Entwurf und Erprobung eines PC-basierten Systems zur Diagnose und Therapie von Störungen der lexikalischen Sprachverarbeitung und des räumlichen Hörens

Frank Artinger

Der Fakultät für Elektrotechnik
der Universität der Bundeswehr München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegte Dissertation

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung **1**

2 Einleitung und Inhaltsübersicht **5**

3 Neuropsychologie der Sprachverarbeitung und Raumrepräsentation **9**

3.1 Ursachen und Auswirkungen erworbener Hirnschädigungen 9

3.2 Kognitive und klinische Neuropsychologie 10

3.2.1 Beobachtung und Theorie 10

3.2.2 Neuropsychologische Diagnose und Therapie 12

3.2.3 Interdisziplinäre Ansätze in der klinisch-experimentellen Forschung 15

3.3 Dominanz visueller Forschungsansätze 15

3.4 Neuronale Rauminformationsverarbeitung 17

3.4.1 Transformationsmodell der Raumrepräsentation 17

3.4.2 Störungsformen der Rauminformationsverarbeitung 19

3.4.3 Erklärungskonzepte 24

3.4.4 Diagnose und Therapie der Neglect-Störung 24

3.4.5 Stand der experimentellen Forschung 27

3.5 Neuropsychologie der Sprache 29

3.5.1 Sprachfähigkeit 29

3.5.2 Ebenen der Sprachverarbeitung 30

3.5.3 Sprachverarbeitungsprozesse auf Wortebene 33

3.5.4 Störung der Sprachfähigkeit durch Aphasie 41

3.5.5 Therapie von Wortabrufstörungen 45

3.5.6 Stand der experimentellen Forschung 48

4 Psychoakustik des räumlichen Hörens 49

4.1 Einführung und Interesse am räumlichen Hören 49

4.1.1 Definitionen und Vereinbarungen 50

4.1.2 Randbedingungen 51

4.2 Lokalisationsfähigkeit des menschlichen Gehörs 55

4.2.1 Räumlich-akustisches Auflösungsvermögen 55

4.2.2 Hören in der Horizontalebene 56

4.2.3 Hören in der Medianebene 58

4.2.4 Lokalisationsfehler 60

4.3 Lokalisationsquellen 61

4.3.1 Interaurale Merkmale (ITD/IPD und IID/ILD) 61

4.3.2 Monaurale Merkmale („spectral cues") 62

4.3.3 Interaurale vs. monaurale Merkmale 64

4.3.4 Zusätzliche Einflußgrößen des räumlichen Hörens 64

4.4 Systemtheorie der binauralen Simulation 66

4.4.1 Grundgedanke der binauralen Simulation 66

4.4.2 Schallwellenempfang am Ohr 66

4.4.3 Prinzip der HRTF (head-related-transfer-function) 69

4.4.4 Messung der HRTF 70

4.4.5 Binaurales Simulationssystem 73

4.4.6 Psychoakustische Validität 73

4.5 Psychoakustische Effekte 75

4.5.1 Im-Kopf-Lokalisiertheit (IKL) 75

4.5.2 Gesetz der ersten Wellenfront 76

5 Systementwurf und technische Realisierung von CompX 79

5.1 Ziele und Anforderungen 79

5.1.1 Rechnergestützte Systeme in der klinischen Neuropsychologie . . 79

5.1.2 Forschungsansatz und Zielsetzung 81

5.1.3 Klinische Randbedingungen der Systementwicklung 83

5.2 Aufbau und Komponenten des Systems 88
5.2.1 System- und Softwarearchitektur 88
5.2.2 Datenbankkonzept und Datenmodellierung 95
5.2.3 Hardwarearchitektur 101
5.2.4 Systemplattform und Entwicklungswerkzeuge 103
5.3 Module der Audiosignalverarbeitung 107
5.3.1 Signalverarbeitung im Zeit- und Frequenzbereich 107
5.3.2 Maskierung akustischer Signale 110

6 Binaurales Simulationsmodul SPATIAL TOOLBOX 115
6.1 Problemstellung und Lösungsansatz 115
6.1.1 Klinische Rahmenbedingungen und Anforderungen 115
6.1.2 Lösungsansatz 119
6.1.3 Lösungsweg 123
6.2 Aufbau und Gestaltung 125
6.2.1 Konfigurationsparameter 125
6.2.2 Entzerrungsnetzwerk 129
6.3 Technische Realisierung 131
6.3.1 Struktur des Systems 131
6.3.2 Analyse der HRIR-/HRTF-Daten 133
6.3.3 Entzerrungsstrategie und Filterdesign 139

7 Systemmodul „Wortabruf" 145
7.1 Problemstellung und Lösungsansatz 145
7.1.1 Zielsetzung des Moduls 147
7.1.2 Voraussetzungen 147
7.1.3 Experimenteller Ansatz 148
7.2 Aufbau und Gestaltung 150
7.2.1 Struktur des Moduls 150
7.2.2 Untersuchungsablauf und Bedienung 153
7.2.3 Experimentkonfiguration 155

7.2.4 Experimentdurchführung 163
7.2.5 Experimentauswertung 167
7.3 Klinische Anwendung 168
7.3.1 Methodisches Vorgehen 169
7.3.2 Phonologisches Therapieverfahren 171
7.3.3 Semantisches Therapieverfahren 172
7.3.4 Weitere Anwendungsmöglichkeiten 173

8 Systemmodul „Akustische Raumrepräsentation" 175
8.1 Problemstellung und Lösungsansatz 175
8.1.1 Zielsetzung des Moduls 177
8.2 Experimentelle Parameter 178
8.2.1 Experimentelle Basisparameter 178
8.2.2 Modulationsparameter 180
8.3 Aufbau und Gestaltung 182
8.3.1 Struktur des Moduls 182
8.3.2 Untersuchungsablauf und Bedienung 185
8.3.3 Experimentkonfiguration 188
8.3.4 Experimentdurchführung 194
8.3.5 Experimentauswertung 196
8.4 Experiment I: „Richtungsidentifikation" 198
8.4.1 Diagnostische Ziele und Hypothesen 199
8.4.2 Struktur und Leistungsmerkmale des Experiments 199
8.4.3 Erkenntnisse aus dem klinischen Einsatz 206
8.5 Experiment II: „Einstellen der räumlich-akustischen Mitte" 209
8.5.1 Diagnostische Ziele und Hypothesen 209
8.5.2 Struktur und Leistungsmerkmale des Experiments 210
8.5.3 Erkenntnisse aus dem klinischen Einsatz 216
8.6 Experiment III und IV: „Lokalisation" und „Räumlich-akustisches Arbeitsgedächtnis" 222
8.6.1 Diagnostische Ziele und Hypothesen 222

8.6.2 Struktur und Leistungsmerkmale der Experimente 223
8.6.3 Klinische Anwendung 227
8.7 Experiment V: „Intensitäts-/Zeitdauer-/Frequenzdiskrimination" 228
8.7.1 Diagnostische Ziele und Hypothesen 228
8.7.2 Struktur und Leistungsmerkmale des Experiments 229
8.7.3 Struktur des Experiments „Intensitäts-/Zeitdauer-/Frequenzdiskrimination" 229
8.7.4 Klinische Anwendung 233

9 Ausblick **235**

Literaturverzeichnis **237**

Kapitel 1

Zusammenfassung

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht der Entwurf, die Realisierung und die Erprobung des PC-basierten Systems CompX, mit dem neue Untersuchungs- und Behandlungsverfahren für hirngeschädigte Patienten mit Sprachstörungen und Störungen in der Verarbeitung räumlicher Informationen entwickelt wurden.

Die klinische Behandlung beider Störungsformen konzentriert sich bislang auf die Verarbeitung visueller Information. So wird in der Therapie von Sprachstörungen fast ausschließlich schriftsprachliches oder bildhaftes Reizmaterial verwendet, das mit konventionellen Hilfsmitteln herstellbar ist. Gleiches gilt für die Diagnostik räumlicher Verarbeitungsstörungen, die sich auf den visuellen bzw. taktilen Sinneskanal beschränkt.

Dies war der Auslöser für die Entwicklung von *Comp*X, ein *interdisziplinäres* Projekt, das die bestehende „Lücke" in der *experimentellen Untersuchung akustischer Verarbeitungsleistungen* schließt. Das System ist das Ergebnis einer langjährigen erfolgreichen Zusammenarbeit mit der *Entwicklungsgruppe Klinische Neuropsychologie* (EKN) des Städtischen Krankenhauses München-Bogenhausen, in der Synergieeffekte zwischen ingenieurwissenschaftlichen und medizinisch/psychologischen Disziplinen gewinnbringend genutzt werden konnten (s. Abb. 1.1).

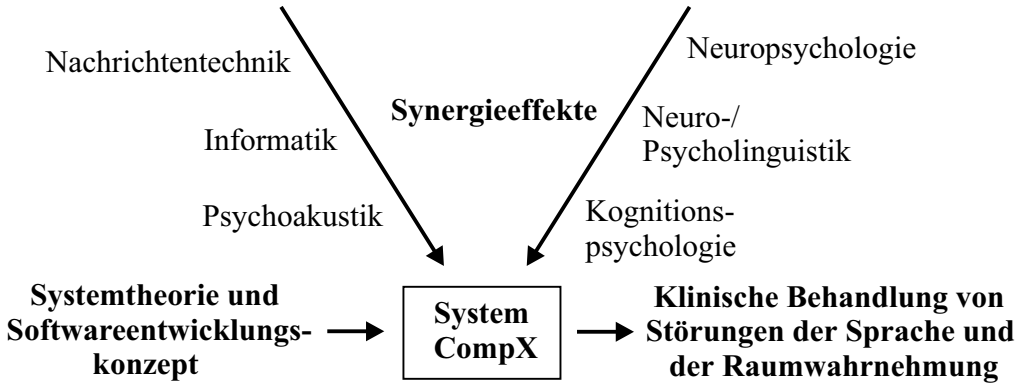


Abbildung 1.1: Motivation und Ansatz dieser Arbeit

Die Lösung dieser komplexen Aufgabenstellung erforderte zunächst eine *umfangreiche Problemanalyse* und *intensive Auseinandersetzung* mit den in den beteiligten Disziplinen (s. Abb. 1.1) verwendeten Methoden und Begriffen. Insbesondere das Verstehen der Prozesse bei der Sprachproduktion und der Verarbeitung räumlicher Informationen war eine Grundvoraussetzung für die Entwicklung computerunterstützter experimenteller Anwendungen an der Schnittstelle der klinisch-neuropsychologischen Forschung.

Der aufwendigste praktische Anteil dieser Arbeit bestand in der *schrittweisen System- und Softwareentwicklung* von *Comp*X. Als besonders schwierig gestaltete sich die Bewertung und systemtechnische Integration oftmals konkurrierender Anforderungen, die aus der ständigen Diskussion mit den klinischen Anwendern in unterschiedlichen Entwicklungsstadien hervorgingen. Eine Folge davon war, daß die Konzeption des Systems fortwährend überdacht und weiterentwickelt werden mußte. Dabei erwies sich das gewählte *evolutionäre* Vorgehensmodell (*Objektorientierter Entwicklungsprozeß*) als besonders vorteilhaft. Durch die Verwendung der Programmiersprache „C++" und einer RAD-Entwicklungsumgebung (Rapid Application Development) konnten zahlreiche Experimententwürfe als konkrete Prototypen mit überschaubarem Aufwand realisiert werden. In der klinischen Erprobung erwiesen sich einige Entwürfe als impraktikabel, während andere aufgegriffen und in ihrer Funktion und Bedienung fortlaufend optimiert wurden.

