bis zum zweiten Lebensjahr (zu diesem frühen Zeitpunkt mittels Bildkarten) hinweisen. Kinder aus Familien, in denen erbliche Augenkrankheiten bekannt sind, sollten sogar schon mit 6-12 Monaten einem Augenarzt vorgestellt werden.

Dass diese Umstände ein früh- und somit rechtzeitiges Eingreifen im Sinne einer Korrektur der zugrunde liegenden Schädigung bzw. einer unverzüglichen Förderung der beeinträchtigten Fähigkeit(en) erschweren, wenn nicht verhindern, liegt auf der Hand. Es soll an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, dass es beim Verdacht auf eine Störung der visuellen Wahrnehmungsfähigkeit keine Zeit zu verlieren gilt!

Etwas erfreulicher sieht es im wesentlich besser erforschten und geförderten auditiven Bereich aus. Sowohl zu Prävalenzen als auch zum Screening stehen hier mehr Daten und Möglichkeiten zur Verfügung, was eine Förderung und Integration erfasster Kinder erst ermöglicht. So sind zwar ebenfalls auf auditivem Gebiet Zeitverluste bei Diagnostik und Therapie von Wahrnehmungsstörungen zu beklagen, doch existieren auf diesem Sektor in Form von beispielsweise Otoskopie, Tympanometrie, Otoakustischen Emissionen oder BERA (Brainstem Electric Response Audiometry) ausgezeichnete Screeningverfahren zur Früherfassung von Hörschäden bereits beim Neugeborenen; speziell das BERA- Verfahren verfügt sowohl über eine sehr hohe Sensitivität als auch Spezifität. Kindern mit Wahrnehmungsstörungen im auditiven Bereich bietet sich folglich auch früher die Chance, in den Genuß einer entsprechenden Therapie, etwa in Form einer Versorgung mit der passenden Hörhilfe, zu gelangen; optimal wäre die Versorgung mit Hörgeräten bereits in den ersten Lebenswochen. Auf eine Ausweitung der Möglichkeiten im Bereich der Diagnostik und Prävention visueller Wahrnehmungsstörungen sollte daher zukünftig ein größeres Gewicht gelegt werden.

In diesem Zusammenhang soll an dieser Stelle ein Beitrag auf dem Weg zu einer umfassenderen und möglichst lückenlosen Diagnostik und Therapie wahrnehmungsgestörter Kinder angeführt werden:

Als Reaktion auf die Lücken im Programm der gesetzlichen Vorsorgeuntersuchungen einigten sich der Berufsverband der Augenärzte Deutschlands e.V. (BVA) und der Berufsverband für Kinderheilkunde und Jugendmedizin (BVKJD) im Jahre 1999, selbst gemeinsam auf dem Gebiet der Früherkennung von Sehstörungen im Kindesalter tätig zu werden. Als Vorbild diente ein Modell, das von Kinder- und Augenärzten entwickelt wurde, die sich intensiv dem Ziel der Früherkennung versteckter Sehstörungen widmen und das bereits seit 1996 in München erfolgreich zur Anwendung kommt. Anhand der Befunde und Risikofaktoren wurde dabei ein Leitfaden für die Dringlichkeit der augenärztlichen Untersuchung gestellt. Während im übrigen Bundesgebiet zuvor nur etwa 20% aller Kinder im Vorschulalter augenärztlich untersucht worden waren, hat sich die Zahl mit Beginn der Münchner Initiative vervierfacht.

Aufgerufen sind neben Kinderärzten und Ophtalmologen, denen die frühestmögliche Diagnose obliegt, um betroffenen Kindern eine keineswegs unerhebliche Minderung ihrer Lebensqualität zu ersparen, gerade auch die Eltern. Ihr Beitrag sollte zuerst einmal darin bestehen, das Angebot der gesetzlichen Vorsorgeuntersuchungen auch in Anspruch zu nehmen, ihre Kinder aber auch schon zu einem früheren Zeitpunkt, nämlich optimalerweise bis zum zweiten Lebensjahr, einer augenärztlich- orthoptistischen Untersuchung zuzuführen. Um weitere Erfolge auf dem Weg zu einer lückenlosen Früherkennung von Wahrnehmungsstörungen zu erzielen, ist es unerlässlich, eng mit den Eltern zu kooperieren, sie über die Entwicklung des Sehvermögens ihrer Kinder aufzuklären, über besondere Risiken zu informieren und Hinweise zu geben, worauf sie in besonderer Weise achten sollten, um selbst Auffälligkeiten an den Augen bzw. am Verhalten ihrer Babys und Kleinkinder zu erkennen. Nicht zuletzt liegt es auch an den Eltern, beim Augenarzt erlernte Übungen zu Hause regelmäßig mit den Kindern durchzuführen, um den Erfolg auch zu sichern.

Speziell die Eltern sollten angehalten werden, schon ihre Säuglinge aufmerksam in Hinblick auf eventuelle Störungen der Sehfähigkeit, auf Schielen etc. zu beobachten. So fällt es bereits sehr früh auf, wenn ein Kind beispielsweise nicht richtig in der Lage ist, ein Bild zu fixieren. Wichtig ist es daher, daß Mütter bzw. Väter auch gezielt von den betreuenden Kinderärzten nach diesem Umstand befragt werden. Auch Hebammen und Kinderschwestern sollten in den Prozeß der subjektiven Untersuchungsverfahren im Sinne einer gezielten Beobachtung miteinbezogen werden. Später dann ist es zudem Aufgabe von Lehrern, Erziehern und

Betreuern, spielerisch im Unterricht die verschiedenen Wahrnehmungsbereiche der Kinder sowie die Freude, die sich aus dem Erkunden der eigenen Sinne ergibt, zu fördern.

An die subjektive Einschätzung der Wahrnehmungsleistung folgen sollte im Anschluß ein Testverfahren zur objektiven Verifizierung des beobachteten Sachverhaltes. Um zu sehen, ob die erzielten Beobachtungen sich auch im Testverfahren beweisen lassen, ist daher die Durchführung eines ophthalmologischen Untersuchungsverfahrens unerlässlich; in dieser Hinsicht besteht überdies noch Nachholbedarf in Hinblick auf die Qualitätssicherung.

Nach erfolgter Diagnose einer visuellen Wahrnehmungsstörung gilt es, keine Zeit zu verlieren, sowohl in Bezug auf die Therapie der zugrunde liegenden Störung, als auch auf die Vermittlung und Initiierung einer an das jeweilige Kind individuell angepassten Frühförderung. Entscheidend ist es in diesem Zusammenhang auch, Kriterien für Therapieerfolge bzw. ein Versagen des angewandten Therapiekonzeptes, gegebenenfalls unter psychologischer Mithilfe, genau zu definieren.

Eine Möglichkeit auf dem Gebiet der Frühförderung und Reintegration stellt die „Sensorische Integrationstherapie“, die von der amerikanischen Psychologin Jean Ayres in den 70er- Jahren begründet wurde, dar. Die „Sensorische Integrationstherapie“, hervorgegangen aus dem Konzept der Ergotherapie, hat es sich zum Ziel gesetzt, eine normale Funktion von Körper, Geist und Seele (wieder-) herzustellen, um den gesamten Menschen in seiner Individualität am Leben teilhaben zu lassen.

Über die Stimulierung der Körperwahrnehmung durch Aktivierung der Basissinne soll es ermöglicht werden, dass der Patient in der Lage ist, seinen Alltag selbständig zu bewältigen. Gerade darin besteht meiner Meinung nach auch ein großer Vorteil dieses Therapiekonzeptes: an erster Stelle steht immer das Kind mit seinen ureigensten Bedürfnissen und Eigenarten. Jean Ayres' Anliegen war es, Wahrnehmungsprobleme stets im Kontext des gesamten Verhaltens zu verstehen, denn oft spielen bei Störungen im Wahrnehmungsbereich auch komplexe psychische Vorgänge eine nicht unerhebliche Rolle. So kann neben einer zugrundeliegenden Schädigung des zentralen und/oder peripheren Nervensystems eine Wahrnehmungsstörung auch äußerer Ausdruck einer psychischen bzw. sozialen Belastung sein. Wünschenswert wäre daher auch eine psychologische Mitbetreuung der Kinder bei Beurteilung und Therapie einer Wahrnehmungsstörung.

Auf keinen Fall zu kurz kommen darf im Sinne der „Sensorischen Integrationstherapie“ auch die Freude des Kindes daran, seine Sinne und damit sich selbst zu entdecken. Freude stellt wohl einen der - wenn nicht den - bedeutendsten Motivationsfaktor dar! Durch immer wieder neue Entdeckungen und Erfolgserlebnisse wird das Kind ermutigt, mehr und mehr

Erfahrungen mit sich und seiner Umwelt zu sammeln; auch ein ehemals schwaches Selbstwertgefühl kann sich nun hin zu nie geahnten Dimensionen entfalten.