Im Ergebnis erhält der Diagnostiker und Therapeut ein Instrument mit einer *modularen ausbaufähigen Systemarchitektur*, das durch folgende Leistungsmerkmale charakterisiert ist:

- Multimediales System, in dessen Mittelpunkt die Erstellung innovativer Experimente mit akustischem Reizmaterial steht
- gezielte Variation akustischer Signalparameter durch Verfahren der digitalen Audiosignalverarbeitung
- psychoakustisch valide Simulation eines räumlichen Höreindrucks über eine stereophone Kopfhörerdarbietung
- flexibel anpassbares Experimentdesign (Experimentstruktur, Bildschirmgestaltung, Eingabegeräte für die Patientenantwort)
- strukturierte Organisation umfangreicher Experimentdaten durch eine Datenbankanwendung (relationales Datenmodell mit 32 Einzeldatenbanken)
- ausführliche Protokollierung der Performanz des Patienten
- leichte, intuitive und daher rasch erlernbare Bedienbarkeit des Systems (graphische Benutzerführung)

*Comp*X besteht aus den beiden Systemmodulen WORTABRUF und AKUSTISCHE RAUMREPRÄSENTATION, denen sämtliche experimentelle Anwendungen zugeordnet sind. Ferner verfügt das System über das separate Modul SPATIAL TOOLBOX für die Simulation des räumlichen Höreindrucks.

Mit den entworfenen Experimenten im Systemmodul WORTABRUF wird gezielt die *Produktion von Wörtern* trainiert. Die Aufgabe des Patienten besteht darin, Objekte (Bilder, geschriebene Wörter, akustische Signale z.B. Umweltgeräusche) mündlich zu benennen. Im Fall einer nicht erfolgten Benennung, bietet das System dem Patienten zusätzliche Teilinformation über die Bedeutung (semantisch) oder die Form (phonologisch) des gesuchten Wortes an. Die integrierten Komponenten der digitalen Audiosignalverarbeitung (s. Abschnitt 5.3) erlauben dabei erstmals die systematische Überprüfung der Wirksamkeit *phonologischer Verfahren*, die bislang vernachlässigt wurden. Dazu wird linguistisch relevante Teilinformation im Sprachsignal des gesuchten Wortes auf folgende Arten gewonnen und abgestuft:

- Fensterung im Zeitbereich

  Durch stufenloses Ausschneiden von Sprachsegmenten im *Signaleditor* können z.B. die Anfangsphoneme des Wortes (unter Beibehaltung koartikulatorischer Information) für die Erstellung von *Anlauthilfen* verwendet werden.

- Filterung im Frequenzbereich

  Die flexible Wahl der Filtercharakteristik im *Filtermodul* ermöglicht die *Abstufung der Sprachverständlichkeit*. Mittels extremer Tiefpaßfilterung ($f_G \approx$ Sprachgrundfrequenz) kann dem Patienten z.B. isoliert Information über die Silbenanzahl und den Betonungsverlauf angeboten werden.

- Überlagerung mehrerer Signale (Störschall/Nutzschall-Situation)

  Die Mehrspurfähigkeit des *Maskierungsmoduls* ermöglicht die Simulation natürlicher Bedingungen erschwerter Wortverarbeitung (z.B. mehrere aktive Sprecher).

Das entwickelte Systemmodul AKUSTISCHE RAUMREPRÄSENTATION ist ein diagnostisches Werkzeug, mit dem *räumliche Hörleistungen* erstmals systematisch mit einer kontrollierten Ablaufsteuerung unter klinischen Bedingungen analysiert werden können. In insgesamt fünf Einzelexperimenten wird ein breiter Bereich räumlich-akustischer Wahrnehmungs- und Gedächtnisleistungen abgedeckt. Die größte Herausforderung bestand in der Entwicklung eines *systemtheoretischen Konzeptes*, das die Erzeugung des räumlichen Höreindrucks mit klinisch vertretbarem Aufwand ermöglicht. Das Ergebnis ist das Modul SPATIAL TOOLBOX, ein *binaurales Simulationssystem* in digitaler Realisierung, mit dem es gelingt, räumliches Hören über eine 2-kanalige (stereophone) *Kopfhörerdarbietung* zu simulieren. Der Entwurf eines *binauralen Richtungsfilters* (zweikanaliges FIR-Filter) sorgt dabei für die Codierung der Richtungsinformation im digitalen Signal. Die Verwaltung der *richtungsabhängigen Filterkoeffizienten* erforderte aufgrund der hohen Anzahl simulierbarer Schallquellenpositionen (710, 5°-Auflösung im Minimum) die Entwicklung eines Datenbankkonzeptes. Das implementierte *Entzerrungsnetzwerk* erlaubt im Anschluß daran eine von der individuellen Untersuchungsbedingung abhängige Optimierung des Höreindrucks.

Die Vorteile des *kopfhörerbezogenen räumlichen Höreindrucks* werden derzeit für weiterführende Untersuchungen genutzt, in denen der *modulierende Einfluß* physikalischer

und kognitiver Größen auf die räumlich-akustische Wahrnehmung (z.B. Augenposition, Stimulation der Nackenmuskulatur, variable Dämpfung eines Ohrs) experimentell analysiert wird. Ergebnisse daraus sollen zur Entwicklung therapeutischer Ansätze für die schwer zu behandelnden Störungen der räumlichen Informationsverarbeitung genutzt werden.

Die regelmäßige und in unterschiedlichen Entwicklungsstadien stattfindende klinische Erprobung des Systems mit Patienten des Städtischen Krankenhauses München-Bogenhausen verdeutlichte in zahlreichen Anwendungen den besonderen Stellenwert der *Patient-System-Schnittstelle*. Als sehr vorteilhaft erwies sich die Verwendung eines *berührungssensitiven Bildschirms* als Eingabegerät bei Experimenten, die keine Reaktionszeitmessung erfordern. Probleme mit der *Gestaltung des Aufgabenbildschirms* traten bei Patienten mit räumlichen Verarbeitungsstörungen auf, die oftmals überlagerte visuelle Defizite besaßen und relevante Teile des Bildschirms nicht wahrnehmen konnten (z.B. eine Bildschirmhälfte). Aufgrund dieser Erfahrungen wurde der Aufgabenbildschirm systemseitig in Elemente zerlegt, die durch den Untersucher flexibel ausgewählt und positioniert werden können.

Mit über 400 Einzeluntersuchungen hat sich *Comp*X zwischenzeitlich als fester Bestandteil in mehreren Arbeitsgruppen der EKN etabliert und wird sowohl in der klinisch-experimentellen Forschung als auch im klinischen Alltag eingesetzt. Insbesondere die experimentellen Ergebnisse zum räumlichen Hören konnten zur Gewinnung *grundlegender neuropsychologischer Erkenntnisse* beitragen.

Die kontrollierten Experimente zur räumlich-akustischen Verarbeitung bieten darüber hinaus das Potential für *neurophysiologische Untersuchungen*. In einer Zusammenarbeit mit der Universität Bielefeld ist geplant, die hemisphärenabhängige Hirnaktivität während des Hörexperiments mit Ultraschallverfahren (transcranielle Dopplersonographie, TCD) zu bestimmen. Diese direkte und unmittelbare Messung von Vorgängen im Gehirn ergänzt die verhaltensorientierte experimentelle Vorgehensweise im Rahmen dieser Arbeit.

Kapitel 2

Einleitung und Inhaltsübersicht

Den Ausgangspunkt für die vorliegende Arbeit bildet die Suche nach neuen Anwendungsfeldern der modernen Informations- und Computertechnik. Es können dabei zwei Feststellungen gemacht werden:

- Ingenieure nutzen den technischen Fortschritt zur Entwicklung hochspezialisierter Systemlösungen.
- Der Einsatz erarbeiteter Lösungen ist häufig auf spezielle Aufgaben und Disziplinen beschränkt.

Eine Folge davon ist, daß der tatsächliche Nutzen einer Systemlösung unter Umständen nur teilweise erschlossen wird. Zur Umgehung dieser Einschränkung werden *interdisziplinäre Forschungsansätze* benötigt, die an der Schnittstelle mehrerer Disziplinen versuchen, *Synergieeffekte zu erkennen* und *Konzepte für deren Nutzbarkeit* zu entwickeln. Synergieeffekte sind auf mindestens zwei Arten möglich: Erstens durch einen unmittelbaren Technologietransfer von einer Disziplin in eine andere, zweitens dadurch, daß die Anwendung einer technischen Systemlösung, die in einer Disziplin entwickelt wurde, in einer anderen entweder erstmalig entdeckt oder durch sie erweitert wird.

Diese Arbeit beschäftigt sich intensiv mit der Entwicklung und Erprobung *computerunterstützter Behandlungsverfahren für hirngeschädigte Patienten.* Obwohl in diesem interdisziplinären Forschungsgebiet schon zahlreiche Erfahrungen gesammelt werden konnten (z.B. [Fin90, Ahr94, Tei95]) ergeben sich durch die fortschreitende Entwicklung in der Technik und der Medizin (hier speziell der Neuropsychologie) neue Anwendungsmöglichkeiten bzw. Anforderungen.

Die Überlegungen konzentrieren sich zum einen auf den Entwurf einer modularen und ausbaufähigen *Systemarchitektur*, die auf einer Datenbankanwendung basiert und die Randbedingungen des klinischen Umfeldes berücksichtigt. Zum anderen werden *kontrollierte experimentelle Anwendungen* in zwei Kernbereichen der klinischen Neuropsychologie entwickelt:

- Diagnose und Therapie von Sprachstörungen (Aphasien)
- Diagnose und Therapie von räumlichen Störungen

Sowohl die Therapie von Sprachstörungen als auch die Diagnose räumlicher Störungen ist bislang überwiegend durch visuelle Verfahren gekennzeichnet, die meist ohne technische Hilfe mit konventionellen Mitteln realisiert werden (z.B. Schrift- und Bildkarten). Mit den Entwicklungen in dieser Arbeit wird gezielt das Entwicklungspotential *akustischer Untersuchungs- und Behandlungsverfahren* in diesen Bereichen aufgezeigt.

Das PC-basierte System *Comp*X ist das Ergebnis einer langjährigen erfolgreichen Zusammenarbeit mit der *Entwicklungsgruppe Klinische Neuropsychologie* (EKN) des Städtischen Krankenhauses München-Bogenhausen. In zwei Systemmodulen (WORTABRUF, AKUSTISCHE RAUMREPRÄSENTATION) werden mehrere Einzelexperimente für die gezielte Überprüfung akustischer Verarbeitungsleistungen entwickelt. Diese Experimente erfordern technische Möglichkeiten, mit denen klinisch relevante Parameter des akustischen Signals variiert werden können. Zu diesem Zweck besitzen beide Module den Zugriff auf Komponenten der *digitalen Audiosignalverarbeitung*, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und in das System integriert wurden.

Als Voraussetzung für die Untersuchung *räumlicher Hörleistungen* wird das Modul SPATIAL TOOLBOX realisiert, das die Erzeugung eines räumlichen Höreindrucks über Kopfhörer mit *klinisch vertretbarem Aufwand* ermöglicht. Räumliches Hören wird dabei als *nachrichtentechnisches System* aufgefaßt, mit dem die richtungs- und entfernungsabhängigen Verzerrungen der Schallsignalübertragung von der Schallquelle (Sender) bis zum Empfänger (Trommelfell) beschrieben werden. Unter Kopfhörerbedingungen wird nun versucht, die Signalverhältnisse am Trommelfell so zu simulieren, daß sie denen beim Hören in freier Umgebung entsprechen. Wie noch gezeigt wird, besitzt dieses Verfahren neben den geringen apparativen Anforderungen weitere Vorteile, welche die Behandlung räumlicher Störungen begünstigen.

Diese Arbeit richtet sich einerseits an den *Ingenieur*, der sich mit der Konstruktion computerunterstützter Systeme in einem neuropsychologischen Anwendungsfeld beschäftigt. Andererseits werden *Mediziner und Psychologen* angesprochen, die in der klinischen Praxis hirngeschädigter Patienten tätig sind. Bei der Erstellung der Arbeit wurde besonderer Wert darauf gelegt, beiden Berufsgruppen gerecht zu werden. Experten des einen oder anderen Gebietes mögen daher Verständnis für die an einigen Stellen sehr ausführlichen Erläuterungen haben, die dem interdisziplinär interessierten Kollegen den Einstieg erleichtern sollen.

Inhaltsübersicht

Kapitel 3 behandelt die *neuropsychologischen Grundlagen* der betrachteten Störungsformen. Nach einigen methodischen Erläuterungen zeigt ein Vergleich von Untersuchungsansätzen in der klinisch-experimentellen Forschung das Überwiegen von Konzepten, die sich auf die visuelle Verarbeitung beziehen (s. Abschnitt 3.3). Die anschlie-

ßende Erläuterung von Prozessen der Sprachverarbeitung und der Verarbeitung räumlicher Informationen an neuropsychologischen Modellen führt an den aktuellen Stand der Diagnostik und Therapie heran, der Ausgangspunkt für die Systementwicklung ist.

In *Kapitel 4* wird die Funktionsweise des *räumlichen Hörens* erklärt. Ausgehend von der Frage, wie gut das räumliche Hören beim Menschen ausgeprägt ist, werden die Merkmale erläutert, die das räumliche Hören ermöglichen (Lokalisationsquellen). Neben physikalischen Parametern werden Abhängigkeiten von kognitiven Einflußgrößen aufgezeigt, die besondere Bedeutung bei der Untersuchung räumlich-akustischer Störungen besitzen. Abschnitt 4.4 behandelt das psychoakustische Verfahren der *binauralen Simulation*, das die Grundlage für die Entwicklung des Simulationsmoduls SPATIAL TOOLBOX in Kapitel 6 ist.

Die folgenden *Kapitel 5 bis 8* stellen die *Konzeption* und die *Realisierung* des entwickelten Systems *Comp*X vor. Das System ist modular aufgebaut und besteht aus den beiden Systemmodulen WORTABRUF und AKUSTISCHE RAUMREPRÄSENTATION, denen die experimentellen Anwendungen zugeordnet sind, sowie dem Simulationsmodul SPATIAL TOOLBOX.

Kapitel 5 erläutert den gewählten *Forschungsansatz* und stellt die *System- und Softwarearchitektur* von *Comp*X vor. Besondere Bedeutung besitzt die *Systemdatenbank*, deren Struktur und logisches Modell in Abschnitt 5.2.2 beschrieben wird. *Comp*X enthält integrierte Komponenten der digitalen Audiosignalverarbeitung, die durch beide Systemmodule genutzt werden. Abschnitt 5.3 beschreibt deren Realisierung und erläutert die Möglichkeiten, mit denen akustische Signalparameter gezielt und an die klinischen Bedürfnisse angepaßt variiert werden können.

Im Mittelpunkt von *Kapitel 6* steht das Simulationsmodul SPATIAL TOOLBOX. Dieses Modul schafft durch die Erzeugung eines räumlichen Höreindrucks über eine 2-kanalige stereophone Kopfhörerdarbietung die Voraussetzung für die räumlich-akustischen Untersuchungen in *Comp*X. Zu diesem Zweck werden gemessene Impulsantworten verwendet, die im Rahmen einer Kunstkopfaufzeichnung durch das MIT Media Lab Perceptual Computing bestimmt und zur Verfügung gestellt wurden [GM95]. Die technische Realisierung (s. Abschnitt 6.3) umfaßt die Analyse der Impulsantworten, den Aufbau der digitalen Filter und beschreibt Verfahren zur Entzerrung störender Einflüsse.

Die experimentellen Anwendungen der Systemmodule WORTABRUF und AKUSTISCHE RAUMREPRÄSENTATION werden in den *Kapiteln 7 und 8* beschrieben. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, neben strukturellen Aspekten zum Aufbau auch konkrete Entwicklungsideen der Realisierung darzustellen. Ausgehend von der diagnostischen und therapeutischen Zielsetzung werden die Systemkomponenten KONFIGURATION, DURCHFÜHRUNG und AUSWERTUNG für jedes Einzelexperiment vorgestellt, wobei die wichtigsten Parametereinstellungen diskutiert werden. Am Ende jedes Experiments werden beispielhaft Ergebnisse aus der klinischen Erprobung des Systems vorgestellt bzw. Anregungen für den weiterführenden Einsatz gegeben.

Kapitel 3

Neuropsychologie der Sprachverarbeitung und Raumrepräsentation

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte PC-basierte System *Comp*X dient der Untersuchung und Behandlung neurologisch bedingter Verarbeitungsstörungen, die zum einen die Sprache, zum anderen die Repräsentation des Raums betreffen. Der Anwendungsbereich des Systems liegt damit im Zentralbereich der Neuropsychologie, die sich mit der Diagnose und Therapie dieser Störungen befaßt. Der nachfolgende Abschnitt beinhaltet eine Einführung in die neuropsychologischen Grundlagen dieser Verarbeitungsleistungen und führt durch die Beschreibung beider Störungsformen an den derzeitigen Stand der Forschung heran, der Ausgangspunkt für die Entwicklung des Systems ist.

3.1 Ursachen und Auswirkungen erworbener Hirnschädigungen

Erworbene Verletzungen des Gehirns gehen auf verschiedene Ursachen zurück, wie zum Beispiel:

- Schädel-Hirntrauma, etwa als Folge eines Unfalls
- zerebrovaskuläre Erkrankungen (v.a. Infarkte und intrazerebrale Blutungen)
- Hirntumor

Der bedeutendste Anteil von Hirnschädigungen wird durch die gefäßbedingten (zerebrovaskulären) Krankheiten des ZNS[1] gebildet. In dieser Gruppe tritt der Schlaganfall

[1] Zentralnervensystem, Gehirn und Rückenmark

mit jährlich fast 500000 Fällen am häufigsten auf [Bun98][2]. Der Schlaganfall ist eine plötzliche, „schlagartige" Durchblutungsstörung einer Hirnregion[3]. Die Folge sind vorübergehende oder bleibende Funktionsausfälle in den Hirnzellen (Neuronen) und Faserverbindungen. Je nach Lokalisation und Ausmaß führt dies zu mehr oder minder schweren Krankheitszeichen und Beeinträchtigungen. Wichtige Symptome des Schlaganfalls sind Lähmungserscheinungen eines oder mehrerer Gliedmaßen, die sich meist auf eine Körperseite beschränken. In vielen Fällen treten Sprachstörungen (Aphasien[4]) auf, die durch eine Verletzung in der für die Sprachverarbeitung dominanten linken Hirnhälfte (Sprachregion) verursacht werden. Für die Betroffenen ist damit ein erheblicher Einschnitt mit oft dramatischen, kaum abschätzbaren Auswirkungen verbunden. Vor allem Beeinträchtigungen der sprachlichen Fähigkeiten führen, bedingt durch den Stellenwert der Sprache in der menschlichen Kommunikation, in hohem Maße und meist weit mehr als andere Behinderungen zu sozialer Isolation und Vereinsamung [Lam94].

3.2 Kognitive und klinische Neuropsychologie

Die Neuropsychologie befaßt sich mit dem Zusammenhang von Hirnleistungen und beobachtbarem Verhalten am Menschen. Ein Kernbereich der *kognitiven*[5] Neuropsychologie ist die Bildung wissenschaftlicher Erklärungsansätze über die Funktionsweise und Organisation von Hirnleistungen. In Ergänzung zur kognitiven Psychologie werden Beobachtungen an Patienten mit Hirnschädigungen in der Modellbildung berücksichtigt. Im Mittelpunkt der *klinischen* Neuropsychologie steht die Diagnose und Therapie der Folgen, die Hirnschädigungen auf Kognition, Motorik, Wahrnehmung und Psyche des Menschen haben [Gol97].

3.2.1 Beobachtung und Theorie

Zunächst soll die Frage beantwortet werden, auf welche Weise Funktionsbeeinträchtigungen nach Hirnschädigungen untersucht werden können. Die nachfolgende Abbildung 3.1 zeigt einige grundsätzliche Annahmen der Neuropsychologie, die gleichzeitig den Rahmen veranschaulichen, in dem sich neuropsychologische Untersuchungen bewegen. Das Modell stellt den allgemeinen Zusammenhang zwischen Umwelt und dem Menschen dar und unterscheidet drei Ebenen:

[2] 1995 starben über 100 000 Menschen an einem Schlaganfall; zerebrovaskuläre Erkrankungen sind nach Krebs und Herzkrankheiten die dritthäufigste Todesursache

[3] Ursachen des Schlaganfalls: 80% Durchblutungsminderung (Ischämie), Rest durch Blutungen im Gehirn bzw. in Hohlräumen des Gehirns

[4] griech. „ohne Sprechen" (keine exakte Störungsbeschreibung, nur selten ist die sprachliche Fähigkeit komplett ausgefallen)

[5] eine allgemeingültige Definition von Kognition existiert derzeit nicht: die kognitive Psychologie faßt alle Funktionen des Wahrnehmens, Behaltens, Erinnerns, Denkens und Problemlösens zusammmen [Nei67, Kna97], darunter fallen alle psychischen Vorgänge, die intelligentes Verhalten verursachen [MWR97]

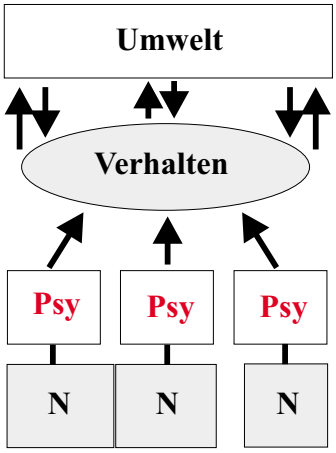


Abbildung 3.1: Zusammenhang von Umwelt, Verhalten, Psyche und Gehirn (nach [Gol97])
PSY: Psychische Funktion
N: Neuronales Substrat (umschriebene Regionen im Gehirn)

- Verhalten
- Psychische Funktionen (d.h. die zugrundeliegenden Funktionen, die das Verhalten bestimmen)
- Gehirn (dargestellt als neuronales Substrat)

Die Aussage des Modells lautet wie folgt: Interaktionen des Menschen mit seiner Umwelt äußern sich in seinem Verhalten, das zentral durch umschriebene Regionen des Gehirns (neuronales Substrat) gesteuert wird. Diese Ebene beschreibt die phsyikalische bzw. physiologische Realisierung des Verhaltens. Die Ebene der psychischen Funktionen repräsentiert das Zusammenwirken von Gehirn und Verhalten und dient zur Beschreibung der Vielfalt menschlichen Verhaltens.

> *Beispielsituation: Student beim Lösen einer Klausuraufgabe*
> Ein Student, der eine mathematische Aufgabe unter Prüfungsbedingungen lösen soll, zeigt i.d.R. ein Verhalten, das von außen beobachtbar ist (z.B. wird die Suche nach dem Lösungsansatz gewöhnlich schriftlich festgehalten). Die nachträgliche Beobachtung seines Verhaltens ist die Grundlage zur Beurteilung seiner Leistung. Auf der Suche nach einer Erklärung seines Verhaltens kann der Ansatz gewählt werden, die Gehirnaktivitäten zeitgleich zur Lösung der Aufgabe aufzuzeichnen. Moderne technische Untersuchungsverfahren[6], allen voran bildgebende Verfahren[7], ermöglichen die Aufzeichnung von Hirnaktivitätsmustern, d.h. die Darstellung aktivierter Neuronengruppen, die an der Lösung der Mathematikaufgabe

[6] z.B. EEG Elektroenzephalogramm, EKP Analyse ereigniskorrelierte Potentiale
[7] z.B. PET Positronenemmisions-Tomographie, SPECT Single-Photon-Emissions-Computertomographie, fMRI funktionelle Kernspinresonanz-Tomographie

> beteiligt sind. Dies beschreibt den *neurophysiologischen* Ansatz zur Erklärung des kognitiven Verhaltens. Die eigentliche Frage, welche zugrundeliegenden psychologischen Mechanismen bei der Lösung der Aufgabe (z.B. problemlösenden Denken, Schlußfolgern) beteiligt waren, bleibt aber nach wie vor unbeantwortet.

Ein relevantes Unterscheidungsmerkmal der drei Ebenen ist die *Zugänglichkeit der Beobachtung*. Wie im o.a. Beispiel erläutert wurde, kann Verhalten direkt beobachtet werden. Auch auf hirnphysiologischer Ebene ist die Beobachtung durch technische Verfahren möglich. Beobachtungen alleine ermöglichen jedoch noch keine Erklärung des Verhaltens. Zu diesem Zweck wird die Ebene der *„psychischen Funktionen"* eingeführt, die das Zusammenwirken neuronaler Aktivität und von außen bobachtbarem Verhalten erklären soll. Es handelt sich um eine abstrakte Ebene, auf der kognitive Funktionen (Gedächtnis, Aufmerksamkeit, Sprachverständnis etc.) beschrieben werden. Obwohl der Vergleich sicherlich nicht in allen Aspekten gerechtfertigt ist, kann nach Anderson [And88] die Analogie zur Computertechnik gezogen werden: das Gehirn entspricht dabei der Hardware, während die psychischen Funktionen die softwaretechnische Realisierung *funktionaler Strukturen* übernehmen. So wie ein Softwareentwickler von der konkreten Hardwarerealisierung abstrahiert, ist die funktionale Beschreibungen psychischer Funktionen nicht zwangsläufig an die Frage geknüpft, an welchem konkreten Ort im Gehirn eine Funktion realisiert ist.