Wenn auch ein Schwachpunkt der „Sensorischen Integrationstherapie“ zweifellos in Mängeln auf diagnostischer Ebene zu sehen ist und das Konzept dieses Therapieverfahrens nie evaluiert wurde, so stellt die „Sensorische Integrationstherapie nach Jean Ayres“ doch ein bemerkenswertes Reintegrationsmodell gerade auch auf dem Sektor visueller wie auch anderer Wahrnehmungsstörungen und Teilleistungsstörungen dar.

## Teil D

### Zusammenfassung

Es wird anhand der vorliegenden Arbeit folgendes Resümé gezogen:

- Empfindung und Wahrnehmung müssen von der Begrifflichkeit her unterschieden werden.
- Der Begriff der Wahrnehmung entsprechend dem heutigen Erkenntnisstand wird definiert und die unterschiedlichen Wahrnehmungsbereiche werden beschrieben.
- Einige (Teil-) Bereiche der Wahrnehmung entwickeln sich bereits pränatal. Es handelt sich hierbei in erster Linie um elementare Sinne, wie z. B. den Tastsinn, welcher u.a. auch der Partnersuche dient und den Erhalt der Gattung sichert. Diese Sinnesbereiche der Wahrnehmung werden früh ausgebildet. Anders verhält es sich mit Wahrnehmungsbereichen (z. B. Sehen und Hören etc.), die mehr auf Lernen und Erfahrung basieren.
- Die Entwicklung der kindlichen Wahrnehmung wird dargestellt. Sie ist bedeutsam für die Beurteilung der Entwicklung von Wahrnehmung im Allgemeinen. Es muss hierzu Detailwissen in der Praxis der Frühdiagnostik verfügbar sein, um Kinder mit Störungen frühzeitig identifizieren zu können.
- Die „Sensorische Integrationstherapie nach Jean Ayres“ setzt sich immer mehr im Bereich der Ergotherapie durch. Das Besondere an dieser Methode von Jean Ayres ist, „den gesamten Menschen am Leben teilhaben zu lassen“ und dies vor allem bei solchen Menschen – hier insbesondere Kindern –, die durch Wahrnehmungsstörungen auffallen (schlechte Fähigkeit zur Orientierung im Raum etc.). Jean Ayres' Anliegen war es, das betroffene Kind in die Lage zu versetzen, sich trotz Wahrnehmungsstörung den Anforderungen des Alltags erfolgreich zu stellen und anfallende Aufgaben selbständig zu verrichten. Gerade Kinder mit mentalen Entwicklungsstörungen, mit Störungen der Gehirnentwicklung, profitieren von frühzeitiger Therapie nach dieser Methode dann, wenn bei ihnen eine wie auch immer geartete Wahrnehmungsstörung diagnostiziert werden konnte. Das von Jean Ayres entwickelte Therapieverfahren setzt auf spielerische Art bei der Integration der verschiedenen Wahrnehmungsbereiche an. Auf diese Weise sollen Reaktionen des Kindes dem Reiz angemessen erfolgen. Die

„Sensorische Integrationstherapie“ erfolgt mittels einer Stimulierung der Körperwahrnehmung durch Aktivierung der Basissinne (z.B. Gleichgewichtssinn). Ein Schwachpunkt der Methode liegt allerdings in der nie erfolgten Evaluierung.

- Kritisch anzumerken ist: Für das Wissen von und um Wahrnehmung ist eine intensive und gründliche Diagnostik unerlässlich! Aus diesem Grund müssen Eltern und sämtliche mit der Aufsicht für das jeweilige Kind betraute Personen herangezogen werden, das Kind genau zu beobachten. Vorschnelle, die Eltern - und dann auch die Kinder - verunsichernde Diagnosen sind zu vermeiden. Erst Diagnostik, dann Diagnosestellung und dann erst Entwicklungstherapie zur Wahrnehmungsstörung - dieses Gesetz muss zukünftig weit stärker eingehalten werden.
- Es ist von allergrößter Bedeutung, jedes Kind zum frühestmöglichen Zeitpunkt einer Wahrnehmungsprüfung zuzuführen, da es nur durch eine intakte Sinnes- und Wahrnehmungstätigkeit zur umfassenden Erfahrung der Umwelt und Orientierung in der Umgebung kommen kann. So führt beispielsweise eine unerkannte schwere Hyperopie mit Astigmatismus dazu, dass das betroffene Kind kaum in der Lage ist, Einzelheiten in der näheren Umwelt zu erkennen. Das Resultat können schlechte schulische Leistungen trotz eines durchaus normalen oder sogar überdurchschnittlichen Intellekts darstellen. Die verheerenden Folgen lassen sich unschwer erahnen. Es kann sein, dass Kinder über lange Zeit ihr „Wahrnehmungsdefizit“ kompensieren. Steigt der Leistungsdruck z. B. in der Schule, werden solche Fehlentwicklungen zwar klinisch offenbar, vielfach aber falsch oder zu spät diagnostiziert.
- Es sind die Eltern, die täglich Umgang mit dem Kind pflegen und denen sich aus diesem Grund die beste Möglichkeit bietet, etwaige Wahrnehmungsstörungen als erste zu erkennen. Fachleute, denen das Kind präsentiert wird, sehen dieses nur ausschnittsweise in einer vielfach als „Laborsituation“ zu bezeichnenden Atmosphäre, z. B. im Rahmen einer Vorstellung beim Arzt, was einen umfassenden und korrekten Gesamteindruck in Bezug auf das Kind und alle Aspekte seiner Wahrnehmungsleistung erschwert. Daher muss den Eltern vermittelt werden, ihre Kinder sorgfältig und frühzeitig zu beobachten. Auch müssen Ärzte lernen, den Eltern zuzuhören, sie nach der Entwicklung zu befragen und dies im Detail, nicht auf die Schnelle, wie es vielfach üblich ist.