Der Mangel, psychische Funktionen nicht direkt beobachten zu können erklärt, warum es sich bei den psychischen Funktionen um "theoretische Konstrukte" handelt [Gol97]. Dieser Umstand ist Hauptursache dafür, daß der Zugang *experimentell* erfolgt[8]. Wie alle Erkenntnisse der empirischen Forschung sind auch Theorien über psychische Funktionen mit einer Restunsicherheit behaftet. Mit Hilfe von Modellen[9], die die Funktionsweise bestimmter Leistungen erklären, entsteht eine *kognitive Architektur* der menschlichen Psyche. Die klinische Neuropsychologie nutzt diese Erkenntnisse und Modelle zur Entwicklung konkreter, anwendbarer diagnostischer und therapeutischer Ansätze.

3.2.2 Neuropsychologische Diagnose und Therapie

Im Unterschied zur vorangegangenen Betrachtung, in der allgemeine Zusammenhänge zwischen Gehirn, psychischen Funktionen und Verhalten betrachtet wurden, steht in der neuropsychologischen Diagnose und Therapie der Patient im Mittelpunkt [Gol97, CMZ93]. Die eingesetzten Untersuchungsverfahren sind i.d.R. experimentell. Die folgende Darstellung unterscheidet zwischen Diagnose und Therapie, wobei der Übergang in der praktischen Anwendung eher gleitend ist.

[8] seit mind. 4700 Jahren findet eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit funktionellen Fragen des Gehirns statt; bis heute sind viele kognitive und sprachliche Funktionen nur im Ansatz verstanden[MWR97]

[9] diese Modelle müssen fortwährend auf ihre experimentelle Validität hin überprüft werden

Neuropsychologische Diagnostik

Ziel diagnostischer Untersuchungen ist die Erkennung und Bewertung gestörter bzw. beeinträchtigter Leistungen. Neuropsychologische Diagnostik findet in Kliniken oder Praxen statt. Mittels i.d.R. standardisierter Untersuchungsverfahren werden Leistungen in den in Abbildung 3.2 dargestellten Bereichen bestimmt.

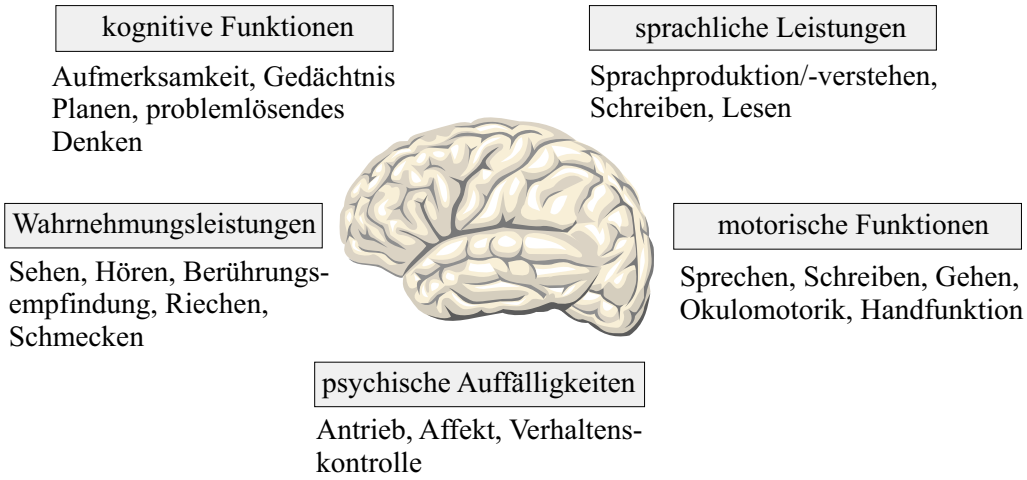


Abbildung 3.2: Neuropsychologische Untersuchungsbereiche

In Tests werden Leistungen von Patienten denen von Normalpersonen oder anderen Patienten gegenübergestellt [CMZ93]. Im Mittelpunkt steht die Abschätzung der *individuellen Behinderung*. Die angewendeten Verfahren sind einerseits abhängig von der Stabilität der Hirnschädigung. In frühen Phasen (erste Wochen nach der Hirnschädigung) ist häufig ein anderes diagnostisches Instrumentarium im Vergleich zur Behandlung chronisch-stabiler Schädigungen erforderlich. Andererseits wird hinsichtlich des Schweregrads der Störung differenziert. Ein großer und klinisch relevanter Anteil diagnostischer Verfahren orientiert sich an Patienten, für die eine soziale und berufliche Reintegration aussichtsreich erscheint. Diese Verfahren sind für Patienten mit schwersten Hirnschädigungen nicht einsetzbar oder nicht relevant.

Aufgrund der Vielzahl und Heterogenität diagnostischer Verfahren kommt der Erfahrung des Diagnostikers im klinischen Einsatz große Bedeutung zu. Ein weiterer Aspekt betrifft den Übergang von der Test-Diagnostik zur Form der *therapieorientierten Diagnostik*. Im klinischen Einsatz sind diagnostische Verfahren besonders wertvoll, die neben der Erkennung einer Störung Ansätze für die therapeutische Behandlung bieten.

Neuropsychologische Therapie und Rehabilitation

Der Begriff der neuropsychologischen Rehabilitation faßt die Auseinandersetzung mit den Folgen eingeschränkter Hirnleistungen zusammen. In der Rehabilitation können

drei Funktionsprinzipien unterschieden werden (siehe Abbildung 3.3 in Anlehnung an Abbildung 3.1).

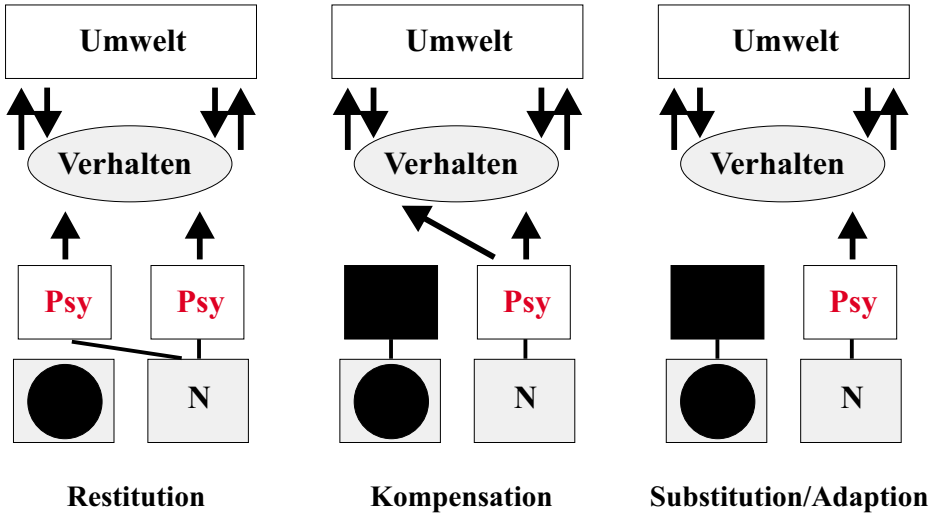


Abbildung 3.3: Möglichkeiten der Rehabilitation (nach [Gol97])

Im Fall der *Restitution* übernimmt ein intakter Teil des Gehirns die Funktion der ausgefallenen Region auf der Ebene des neuronalen Substrats. Selbst unter der Annahme eines irreversiblen Ausfalls einer psychischen Funktion kann u.U. eine *Kompensation* des Verhaltens dadurch erzielt werden, daß eine andere psychische Funktion die Leistungen der ursprünglichen, geschädigten übernimmt. Die Unterscheidung zwischen Restitution und Kompensation ist vielfach schwierig, da das von außen beobachtbare Verhalten kaum abweicht. Lediglich der zugrundeliegende Mechanismus ist unterschiedlich. Deutlich abzugrenzen davon sind die *Substitution* und *Adaption*. Der Ansatz liegt hier auf der Ebene der Wechselwirkung mit der Umwelt. Im Fall der Substitution wird versucht, die ausgefallene Funktion durch eine angepaßte „Prothese" zu ersetzen (z.B. Einsatz technischer Hilfsmittel[10]). Die adaptive Strategie erfordert umgekehrt die Anpassung von Umweltbedingungen an die verbliebenen Restfähigkeiten des Patienten (z.B. in der beruflichen Tätigkeit). Trotz der Hoffnungen, die diese Möglichkeiten vermitteln, muß der Erfolg im Vergleich zu Normalleistungen bzw. prämorbiden[11] Leistungen relativiert werden. Die vollständige Wiederherstellung ausgefallener Funktionen liegt i.d.R. außerhalb der rehabilitativen Möglichkeiten [ZM88].

Die Umsetzung rehabilitativer Maßnahmen erfolgt durch die neuropsychologische Therapie. Therapeutische Interventionen orientieren sich i.allg. eng an der Störungshypothese und damit an der beeinträchtigten psychischen Funktion. So können in therapeutischen Anwendungen ähnliche Untersuchungskonzepte wie in der Diagnostik verwendet werden. Im Unterschied zur Diagnostik wird der Patient stärker in die Behandlung eingebunden, d.h. die Anzahl der Interaktionen wird erhöht. Ferner wird die in diagnostischen Experimenten meist strenge *Reiz-Antwort-Relation* gelockert und der Patient

[10] elektronische Miniaturdatenbank bei Gedächtnisproblemen
[11] lat. vor der Erkrankung

bekommt die Möglichkeit, beeinträchtigte Leistungen zu trainieren. Therapeutische Verfahren sind dadurch insgesamt weit weniger standardisiert und erfordern vom therapeutischen Personal ein hohes Maß an Kreativität.

3.2.3 Interdisziplinäre Ansätze in der klinisch-experimentellen Forschung

Die klinisch-experimentelle Forschung ist ein Teilbereich der klinischen Neuropsychologie und nimmt die Funktion eines Innovationsträgers wahr. Durch diesen Bereich werden neue diagnostische oder therapeutische Verfahren entwickelt bzw. bestehende Verfahren weiterentwickelt. Ein Kennzeichen dieses Forschungszweigs ist die Nähe zur klinischen Anwendung, wodurch eine Brücke zwischen kognitiver Theorie und praxisorientiertem Einsatz gebildet wird. Neuentwicklungen und Verbesserungen von Untersuchungsansätzen kommen damit unmittelbar den Patienten zugute. Im Gegenzug wird erreicht, daß Neuentwicklungen die besonderen Bedingungen des Einsatzes am Patienten berücksichtigen, da die Gesamtentwicklung eng mit der Anwendung verknüpft ist.

Die klinische Neuropsychologie ist wie die Neuropsychologie insgesamt ein *interdisziplinäres Fachgebiet*. Die Vielfalt der beteiligten Disziplinen reicht von der Neurologie, Psychologie, Sprachwissenschaft (Linguistik, Neurolinguistik[12]) bis hin zu technischen Disziplinen wie der Informatik und der Nachrichtentechnik. Dieses Umfeld bietet eine geeignete Plattform für interdisziplinäre Entwicklungsansätze. In den vergangenen Jahren konnten substantielle Fortschritte durch erfolgreiche Entwicklungen computerunterstützter Systeme erzielt werden [Ahr94, Tei95]. Erst das Zusammenwirken mehrerer Disziplinen öffnet einen integrativen Weg mit dem Ziel, mehr über Hirnleistungen zu erfahren und Patienten mit erworbenen Hirnschädigungen eine bessere Hilfestellung geben zu können.

3.3 Dominanz visueller Forschungsansätze

Der Forschungsansatz des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Systems *Comp*X basiert auf dem Vergleich der Anteile visueller und akustischer Untersuchungsverfahren in der klinisch-neuropsychologischen Forschung. Dabei zeigt sich ein Überwiegen von Konzepten, die sich auf die Verarbeitung visueller Information beziehen. Dies gilt insbesondere für die Untersuchung räumlicher Wahrnehmungsleistungen. Auch in der Behandlung von Sprachstörungen durch die Neurolinguistik nimmt die akustische (lautsprachliche) Domäne einen wesentlich geringeren Raum ein, als ihr aufgrund ihrer Dominanz im Alltag zukommen sollte. Nachfolgend wird dieser Vergleich auf der Grundlage relevanter Unterschiede zwischen visuellen und akustischen Wahrnehmungsleistungen erläutert.

[12] Teilgebiet der Neuropsychologie, das sich mit dem Zusammenhang von Sprache und deren Repräsentation im Gehirn befaßt[Fri84]

Der visuelle Sinneskanal besitzt aus phylogenetischer[13] Sicht eine herausragende Bedeutung. Der Sehsinn ermöglicht eine, im Vergleich zu anderen Sinnesmodalitäten, hochratige Aufnahme von Umweltinformation. Ein wesentlicher Unterschied in der Verarbeitung visueller und akustischer Information besteht hinsichtlich der Parameter *zeitliche Auflösung* und *Lokalisationsfähigkeit*. Ein visueller Reiz hinterläßt eine entsprechende Position auf der visuellen Rezeptoroberfläche (Netzhaut) und ermöglicht die Erkennung von Richtungsänderungen, die kleiner sind als eine Bogenminute. Demgegenüber ist die akustische Lokalisationsfähigkeit um etwa zwei Größenordnungen ungenauer und beträgt etwa 1° [Bla97]. Das zeitliche Auflösungsvermögen verhält sich reziprok hierzu. Aus der Fernsehtechnik ist bekannt, daß der Eindruck eines stehenden Bildes ab einer Bildwiederholfrequenz von 15 - 18 Hz[14] entsteht, während sich der spektrale Hörbereich von 16 Hz - 20 kHz erstreckt.

Unter kommunikativen Gesichtspunkten, also in der Verwendung und im Gebrauch der Sprache, verlagert sich die Dominanz des visuellen Sinneskanals hin zum akustischen/auditiven Sinneskanal.

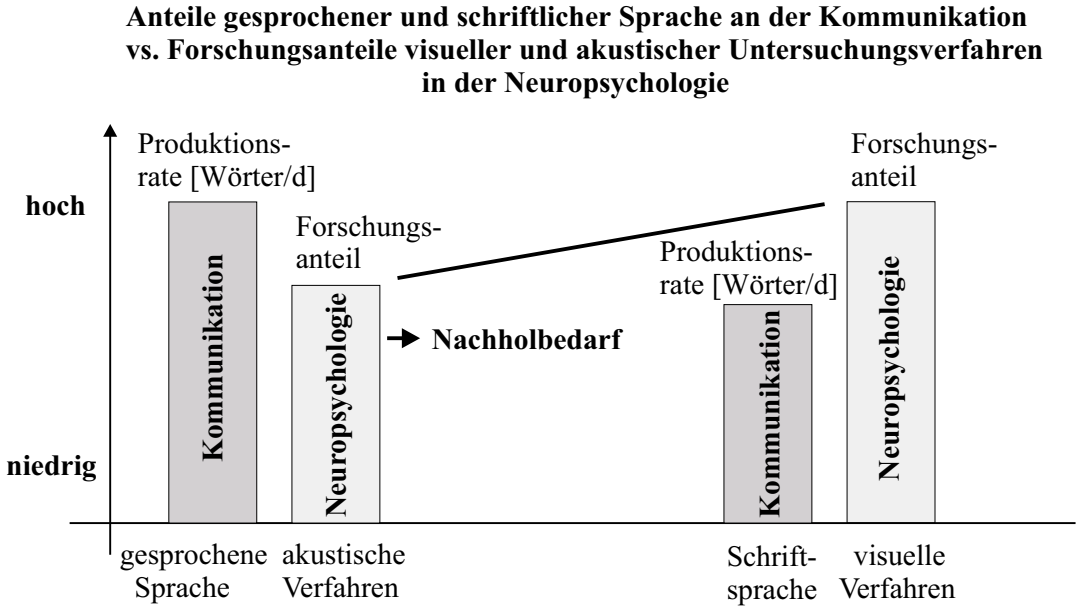


Abbildung 3.4: Ungleichgewicht zwischen akustischer und visueller Modalität

Abbildung 3.4 verdeutlicht diese Verlagerung durch einen Vergleich der Wortproduktionsrate (Wörter/d) in den Hauptkategorien der Sprache *gesprochene Sprache* (akustische Modalität) und *Schriftsprache* (visuelle Modalität). Die durchschnittliche Wortproduktionsrate wurde durch die englische Soziologin Dianne Hales empirisch ermittelt (ca. 12000 Wörter/d bei Männern und ca. 23000 Wörter/d bei Frauen) [May99]. Abgesehen von schriftstellerischer Tätigkeit überwiegt die Anzahl gesprochener Wörter

[13] evolutionär, stammesgeschichtlich

[14] Bildwiederholfrequenz beträgt bei den Fernsehübertragungsnormen PAL (Phase Alternation Line) 25 Hz bzw. NTSC (National TV Systems Committee) 30 Hz

die der schriftlich produzierten, wodurch die besondere Bedeutung gesprochener Sprache in der Kommunikation betont wird. Unterstützt wird die Argumentation durch die Analphabetenquote [oS95]. Danach sind ca. 1 Mrd. Menschen auf die gesprochene Sprache beschränkt. Zusätzlich besitzen etliche der 5500 derzeit bekannten Sprachen [Ins95] keine schriftsprachliche Form, d.h. einer weiteren (quantitativ nicht exakt zu beschreibenden) Anzahl von Menschen steht aufgrund ihrer Zugehörigkeit zu einer bestimmten Sprachgruppe nur die Modalität *gesprochene Sprache* zur Verfügung.

Im Gegensatz dazu konzentriert sich die klinisch-neuropsychologische Forschung auf visuelle Untersuchungsverfahren. Suchabfragen in zwei neurowissenschaftlichen Großdatenbanken [Abs97, OD99] ergaben ein Verhältnis von 1:2 zugunsten experimenteller Studien in der visuellen Modalität. Das Überwiegen visueller Verfahren ist nicht auf das vermehrte Auftreten visueller Störungsformen zurückzuführen. Die Ursache liegt eher in den höheren technischen Anforderungen akustischer Untersuchungsverfahren[15]. Klinische Einrichtungen sind bislang nur geringgradig durch die technischen Möglichkeiten der digitalen Sprach- bzw. Audiosignalverarbeitung erschlossen.

Im Mittelpunkt des Systems *Comp*X steht daher die Entwicklung akustischer Experimente. Zu diesem Zweck werden Komponenten der digitalen Audiosignalverarbeitung implementiert, die an die klinischen Bedürfnisse angepaßt sind. Dadurch wird versucht, das bestehende Defizit im Bereich akustischer Untersuchungsverfahren zumindest partiell zu schließen.

3.4 Neuronale Rauminformationsverarbeitung

Ein Teil der experimentellen Anwendungen im System *Comp*X konzentriert sich auf die Untersuchung räumlich-akustischer Verarbeitungsleistungen an hirngeschädigten Patienten (Modul „Akustische Raumrepräsentation" vgl. Abschnitt 8). Der nachfolgende Abschnitt erläutert zunächst die prinzipiellen Verarbeitungsmechanismen der Raumwahrnehmung anhand eines kognitiven Modells [ASLS93, Kar94, KH97]. Anschließend werden typische und klinisch relevante Störungsformen betrachtet. Zum Abschluß wird der aktuelle Stand der experimentellen Forschung aufgezeigt. Dabei wird deutlich, daß sich die Untersuchung räumlicher Verarbeitungsleistungen bislang auf den visuellen, seltener auch den taktilen Sinneskanal beschränkt. Diese Erkenntnis ist der Ausgangspunkt für die Entwicklung der räumlich-akustischen Systemanteile in *Comp*X.

3.4.1 Transformationsmodell der Raumrepräsentation

Die übergreifende Frage zur Funktion der Raumwahrnehmung läßt sich folgendermaßen formulieren: Welche Mechanismen besitzt der Organsimus zur Koordinatenberechnung für Blickbewegungen, Zeige- und Greifbewegungen oder zur Verlagerung der

[15] schriftsprachliche Leistungen können durch einfache Materialien wie Bildkarten, Texte u.s.w. überprüft werden

Aufmerksamkeit? Neuropsychologische Untersuchungen haben gezeigt, daß das Gehirn über eine neuronale Repräsentation des Raums verfügt. Danach existiert ein *egozentrisches (körperbezogenes) Raumkoordinatensystem*, das als Referenz für Augenbewegungen und zur Bestimmung der Körperposition bzw. zur Orientierung verwendet wird [Kar97]. Diese Erklärung wird durch alltägliche Erfahrungen unterstützt:

> *Beispielsituation: Griff zum Wasserglas*
> In einer Bürosituation richtet sich die Augenposition auf ein Glas Wasser, das auf einem Tisch abgestellt wurde. Danach wechselt die Kopf- und Augenposition auf den Monitor des Arbeitsplatzrechners. Das Glas Wasser ist aus dem Blickfeld verschwunden, dennoch ist es keine ungewöhnliche Erfahrung, wenn auch unter dieser Bedingung sicher nach dem Glas Wasser gegriffen werden kann.

In Abbildung 3.5 ist ein Modell dargestellt, das die Transformation wahrgenommener Raumkoordinaten in körperbezogene Referenzkoordinaten beschreibt. Diese Transformation ist für die statische Raumwahrnehmung, Erkennung dynamischer Objekte und Ausführung von Bewegungen z.B. der Extremitäten bedeutsam. Zur Erklärung wird ein Pfad durch das Modell beschrieben, der bei der visuellen Aufnahme der Information beginnt:

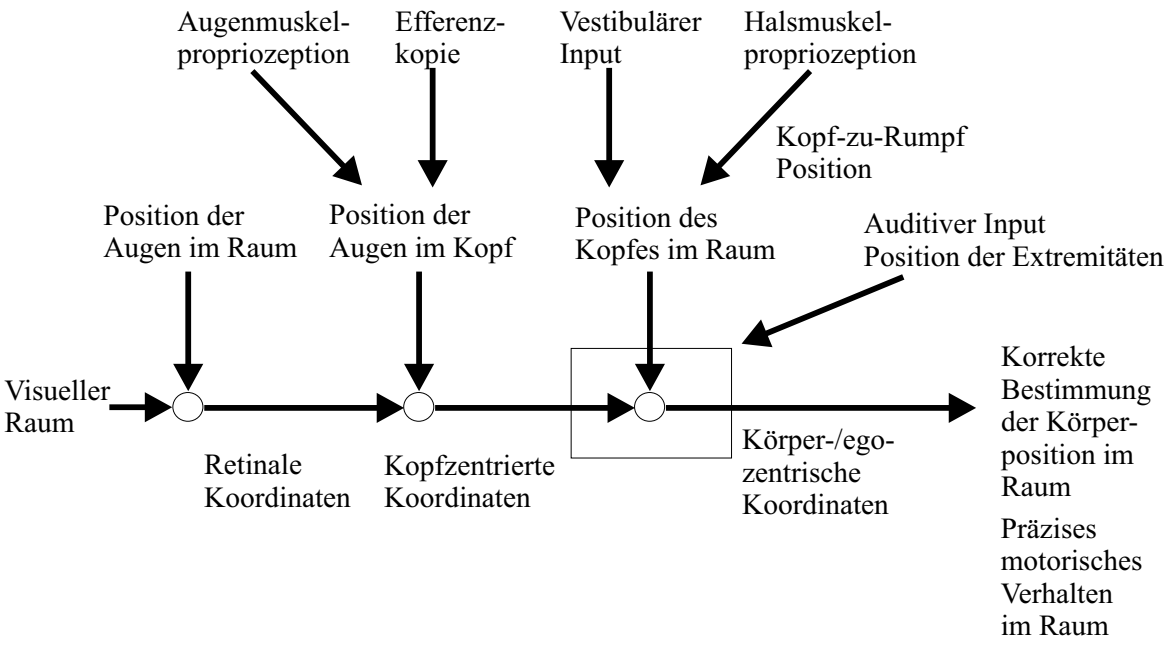


Abbildung 3.5: Modell der neuronalen Transformation sensorischer Information in ein köperbezogenes (egozentrisches) Koordinatensystem der Raumwahrnehmung [Kar94]

Der visuelle Außenraum wird beim Sehen in die sensorischen Rezeptorfelder des Sehsinns, der Netzhaut, abgebildet. Es entsteht ein *retinales* Abbild. Zur Berechnung körperbezogener Koordinaten wird die retinale Information mit Teilinformationen über die Position der Augen im Kopf sowie über die Position des Kopfes selbst kombiniert.