- Eltern vermuten oft bereits früh eine Wahrnehmungsstörung bei ihren Kindern, sind aber in Ermangelung entsprechender Kenntnisse als Laien nicht in der Lage, genauer zu differenzieren. Ihnen muß nahe gebracht werden, sich bereits beim leisesten Verdacht an Fachleute zu wenden.
- Vor der Einleitung einer adäquaten Therapie ist eine umfassende Diagnostik unverzichtbar! Diese muß nach dem aktuellsten Stand der Wissenschaft, ggf. unter Miteinbeziehung modernster neurophysiologischer Kenntnisse und im Einzelfall bildgebender Verfahren dann erfolgen, wenn ein hirnganischer Prozeß (Tumor) oder eine Fehlbildung diese Störung verursacht haben könnte.
- Die Therapie nach dem Konzept der „Sensorischen Integration nach Jean Ayres“ muss von qualifizierten Fachleuten angeboten und durchgeführt werden. Selbst die beste Therapie vermag eine umfassende vorherige Diagnostik nicht zu ersetzen. Grundsätzlich sollte weiterhin gelten, dass der Grundsatz „nil nocere“ gerade auch für Kinder mit vermuteten Wahrnehmungsstörungen ohne Wenn und Aber einzuhalten ist.

## Literaturverzeichnis

- 1 Aebli H.: Über die geistige Entwicklung des Kindes, Stuttgart, 1963
- 2 Aebli H.: Die geistige Entwicklung als Funktion von Anlage, Reifung, Umwelt und Erziehungsbedingungen, in: Roth H.(Hrsg.): Begabung und Lernen, Stuttgart, 1970
- 3 Affolter F.: Wahrnehmungsstörungen, in: Haupt U., Jansen G.W. (Hrsg.): Handbuch der Sonderpädagogik Bd. 8, S 298-307, Marhold, Köln, 1985
- 4 Affolter F.:Wahrnehmung, Wirklichkeit und Sprache, Neckar- Verlag, Villingen-Schwenningen, 1989
- 5 Aminoff MJ, Eisen AA: AAEM minimonograph 19: somatosensory evoked potentials. Muscle Nerve 1998 Mar; 21 (3): 277-90
- 6 Ayres A- J.: Lernstörungen, Sensorisch- integrative Dysfunktion, Berlin, 1979
- 7 Ayres A- J.: Bausteine der kindlichen Entwicklung, Springer - Verlag, Berlin Heidelberg, 1998
- 8 Bahill A. T., Stark L.: Sakkadische Augenbewegungen, in: 93, S 68-77
- 9 Berlit P.: Basiswissen Neurologie, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001
- 10 Biscaldi M., Fischer B., Hartnegg K. (2000): Voluntary saccade control in dyslexia Perception 29: 509-521
- 11 Böhme G., Welzl- Müller K.: Audiometrie. Hörprüfungen im Erwachsenen- und Kindesalter. Ein Lehrbuch. Hans Huber Verlag, Bern, 1998
- 12 Boring E.G.: Sensation and Perception in the History of Experimental Psychology, NewYork, 1942
- 13 Bründel H., Hurrelmann K.: Einführung in die Kindheitsforschung, Beltz Verlag, Weinheim, Basel, 1996
- 14 Bruggencate G. ten: Sensomotorik: Funktionen des Rückenmarks und absteigender Bahnen, in: 54, S 631-650
- 15 Campbell F. W., Maffei L.: Kontrast und Raumfrequenz, in: 93, S 132-139
- 16 Campenhausen Ch. von: Die Sinne des Menschen, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1981
- 17 Dargassies S.: The neuro- motor and psycho affective development of the infant, Elsevier, Amsterdam, New York, Oxford, 1986
- 18 Doering W. und W.: Sensorische Integration, borgmann publishing GmbH, Dortmund, 1993
- 19 Dracheneder W.: Der Developmental Test of Visual Perception 2 (DTVP-2)- ein neuer amerikanischer Frostig- Test, Teil I: Kritik am FEW, in: Ergotherapie + Rehabilitation 8/2001, S 15-19
- 20 Dracheneder W., Weiland G.: Der Developmental Test of Visual Perception 2 (DTVP-2) - ein neuer amerikanischer Frostig- Test, Teil II: Darstellung des DTVP-2 mit zwei Fallbeispielen, in: Ergotherapie + Rehabilitation 9/2001, S 16-24
- 21 Dyckman K.A., Mc Dowell J.E.: Behavioral plasticity of antisaccade performance following daily practice. Exp. Brain. Res. 2005 Mar; 162 (1): 63-9. Epub 2004 Nov 13.
- 22 Eisler R.: Historisches Wörterbuch der Philosophie. Bd. 3, Berlin, 1910
- 23 Eysel U.: Sehsystem, in: 54, S 585-610
- 24 Finke R. A.: Bildhaftes Vorstellen und visuelle Wahrnehmung, in: 93, S 178-185