Die Augenposition wird durch die Stellung der Augenmuskeln (*Augenmuskelpropriozeption*) sowie der *Efferenzkopie* vermittelt. Bei der Efferenzkopie handelt es sich um eine Art Zwischenspeicher, in dem die Befehle für motorische Bewegungen der Augen gepuffert werden. Dieser Mechanismus ermöglicht dem Gehirn die Wahrnehmung der Dynamik, bei der eine Unterscheidung zwischen bewegtem Außenraum und Änderung der Augenposition notwendig ist[16]. Als Informationsquelle über die Kopfposition werden die propriozeptiven Signale aus den kleinen Wirbelgelenken der oberen Halswirbelsäule und der Halsmuskulatur verwendet, wobei durch das Gleichgewichtsorgan (*Vestibularorgan*) zusätzliche Information über die Summe von Körper- und Kopfbewegungen im Raum gewonnen wird. Neben visuellen, vestibulären und propriozeptiven Signalen ist die Integration *auditiver* und *taktiler* Information von Bedeutung. Das Ergebnis ist ein im Gehirn repräsentiertes, inneres Referenzkoordinatensystem des visuellen Außenraums, das durch die Verknüpfung multisensorischer Information entsteht. Neben der Außenraumwahrnehmung ermöglicht dieses System auch die Wahrnehmung der subjektiven Körpermitte. Dadurch können Links-/Rechts-Entscheidungen relativ zur Körpermitte getroffen werden.

3.4.2 Störungsformen der Rauminformationsverarbeitung

Störungen der räumlichen Verarbeitungsleistung können Ursachen auf zwei unterschiedlichen Ebenen besitzen: (1) Ebene der primär sensorischen Verarbeitung[17] und (2) Ebene der Integration multisensorischer Information (Referenzkoordinatensystem). Klinisch wird daher die Symptomgruppe der Hemianopsie[18], Hemihypästhesie[19], Hemiparese[20] und okulomotorische Störung vom Symptom der Neglect-Störung unterschieden [KH97]. Ein gemeinsames Merkmal beider Störungsformen ist die Vernachlässigung *einer* Raum- oder Körperhälfte als typisches Kennzeichen einer neurologischen Beeinträchtigung. In der klinischen Praxis treten diese Formen häufig gemeinsam auf und überlagern sich teilweise. Die Ursache liegt in der engen Nachbarschaft der zerebralen Regionen, deren Läsion typischerweise zur Neglectsymptomatik und zu primär sensorischen Defiziten führt. Primär sensorische Störungen werden deshalb als begleitende bzw. *assoziierte* Beeinträchtigungen der reinen Neglect-Störung bezeichnet [Ker99], in der nachfolgenden Darstellung aber separat behandelt.

Neglect-Phänomen

Die als Neglect, Hemineglect, halbseitige Vernachlässigung oder Aufmerksamkeitsbeeinträchtigung für eine Raum- oder Körperhälfte bezeichnete Verhaltensstörung ist

[16] Wahrnehmung von Relativbewegungen z.B. bewegter Zug bei konstanter Augenposition oder stehender Zug bei Variation der Augenposition

[17] Störung in den ersten Stufen der Reizverarbeitung beispielsweise im visuellen/akustischen/sensorischen System

[18] Ausfall einer Hälfte des Gesichtsfeldes (visuell)

[19] halbseitig herabgesetzte Berührungsempfindlichkeit (taktil)

[20] Halbseitenlähmung (motorisch)

eine relativ seltene aber sehr eigentümliche und charakteristische Folge von Schädigungen der rechten, nicht sprachdominanten Hirnhälfte [KH97]. Dabei können alle Sinneskanäle (Sehen, Hören, Fühlen, Riechen) gleichermaßen betroffen sein, weshalb die Störung als *supramodal* bezeichnet wird. Voraussetzung für die Diagnose des Neglects ist, daß eine primär sensorische Beeintächtigung (z.B. periphere Hörstörung) oder ein motorisches Defizit (Parese) als alleinige Erklärung für das festgestellte Defizit ausgeschlossen werden kann. Der Neglect ist damit eine Störung der „höheren" Prozesse der Informationsverarbeitung.

Funktionsbeeinträchtigungen

Das typische Kennzeichen des Negects ist die Nichtbeachtung von Reizen in der der geschädigten Hemisphäre gegenüberliegenden Raum- oder Körperhälfte, sowie der verminderte Einsatz einer Körperhälfte [Val93]. Bei rechtshemisphärischer Störung ist also die linke Hälfte betroffen (linksseitiger Neglect). Einer allgemeinen Konvention folgend wird die läsionsseitige Körperhälfte als *ipsilateral bzw. ipsiläsional* und die gegenüberliegende als *kontralateral bzw. kontraläsional* bezeichnet. Die Neglect-Störung verursacht eine Vernachlässigung im kontralateralen Halbfeld.

Zum Neglect gehört die Störung der *Awareness* (Einsicht) als Kernmerkmal. Unter Awareness wird die Fähigkeit eines hirngeschädigten Patienten verstanden, Defizite als Folge der Hirnschädigung an sich wahrzunehmen sowie deren Konsequenzen für sich vorauszusehen. Die mangelnde Einsicht (Unawareness) macht die Neglect-Störung zu einer der am schwersten zu behandelnden Störungsbilder [Ker99]. Bei vielen anderen Störungsformen findet eine Auseinandersetzung zwischen Patient und Krankheit/Funktionsbeeinträchtigung statt, auf der Therapieansätze aufbauen. Die Störungseinsicht des Patienten führt zur Entwicklung von bewußten Substitutions- und Adaptionsstrategien (vgl. Abschnitt 3.2.2). Die Unawareness von Neglect-Patienten verursacht eine starke Resistenz gegen rehabilitative Maßnahmen. Aktuelle Forschungsergebnisse zur Awareness gehen davon aus, daß mehrere Komponenten (kognitive, emotionale, sensorisch-motorische) zur Bildung der Awareness beitragen [CBV97]. Eine Verbesserung der Awareness könnte dann durch unterschiedliche Ansätze beeinflußt werden oder durch geeignete Stimulation zumindest kurzzeitig verbessert werden [VGR97].

Die Erscheinungsform des Neglects variiert inter- und intraindividuell. Der supramodale Charakter der Störung ermöglicht eine sinneskanalabhängige Differenzierung in *Neglectformen*. Diese treten häufig in Kombination auf, lassen sich aber voneinander unterscheiden und variieren meist in ihrer Ausprägung:

- Visueller N.
- Akustischer N.
- Sensibler und taktiler N.

- Motorische N.-formen
- Mentaler N.

Visueller Neglect

Patienten mit visuellem Neglect suchen mit Augen- und Kopfbewegungen überwiegend auf der intakten (ipsilateralen) Seite und weisen eine nach rechts verlagerte Geradeausrichtung (subjektive Mittenempfindung) im Raum auf. Abbildung 3.6 zeigt die Augenbewegungen eines Patienten bei visueller Betrachtung einer Szene.

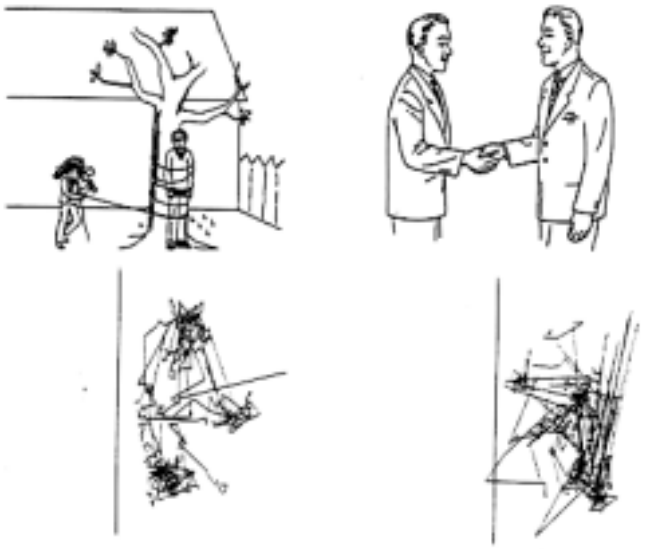


Abbildung 3.6: Blickbewegungsmuster eines Patienten mit linksseitigem Neglect bei visueller Exploration (nach [Kar97])

Deutlich sichtbar ist die Asymmetrie des visuellen Explorationsverhaltens. Die Blickbewegungen verlagern bzw. beschränken sich auf die rechte, ipsilaterale Seite. Dadurch werden Objekte, Personen und Gegenständen auf der linken Seite übersehen oder es erfolgt eine verspätete Reaktion auf sie. Die halbseitige Vernachlässigung betrifft nicht nur die Raum- oder Körperhälfte sondern erstreckt sich auf die Wahrnehmung von Objekten (objektbezogener Neglect). Daher wird der visuelle Neglect oftmals von einer assoziierten Lesestörung (Neglectdyslexie) begleitet, bei der Buchstaben, Ziffern bzw. Satzteile auf der linken Seite ausgelassen werden.

Akustischer Neglect

Umweltgeräusche oder Stimmen lösen bei Normalpersonen gewöhnlich eine Orientierungsreaktion der Augen, des Kopfes und/oder des Rumpfes zur Schallquelle hin aus.

Diese fehlt häufig bei Neglect-Patienten. Wenn eine Orientierungsreaktion erfogt, so meist zur gesunden (ipsilateralen) Seite, auch wenn sich die Schallquelle im linken Halbfeld befindet. Schwierigkeiten bereitet auch das Sprachverstehen bei mehreren beteiligten Sprechen („Cocktail-Party-Effekt"), da die Differenzierung zwischen den Sprechern erschwert ist (besonders bei links vom Patienten befindlichen Sprechern).

Sensibler und taktiler Neglect

Berührungsreize werden oftmals nur einseitig in der intakten (rechten) Körperhälfte wahrgenommen. Reaktionen auf schmerzhafte Berührungen in der linken Körperhälfte bleiben häufig aus oder werden rechtsseitig empfunden[21]. Auch bei dieser Erscheinungsform zeigt sich eine Verschiebung der subjektiven, taktilen Körpermitte zur intakten, rechten Seite. Beim taktilen Suchen mit der intakten Hand wird im kontraläsionalen Halbraum wenig, unsystematisch oder gar nicht gesucht.

Motorische Neglectformen

Es werden zwei Erscheinungsformen zusammengefaßt:

- direktionale Hypokinese
- motorischer N.

Die direktionale Hypokinese beschreibt Schwierigkeiten des Neglect-Patienten, Bewegungen mit den rechten (ipsiläsionalen) Extremitäten im linken, vernachlässigten Halbraum auszuführen, um z.B. mit der rechten Hand eine Tasse Kaffee im linken Halbraum zu greifen. Im Unterschied dazu äußert sich der motorische Neglect durch den verminderten spontanen Einsatz des linken (kontraläsionalen) Armes oder Beines. Gliedmaßen auf der vernachlässigten Seite werden oftmals gar nicht oder erst nach Aufforderung benutzt.

Mentaler Neglect

Bislang beinhalteten die Erscheinungsformen des Neglects immer eine sensorische und/oder motorische Komponente. In einer interessanten Aufgabenstellung konnte durch [BL78, BCLP81] nachgewiesen werden, daß auch die Vorstellung der Patienten von der halbseitigen Vernachlässigung betroffen ist. Diese Erkenntnis soll kurz skizziert werden: Patienten wurden aufgefordert, einen möglichst gut bekannten öffentlichen Platz o.ä. aus der Vorstellung heraus zu beschreiben. Dabei wurde nacheinander die (virtuelle) Perspektive um 180 ° gedreht. Ein linksseitiger Neglect äußert sich in einer detailreichen Beschreibung von zur jeweiligen Perspektive rechts gelegenen Objekten,

[21] Allästhesie[Ker99]

während über links gelegene wenig oder nur nach Aufforderung berichtet wird. Beim Wechsel der Perspektive blieb dieser Effekt erhalten, d.h. Details, die zuvor links lagen und nicht erwähnt wurden, konnten jetzt beschrieben werden. Der Nachweis des mentalen Neglects unterstützt die Interpretation der Neglect-Störung als Beeinträchtigung höherer, kognitiver Wahrnehmungsprozesse.

Assoziierte Beeinträchtigungen

Die Läsionsareale, die zur Neglect-Störung führen, grenzen an oder beinhalten oftmals Hirnregionen, in denen die primär sensorische Verarbeitung oder andere räumliche Wahrnehmungsleistungen stattfinden. Störungsphänomene nach rechtsseitiger Hirnschädigung treten daher häufig in überlagerter Form auf. Einige begleitende Beeinträchtigungen sind:

- Primär sensorische Störungen
- Räumliche Wahrnehmungsstörungen
- Aufmerksamkeitsdefizite
- Zeitliche Wahrnehmungsstörungen

Etwa 70% der Neglect-Patienten weisen zusätzlich primär sensorische Störungen, meist linksseitige Gesichtsfeldausfälle (Hemianopsie) [VP86] auf. Ergänzend werden halbseitige motorische Defizite von Arm und Bein (Hemiparesen), sowie halbseitige Vernachlässigungen von Berührungsempfindungen (Hemihypästhesie) beobachtet. Die Ähnlichkeit dieser Störungsphänomene zur Neglect-Symptomatik erschwert die Diagnostik (vgl. Abschnitt 3.4.4). Reduzierte räumliche Wahrnehmungsleistungen verursachen Störungen bei der Längen-, Abstands-, Form-, Entfernungs-, und Geschwindigkeitsschätzung. Für die visuelle Aufmerksamkeit sind Einschränkungen in der Selektivität, Dauer und Parallelität bekannt [Ker99]. Neglect-Patienten gelingt es nur schwer, die Aufmerksamkeit selektiv in den linken Halbraum zu verlagern. Die Aufmerksamkeitsleistung ist insgesamt reduziert, wodurch besonders die Daueraufmerksamkeit (rasche Ermüdung) und die Fähigkeit zur Parallelverarbeitung (z.B. zwei Tätigkeiten) leidet. Die Neglect-Störung betrifft auch temporale Aspekte der Aufmerksamkeit. Betroffen sind die Wahrnehmung und Abschätzung von Zeitdauern, die in der visuellen Modalität nachgewiesen wurden [HSMK97].

An dieser Stelle soll auf eine weiterführende Diskussion, welche Phänomene begleitend oder originär zur Neglect-Störung gehören verzichtet werden[22]. Für das Verständnis der experimentellen Ergebnisse (vgl. Abschnitt 8.4.3 und 8.5.3) ist die eingangs erwähnte Unterscheidung zwischen *primär sensorischer* und *neglectbedingter* Störung bedeutsam.

[22] ausführlichere Hinweise hierzu in [KH97]

3.4.3 Erklärungskonzepte

In der Neuropsychologie existieren unterschiedliche Ansätze zur Erklärung der Neglectstörung. Nach [Kar97] können drei Modellvorstellungen unterschieden werden:

- Aufmerksamkeitshypothese
- Repräsentationshypothese
- Transformationshypothese

Die *Aufmerksamkeitshypothese* vermutet die Ursache der halbseitigen Vernachlässigung in einem Übergewicht der automatischen Orientierung der Aufmerksamkeit in ipsilateraler Richtung. Die Steuerung der Aufmerksamkeit erfolgt demnach durch unterschiedliche Aktivierungsniveaus beider Hirnhälften. Die Schädigung einer Hemisphäre führt dazu, daß die gegenüberliegende (vernachlässigte) Seite geringer aktiviert wird.

Die Grundannahme der *Repräsentationshypothese* ist, daß jeder bewußten Wahrnehmung eine mentale Repräsentation der sensorischen Eindrücke vorausgeht. Ein maßgebliches Argument für diese Annahme ist das weiter oben angeführte Experiment zum mentalen Neglect. Der Neglect erklärt sich dann durch das Fehlen der mentalen Repräsentation im kontralateralen (vernachlässigten) Halbraum.

In der *Transformationshypothese* wird eine Störung in der Koordinatentransformation des körperzentrierten Referenzsystems angenommen (vgl. Abschnitt 3.4.1). Die neuronale Transformation ist dabei nicht vollständig ausgefallen, sondern geht mit einem systematischen Fehler einher, der die Reizverlagerungen zur ipsilateralen Seite erklärt.

Eine eindeutige Entscheidung über den zugrundeliegenden Mechanismus der Neglect-Symptomatik ist zur Zeit allerdings nicht möglich [KH97, Kar97].

3.4.4 Diagnose und Therapie der Neglect-Störung

Im folgenden Abschnitt wird eine Auswahl klinischer Diagnose- und Therapieverfahren betrachtet. Anhand von Beispielen wird deutlich, wie sich der Neglect praktisch auswirkt. Bei kritischer Betrachtung der Verfahren zeigt sich ein Überwiegen von Untersuchungsansätzen im visuellen bzw. taktilen Sinneskanal.

Lateralisierte und bilateral-simultane Stimulation (BSS)

Zur Untersuchung der halbseitigen Vernachlässigung sensorischer Reize wird die Reaktion des Patienten auf einseitige Reizdarbietung getestet. Visuell kann z.B. ein Finger im Gesichtsfeld des Patienten bewegt werden[23], taktil wird die Hautoberfläche der

[23] konfrontatorische Gesichtsfeldprüfung

Hand z.B. mit Wattestäbchen gereizt. Akustisch wird das Schütteln einer Streichholzschachtel oder das Schnippen der Finger zur Geräuscherzeugung genutzt. Ein interessantes Phänomen läßt sich bei *beidseitig simultaner Stimulation* (BSS) bobachten. Bei linksseitigem Neglect wird der linke Reiz nicht oder nicht immer wahrgenommen. Im Unterschied zur einseitigen Darbietung wird bei einer BSS der Reiz im vernachlässigten Halbraum „ausgelöscht", weshalb diese Beobachtung auch als *Extinktion* bezeichnet wird [KH97].

Kopieren und Zeichnen

Komplexere Aufgaben umfassen das Kopieren oder Zeichnen von Objekten. Der linke Teil der Abbildung 3.7 zeigt das Ergebnis eines Neglect-Patienten beim Abzeichnen eines Gesichtes bzw. eines Hauses. Im rechten Teil ist das Einsetzen fehlender Stundenzahlen in ein Ziffernblatt dargestellt. Die Ergebnisse der Zeichen- und Ziffernblattaufgabe demonstrieren deutlich die halbseitige Vernachlässigung.

Abbildung 3.7: Kopier- und Zeichenaufgaben, links Neglect-Patient, rechts Hemianopiker (nach [Gol97] und [KH97])

Die unvollständige Zeichnung bzw. das Ziffernblatt wird vom Patienten jedoch als vollendet und vollständig empfunden (Problem der „Unawareness" s. Abschnitt 3.4.2).

Quantitative Verfahren

Die bisherigen Aufgaben erlauben eine qualitative Abschätzung zur Erkennung einer Neglect-Symptomatik. Für die Gewinnung quantitativer Parameter eignen sich Such-/Durchstreich- oder Linienhalbierungsaufgaben. Das Beispiel einer Suchaufgabe ist in Abbildung 3.8 dargestellt.

Unter dem Einfluß der Neglect-Störung erfolgt die Suche nach dem Buchstaben („A") fast ausschließlich im rechten, intakten Halbfeld. Bei Aufgaben zur Linienhalbierung werden dem Patienten horizontale Linien vorgelegt, die durch eine Markierung genau halbiert werden sollen. Ein linksseitiger Neglect äußert sich in einer rechtsgerichteten Verlagerung der Markierung (Verlagerung der subjektiven Mittenempfindung).

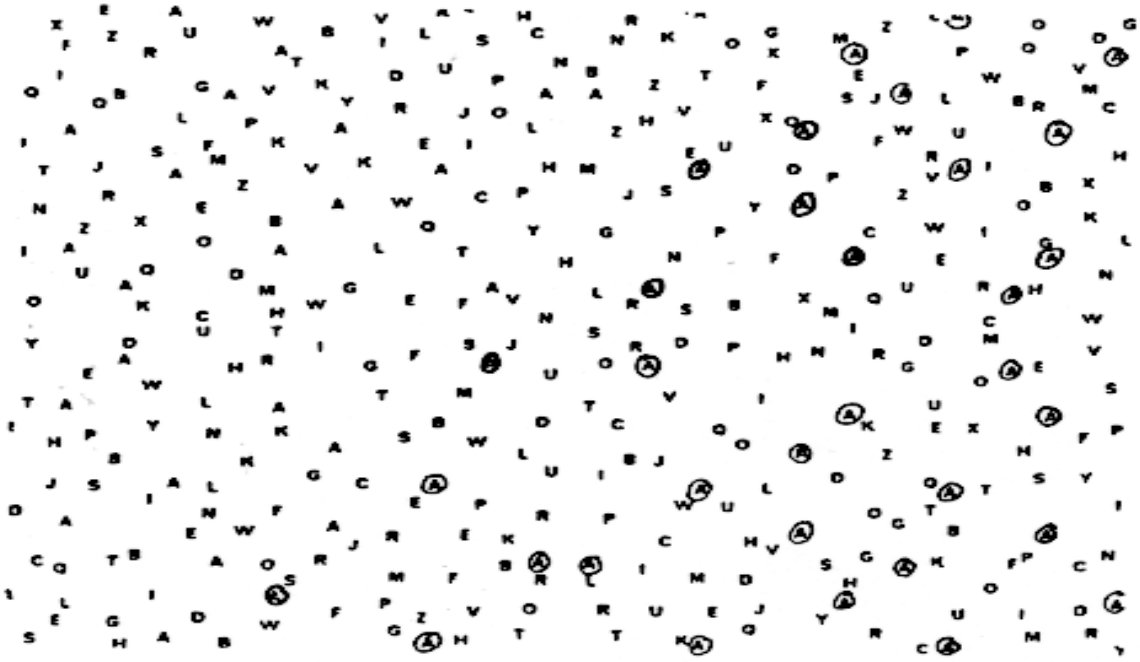


Abbildung 3.8: Suchen und Markieren des Buchstabens „A" in einem Suchfeld durch einen Patienten mit linksseitigem Neglect (nach [KH97])

Unterscheidung zwischen Neglect und Hemianopsie

Eine umfassende Darstellung unterscheidender Merkmale sprengt den Rahmen dieser Übersichtsdarstellung und ist immer noch Gegenstand aktueller Diskussionen [KH97, KS97]. Anhand o.a. Untersuchungsansätze können einige unterscheidende Merkmale skizziert werden. Im Fall der BSS findet sich beim Neglect eine Extinktion des kontralateralen Reizes. Bei einseitiger Reizdarbietung wird der linke Reiz nach Aufforderung aber oftmals erkannt. Hemianopische Patienten nehmen jedoch selbst bei einseitiger Darbietung nur den ipsilateralen Reiz wahr. Die Vernachlässigung kann im Fall des Neglects durch gezielte Lenkung der Aufmerksamkeit[24] teilweise kompensiert werden, was bei Hemianopsien ausgeschlossen ist. Ein weiteres Merkmal betrifft die Einsicht des Patienten. Während diese durch den Neglect stark beeinträchtigt ist, sind sich hemianopische Patienten der Ausfälle bewußt und reagieren entsprechend darauf (Lenkung von Kopf und Augen in Richtung der vernachlässigten Seite).