- 25 Fischer B., May, H. (1970): Invarianzen in der Katzenretina: Gesetzmäßige Beziehungen zwischen Empfindlichkeit, Größe und Lage rezeptiver Felder von Ganglienzellen. *Exp- Brain- Res* 11: 448- 464
- 26 Fischer B., Weber H. (1993): Express Saccades and Visual Attention *Behav & Brain Sciences* 16, 3: 553- 567
- 27 Fischer B., Hartnegg K., Mokler A. (5/2000): Dynamic visual perception of dyslexic children. *Perception* 29: 523-530
- 28 Fischer B., Hartnegg K. (2002): Age effects in dynamic vision based on orientation identification. *Exp- Brain- Res* 143: 120-125
- 29 Fischer B., Schäfer J.(2002): Die Entwicklung der Simultanerfassung bei Rechenschwäche, in: die AKZENTE, Heft 57, Seiten 50-52
- 30 Fischer B.: Hören- Sehen- Blicken- Zählen: Teilleistungen und ihre Störungen Hans Huber Verlag, Bern, 2003
- 31 Fruhstorfer H.: Somatoviszzerale Sensibilität, in: 54, S 545-568
- 32 Fruhstorfer H.: Chemische Sinne, in: 54, S 611-622
- 33 Geldard F.A., Sherrick C.E.: Raum, Zeit und Tastsinn, *Spektrum der Wissenschaft Physiologie der Sinne* 9/1986, S 122-127
- 34 Geschwind N.: Aufgabenteilung in der Großhirnrinde, in: 93, S 26-35
- 35 Gibson J.J.: *The Perception of the Visual World*, Boston, 1950
- 36 Gibson J.J.: *The Senses Considered as Perceptual Systems*, Boston, 1966
- 37 Gillam B.: Geometrisch - optische Täuschungen, in: 93, S 104-112
- 38 Goldenberg, G.: *Neuropsychologie*, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm, 1998
- 39 Held R.: Plastizität sensorisch - motorischer Systeme, in:93, S 200-208
- 40 Henn, V.: Sensomotorik: supraspinale Mechanismen, in: 54, S 651-674
- 41 Henn, V.: Höhere Funktionen des Zentralnervensystems, in: 54, S 691-708
- 42 Helmholtz, H. von.: *Handbuch der physiologischen Optik* (1856) Engl: *Treatise on Physiological Optics* (1924), New York, 1962
- 43 Heubrock D., Petermann F., Jacobs C., Muth D.: Neuropsychologische Therapie Effizienz neuropsychologischer Therapie bei Kindern mit räumlich- konstruktiven Störungen: Psychometrische und psychosoziale Effekte, in: *Kindheit und Entwicklung Schwerpunkt: Klinische Kinderneuropsychologie*, 2/2001, S 105-113
- 44 Holzkamp K.: *Sinnliche Erkenntnis- Historischer Ursprung und gesellschaftliche Funktion der Wahrnehmung*, Frankfurt, 1973
- 45 Hubel D. H.: Das Gehirn, in: 93, S 16-25
- 46 Hubel D. H., Wiesel T. N.: Die Verarbeitung visueller Information; in: 93, S 36-47
- 47 Johansson G.: Visuelle Bewegungswahrnehmung, in: 93, S 168-177
- 48 Johnson M. H. (1995): The inhibition of anatomic saccades in early infancy. *Developmental Psychobiology* 28: 281- 291
- 49 Jüttner M., Osman E., Rentschler I.: Visuelles Lernen in virtuellen Realitäten, *Einsichten* Nr.18, 2/2000, S 22-25
- 50 Kerkhoff G., Genzel S., Marquardt C.(1994): Standardisierte Analyse visuell-räumlicher Wahrnehmungsleistungen (VS), *Nervenarzt* 65: 689-695
- 51 Kerkhoff G.: Räumlich- perzeptive, räumlich- kognitive, räumlich- konstruktive und räumlich- topographische Störungen, in: Sturm, Hermann, Wallesch: *Lehrbuch der klinischen Neuropsychologie*, Swets + Zeitlinger, Lisse, Niederlande, 2000, S 411-429
- 52 Kesper G., Hottinger C.: *Mototherapie bei sensorischen Integrationsstörungen*, Ernst Reinhardt Verlag, München, Basel, 1992
- 53 Klaus G., Buhr, M.(Hrsg.): *Philosophisches Wörterbuch*, Leipzig, 1969
- 54 Klinke R., Silbernagl S.: *Lehrbuch der Physiologie*; Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York, 1996

- 55 Klinke R.: Empfindungen - Wahrnehmungen  
Die Verarbeitungsprinzipien in Sinneskanälen, in: 54, S 623-630
- 56 Klinke R.: Hören und Sprechen: Kommunikation des Menschen, in: 54, S 569-584
- 57 Klix F.: Information und Verhalten, Bern, Stuttgart, 1971
- 58 Kolb B., Whishaw I.: Neuropsychologie, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, 1993
- 59 Kosing A.: Stichwort: Wahrnehmung, in: Klaus G., Buhr M.( Hrsg.), 1969
- 60 Kraft GH, Aminoff MJ, Baran EM: Somatosensory evoked potentials: clinical uses. AAEM Somatosensory Evoked Potentials Subcommittee. American Association of Electrodiagnostic Medicine. Muscle Nerve 1998 Feb; 21 (2): 252-8
- 61 Löwe A., Hildmann A.: Hörmessungen bei Kindern, Schindele- Verlag, Heidelberg, 1994
- 62 Mc Call R.B.: Infants, Cambridge / London, 1979
- 63 Miller P.: Theorien der Entwicklungspsychologie, Spektrum: Akademischer Verlag, Heidelberg, 1993
- 64 Milz I.: Neuropsychologie für Pädagogen, borgmann publishing GmbH, Dortmund, 1996
- 65 Mönks F.J., Knoers A.M.P.: Lehrbuch der Entwicklungspsychologie, Ernst Reinhardt GmbH und Co Verlag, München, 1996
- 66 Oerter M.: Entwicklungspsychologie, Psychologie Verlags Union, Weinheim, 1998
- 67 Oxford Dictionary of English Etymology, Oxford, 1966
- 68 Piaget J.: Die Bildung des Zeitbegriffes beim Kinde, Zürich, 1955
- 69 Piaget J.: Psychologie der Intelligenz, Zürich, 1963
- 70 Piaget J., Inhelder B.: Die Entwicklung des Zahlenbegriffs beim Kind, Stuttgart, 1965
- 71 Piaget J.: Das Erwachen der Intelligenz beim Kinde, Klett - Verlag, Stuttgart, 1969
- 72 Piaget J., Inhelder B.: Die Psychologie des Kindes, Walter-Verlag, Olten, 1972
- 73 Piaget J.: Der Aufbau der Wirklichkeit beim Kinde, Stuttgart, 1974
- 74 Poggio T.: Wie Computer und Menschen sehen, in: 93, S 78-89
- 75 Prosiegel M.: Neuropsychologische Störungen und ihre Rehabilitation, Richard Pflaum Verlag GmbH und Co, München, 1998
- 76 Ranachandran V.S., Anstis S.M.: Die Wahrnehmung von Scheinbewegung, Spektrum der Wissenschaft 8/1986
- 77 Regan D., Beverly K., Cynader M.: Die Wahrnehmung von Bewegungen im Raum, in: 93, S 90-103
- 78 Remschmidt H., Schmidt M.: Neuropsychologie des Kindesalters, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1981
- 79 Rock I.: Wahrnehmung, Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg, 1985
- 80 Schäffler T., Sonntag J., Fischer B. (2004): The effect of daily practice on low level auditory discrimination, phonological skills, and spelling in dyslexia. Dyslexia Volume 10, Issue 2, pages 119-130
- 81 Schäffler T., Sonntag J., Fischer B. (2003): Sprachfreies Hörtraining  
Transfer auf sprachgebundene Lautunterscheidung und Rechtschreibung, in: die AKZENTE, Heft 60, Seiten 19-21
- 82 Schenk- Danzinger L.: Entwicklungspsychologie, OBV Pädagogischer Verlag GmbH, Wien, 1996
- 83 Schraml W.J.: Einführung in die moderne Entwicklungspsychologie, Ernst Klett Verlag, Stuttgart, 1980
- 84 Singer W.: Hirnentwicklung und Umwelt, in: 93, S 186-199
- 85 Singer W.: Hirnentwicklung- neuronale Plastizität- Lernen, in: 54, S 709-720
- 86 Spitz R.A.: Vom Säugling zum Kleinkind, Deutsche Übersetzung, Stuttgart, 1967

- 87 Stadler M., Seeger F., Reithel A.: Psychologie der Wahrnehmung, Juventa Verlag, München, 1975
- 88 Straßburg H.- M., Dracheneder W., Kreß W.: Entwicklungsstörungen bei Kindern, Urban Fischer Verlag, München, Jena, 2000
- 89 Thurmain, Naggl: Praxis der Frühförderung, München, Basel (Reinhardt utb), 2003
- 90 Trautner M.: Lehrbuch der Entwicklungspsychologie Band 1; Verlag für Psychologie Dr. C.J. Hogrefe, Göttingen, 1978
- 91 Treisman A.: Merkmale der Gegenstände in der visuellen Verarbeitung, Spektrum der Wissenschaft: Gehirn und Kognition, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, 1992
- 92 Vaishnavi S., Calhoun J., Chatterjee A.: Crossmodal and sensorimotor integration in tactile awareness, Neurology 1999; 53: 1596-1598
- 93 Wahrnehmung und visuelles System, Spektrum- der- Wissenschaft-Verlagsgesellschaft, Heidelberg, 1986
- 94 Wallach H.: Wahrgenommene Stabilität der Umgebung und Eigenbewegung, in: 93, S 114-121
- 95 Watson J.B.: Behaviorism, New York, 1930
- 96 Weber H., Fischer B., Biscaldi M. (1994): Differential effects of randomization on the occurrence of human express saccades. Soc Neurosci Abstr 1: (107.1) – 233
- 97 Wurtz R. H., Goldberg M. E., Robinson D. L.: Neuronale Grundlagen der visuellen Aufmerksamkeit, in: 93, S 58-66
- 98 Zimmer R.(1995): Handbuch der Sinneswahrnehmung, Freiburg

#### Internetquellen:

- 99 [www.foerderplanet.de](http://www.foerderplanet.de)
- 100 [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- 101 [www.medinfo.de](http://www.medinfo.de)
- 102 [www.m-ww.de](http://www.m-ww.de)
- 103 [www.augenratgeber.de](http://www.augenratgeber.de)
- 104 [www.orthoptistinnen.de](http://www.orthoptistinnen.de)
- 105 [www.e-learning.studmed.unibe.ch](http://www.e-learning.studmed.unibe.ch)
- 106 [www.uni-tuebingen.de](http://www.uni-tuebingen.de)
- 107 [www.swiss-paediatrics.org](http://www.swiss-paediatrics.org)
- 108 [www.dkv.netdokter.de](http://www.dkv.netdokter.de)
- 109 [www.medizin-netz.de](http://www.medizin-netz.de)
- 110 [www.neuro24.de](http://www.neuro24.de)
- 111 [www.augeninfo.de](http://www.augeninfo.de)
- 112 [www.agki.tzi.de](http://www.agki.tzi.de)
- 113 [www.fruehfoerderung-bayern.de](http://www.fruehfoerderung-bayern.de)
- 114 [www.klugekinder.at](http://www.klugekinder.at)
- 115 [www.kinderzentrum.de](http://www.kinderzentrum.de)
- 116 [www.stangl-taller.at](http://www.stangl-taller.at)
- 117 [www.karg-stiftung.de](http://www.karg-stiftung.de)
- 118 [www.sign-lang.uni-hamburg.de](http://www.sign-lang.uni-hamburg.de)
- 119 [www.uni-weimar.de](http://www.uni-weimar.de)
- 120 [www.aap.org](http://www.aap.org)
- 121 [www.uni96.htm](http://www.uni96.htm)
- 122 [www.optomotorik.de](http://www.optomotorik.de)
- 123 [www.tomdoch.de](http://www.tomdoch.de)

- 124 [www.ph-heidelberg.de](http://www.ph-heidelberg.de)  
125 [www.psychonews.blogspot.com](http://www.psychonews.blogspot.com)  
126 [www.ads-kritik.de](http://www.ads-kritik.de)  
127 [www.mpiwg-berlin.mpg.de](http://www.mpiwg-berlin.mpg.de)

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1:** Poggio, T.: Wie Computer und Menschen sehen; in: Wahrnehmung und visuelles System, Spektrum- der- Wissenschaft- Verlagsgesellschaft, Heidelberg, 1986, S 81
- Abbildung 2:** Poggio, T.: Wie Computer und Menschen sehen; in: Wahrnehmung und visuelles System, Spektrum- der- Wissenschaft- Verlagsgesellschaft, Heidelberg, 1986, S 82
- Abbildung 3:** Gillam, B.: Geometrisch- optische Täuschungen; in: Wahrnehmung und visuelles System, Spektrum- der- Wissenschaft- Verlagsgesellschaft, Heidelberg, 1986, S 107
- Abbildung 4:** [www.sensoryint.com](http://www.sensoryint.com)
- Abbildung 5:** [www.augeninfo.de](http://www.augeninfo.de)
- Abbildung 6:** [www.augeninfo.de](http://www.augeninfo.de)
- Abbildung 7:** [www.augeninfo.de](http://www.augeninfo.de)
- Abbildung 8:** [www.augeninfo.de](http://www.augeninfo.de)
- Abbildung 9:** [www.augeninfo.de](http://www.augeninfo.de)
- Abbildung 10:** [www.netf.no](http://www.netf.no)

## **Danksagung**

Danken möchte ich an dieser Stelle all jenen, die mir bei der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit zur Seite gestanden haben. Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. med. Dr. h. c. Hubertus von Voß, Ärztlicher Direktor im Kinderzentrum und Institut für Soziale Pädiatrie und Jugendmedizin der Universität München, der mir das Thema dieser Arbeit zur Verfügung gestellt und mich über den ganzen Zeitraum hinweg begleitet hat. Ihm verdanke ich es, dass ich meine Einblicke in die Kindheitsforschung vertiefen und neue Erfahrungen auf diesem Gebiet sammeln durfte; er verstand es, mein Interesse für diesen Zweig der Medizin weitergehend zu wecken.

Danken möchte ich auch allen Mitarbeitern des Kinderzentrums Großhadern, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben, allen voran Frau Irmgard Wilfurth für ihre freundliche und kompetente Betreuung.

Weiterhin bedanken möchte ich mich bei all meinen Freunden, die mir während der Verfassung der vorliegenden Arbeit stets geduldig, verständnisvoll und konstruktiv zur Seite standen.

Ganz besonderer Dank gebührt nicht zuletzt meinen Eltern, Herwig und Gabriele Lugmair, für den nötigen Rückhalt und die liebevolle und großzügige Unterstützung während meiner gesamten Ausbildung, sowie meinem Bruder Sebastian, der durch seine motivierende Haltung und engagierte Hilfe, gerade auch auf technischem Gebiet, zur Fertigstellung dieser Arbeit maßgeblich beitrug.

## Lebenslauf

**Name:** Katherina Maria Lugmair

**Geburtsdatum:** 30.08.1977

**Geburtsort:** Rosenheim

**Staatsangehörigkeit:** deutsch

**Familienstand:** ledig

### Schulabschluß:

05/1997 Abitur am Gymnasium der Englischen Fräulein Altötting

### Studium:

11/1997- 10/2003 Studium der Humanmedizin

WS 1997- SS 1999 Ludwig- Maximilians- Universität München

WS 1999- SS 2003 Technische Universität München

### Staatsexamen:

08/1999 Ärztliche Vorprüfung

08/2000 1. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

09/2002 2. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

10/2003 3. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

### Dissertation:

Seit 03/ 2001 am Institut für Soziale Pädiatrie und Jugendmedizin der Ludwig-  
Maximilians- Universität München

### Praktisches Jahr:

10/2002- 02/2003 Innere Medizin, Gastroenterologische Abteilung, Krankenhaus  
München- Bogenhausen

02/2003- 05/2003 Psychiatrie, Klinikum rechts der Isar, München

05/2003- 09/2003 Chirurgie, Krankenhaus der Barmherzigen Brüder, München

**Ärztin im Praktikum und Assistenzärztin:**

06- 09/2003           Ärztin im Praktikum im Zentrum für Naturheilkundliche  
Forschung der TU München (ZNF)

10/11 2003           Assistenzärztin im ZNF

seit 02/2004         Assistenzärztin in der Abteilung für Toxikologie des Klinikums  
rechts der Isar