Therapeutische Ansätze

Wie bereits erwähnt, zeigt die Neglect-Störung eine erhebliche Resistenz gegenüber rehabilitativen Ansätzen. Deshalb wird schon in frühen Phasen nach der Hirnschädigung versucht, die Krankheitseinsicht durch funktionsorientierte Therapieverfahren

[24] z.B. durch visuelle Hinweisreize in der vernachlässigten Seite oder explizite Ankündigung, daß ein Reiz dort erscheint

zu fördern [Ker99, KS98]. Durch das gezielte Training einer beeinträchtigten Funktion soll die Aufmerksamkeit auf diese Beeinträchtigung gelenkt werden. Hilfestellungen und Verbesserungen, die vorwiegend Bezug auf die Lebenssituation des Patienten nehmen, werden durch alltagsorientierte Therapieformen (AOT) angestrebt. Trainiert wird die allgemeine Fähigkeit zur Raumwahrnehmung (z.B. sichere Orientierung) oder die gleichzeitige Ausübung mehrerer Handlungen in alltagsnahen Situationen. Alltagsorientierte Verfahren tragen der allgemeinen Problematik Rechnung, daß die Beurteilung von Einzelleistung in klinischer Umgebung i.allg. keine sichere Vorhersage für das Zurechtfinden unter erschwerten Alltagssituationen zuläßt.

3.4.5 Stand der experimentellen Forschung

Die Untersuchung räumlicher Verarbeitungsleistungen bei hirngeschädigten Patienten konzentriert sich bislang auf den visuellen, seltener auch den taktilen Sinneskanal, obwohl der supramodale Charakter der Störung als erwiesen gilt (vgl. Abschnitt 3.4.1). Eine wesentliche Ursache dafür ist der Mangel an technischen Möglichkeiten zur kontrollierten Darbietung akustischer Signale im klinischen Umfeld. Räumliche Hörleistungen werden fast ausschließlich durch die Psychoakustik bestimmt, die sich allerdings meist auf Untersuchungen an Normalpersonen beschränkt. Im folgenden werden klinische Verfahren und Ergebnisse zusammengefaßt, mit denen bislang *akustische* Wahrnehmungsleistungen bestimmt werden können.

Dichotische Hörtests

In dichotischen Hörtests werden simultan unterschiedliche Signale am linken und rechten Ohr präsentiert. Technisch wird eine Stereodarbeitung unter Kopfhörerbedingungen verwendet. Dichotische Hörtests wurden und werden zu Untersuchungen im Bereich der Hemisphärendominanzforschung[25] verwendet und nehmen bei der Untersuchung akustischer Wahrnehmungsstörungen immer noch eine wichtige Rolle ein. Bei gesunden Probanden zeigt sich ein Rechtsohrvorteil für sprachlich-verbale Signale, sowie ein Linksohrvorteil für tonale, melodische Signale [Poe89]. Patienten mit Läsionen in für die räumliche Verarbeitung wichtigen Arealen[26] zeigen in dichotischen Hörtests einen Leistungsabfall für tonale Signale (Töne, Akkorde) am kontraläsionalen Ohr (bei linksseitigem Neglect am linken Ohr) [EYNC85, BSv89]. Ferner konnten bei Neglect-Patienten einseitige akustische „Auslöschungen" (akustische Extinktion) ebenfalls am kontraläsionalen Ohr (s. Abschnitt 3.4.4) beobachtet werden.

Räumliche Hörleistungen

Räumlich-akustische Hörleistungen wurden bislang nur in wenigen Untersuchungen an Patienten mit akustischen Wahrnehmungsstörungen bestimmt. Verfahrenstechnisch

[25] Erforschung der funktionellen Spezialisierung der Großhirnhemisphären[Poe89]
[26] Temporallappen-Region

wurden entweder Freifeldanordnungen mit halbkreisförmig um den Hörer herum angeordneten Lautsprechern zur Erzielung unterschiedlicher Schalleinfallsrichtungen verwendet [VGNB95, SCGM97, ZPV95]. Alternativ wurde eine Kopfhörerdarbietung verwendet, wobei die Richtungsänderung durch interaurale Pegel- oder Zeitdifferenzen simuliert wird (vgl. Abschnitt 4). Das erste Verfahren verursacht einen hohen apparativen Aufwand, da die Untersuchungen zur Vermeidung störender Raumreflektionen in einem schallarmen Raum oder in psychoakustischen Labors stattfinden. Das zweite Verfahren ist zwar technisch einfacher, es entstehen allerdings nur seitlich ausgelenkte Hörereignisse und kein räumlicher Höreindruck.

Die Ergebnisse räumlich-akustischer Hörtests mit Patienten sind heterogen: Einige Studien zeigen, daß rechtshemisphärische Schädigungen das räumliche Hören stärker beeinträchtigen als linkshemisphärische [SCGM97, RHP81], wobei der größte Einfluß bei Neglectpatienten beobachtet werden konnte [SCGM97, VGNB95]. In weiteren Untersuchungen wurde eine ipsiläsionale Verlagerung der akustischen Geradeausrichtung[27] im vorderen Halbraum beobachtet [VGNB95], während andere Untersuchungen die größten Verlagerungen bei Patienten mit primär sensorischen Störungen (Hemianopsien) beobachteten [BCSV84].

Weiterführende Fragestellungen

Vor dem Hintergrund der vergeichsweise geringen Zahl an Studien zur Bestimmung räumlich-akustischer Hörleistungen besteht aus klinischer Sicht zunächst Bedarf an systematischen diagnostischen Untersuchungen. Dabei sollen die Auswirkungen räumlicher Störungen auf die Verarbeitung akustischer Information erkannt werden. Im nächsten Schritt stellt sich die Frage, welche Leistungsunterschiede bei Patienten mit verschiedenen Störungsformen (mit/ohne Neglect, rechts-/linkshemisphärische Störung, u.s.w.) beobachtet werden können. Im Fall der Erkennung systematischer Abweichungen von akustischen Normalleistungen richten sich weiterführende Fragen an die Untersuchung der Abhängigkeit des räumlichen Hörens von weiteren Einflußgrößen. Dieser Überlegung liegt die Hypothese zugrunde, daß Störungen der räumlichen Informationsverarbeitung auf Beeinträchtigungen bzw. systematische Fehler im neuronalen Referenzkoordinatensystem zurückgehen (vgl. Abschnitt 3.4.1). Es besteht daher die Vermutung, daß vorhandene Fehlfunktionen durch andere Eingangsgrößen des Referenzkoordinatensystems z.B. visueller Sinneskanal, Augen-/Kopf-/Rumpfposition beeinflußt werden können, was entweder zur Verstärkung oder zur Kompensation der Defizite führen müßte. Im Fall kompensatorischer Effekte ist zu prüfen, ob daraus ein therapeutischer Ansatz zu entwickeln ist.

Der Bedarf an neuropsychologischen Behandlungsverfahren zur Bestimmung räumlich-akustischer Hörleistungen an Patienten ist der Ausgangspunkt für die Entwicklung der experimentellen Anwendungen im Modul „Akustische Raumrepräsentation" (vgl. Abschnitt 8). Der Diagnostiker erhält dadurch die Möglichkeit, räumliche Hörleistungen

[27] Verschiebung der subjektiv empfundenen akustischen Mitte

systematisch unter klinischen Bedingungen zu bestimmen. Das Modul ist Teil des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Systems *Comp*X.

3.5 Neuropsychologie der Sprache

Neben räumlich-akustischen Verarbeitungsleistungen (s. Abschnitt 3.4) stellt die Produktion und das Verstehen *gesprochene Sprache* einen weiteren bedeutenden Anwendungsbereich des akustischen Sinneskanals dar. Das System *Comp*X konzentriert sich im experimentellen Modul „Wortabruf" (s. Abschnitt 7) auf die Untersuchung von Sprachverarbeitungsprozessen auf der sprachlichen Ebene des Wortes. Die Zielgruppe sind Patienten mit Sprachstörungen (Aphasien), die als zentrales Symptom Schwierigkeiten in der Produktion von Wörtern (Wortabruf bzw. Wortfindung) besitzen. Im folgenden Abschnitt werden die Verarbeitungsprozesse der Wortproduktion auf der Grundlage eines psycholinguistischen Modells erläutert, das von einer lexikalischen Organisation des Sprachsystems ausgeht.

3.5.1 Sprachfähigkeit

Sprache ist das wohl wichtigste und eindrucksvollste Kommunikationsmittel des Menschen. Die wesentliche Funktion der Sprache besteht in der Enkodierung von Inhalten und im Vermitteln von Botschaften [Gol97]. Ein besonderes Merkmal sprachlicher Fähigkeiten ist die Tatsache, daß viele Verarbeitungsschritte automatisiert und unbewußt verlaufen. Das Sprachsystem arbeitet unter normalen Umständen effizient und der Zugriff auf Inhalte des sprachlichen Gedächtnisses erfolgt leicht [Ell91]. Erst wenn ungewohnt komplexe oder seltener benötigte sprachliche Inhalte konstruiert werden müssen, ist der Übergang in bewußte Prozesse zu beobachten. Erkenntnisse über die Funktionsweise des Sprachsystems werden aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen und damit aus unterschiedlichen Blickwinkeln gewonnen[28]. Neben der rehabilitativen Zielsetzung der klinischen Neuropsychologie werden sprachliche Phänomene durch die klinisch-experimentelle Forschung und die kognitive Neuropsychologie analysiert. Auf der Grundlage modelltheoretischer Erklärungsansätze über die Sprachverarbeitung ermöglicht die Beobachtung pathologischer Sprache Einblicke in die grundsätzliche Organisation des menschlichen Sprachsystems. Erkenntnisse fließen vergleichbar einer positiven Rückkopplung wieder in die Entwicklung neuer therapeutischer Verfahren, die wiederum den Patienten zugute kommen. Die zentralen Fragen in der Untersuchung von Sprachstörungen lassen sich wie folgt formulieren:

1. Welche Untersuchungsansätze decken die durch die Sprachstörung verursachten Defizite auf (diagnostisch)?

[28] Linguistik (theoretische Untersuchung der Struktur von Sprache), Sprachpsychologie (sprachliche Phänomene bei Sprachgesunden), Psycholinguistik (kognitive Modelle der Sprachverarbeitung), Neuropsychologie bzw. Neurolinguistik (Untersuchung / Behandlung v. pathologischer Sprache)

2. Wie kann eine effiziente und andauernde Verbesserung erzielt werden (therapeutisch)?

Sprachwissen

Im Verlauf der kindlichen Hirnreifung ensteht eine sprachliche Spezialisierung der meist linken Hirnhälfte. Es wird davon ausgegangen, daß diese Spezialisierung genetisch angelegt ist [HPS91]. Das Sprachwissen, als Fähigkeit sprachliche Mitteilungen zu äußern und zu verstehen, zu schreiben und zu lesen, erwirbt der Mensch unter Einfluß der Umgebung innerhalb der ersten 5 Lebensjahre und in der frühen Schulzeit. Es dient der Verarbeitung von Wortschatz, Satzbau, Grammatik sowie von Lautstrukturen und ist in den Regionen um die seitliche Hirnfurche (s. Abbildung 3.9) lokalisiert [HPS91, SHW99]. Gespeichert ist das Sprachwissen in einem neuronalen Netzwerk[29], das als Sprachregion oder auch als Sprachzentrum bezeichnet wird.

Lokalisation des Sprachzentrums

Das Sprachzentrum ist bei der Mehrzahl der Menschen (ca. 98%) in der linken Hirnhälfte lokalisiert, die als für die Sprache dominant bezeichnet wird (s. Abbildung 3.9). In Lokalisationstheorien wird versucht, einzelnen Regionen spezielle sprachliche Funktionen zugeordnet. So wird die Sprachproduktion der Broca-Region zugeordnet, während das Wernicke-Gebiet als Repräsentation des Sprachverstehens gilt [KW93]. Diese Zuordnungen stellen jedoch, wie man heute weiß, eine unzulässige Vereinfachung dar [SHW99].

3.5.2 Ebenen der Sprachverarbeitung

Sprache besitzt aus linguistischer Sicht eine *funktionelle Architektur*, die drei Ebenen der Sprachverarbeitung unterscheidet:

- Emotion und Kognition
- Sprachsystem
- sprachliche Modalitäten

Ebene 1: Emotionen und Kognition

Sprachliche Verarbeitungsprozesse sind eng mit dem Aktivieren von Gedanken und Gefühlen verbunden, unterscheiden sich jedoch funktional, wie die klinische Untersuchung von Sprachstörungen zeigt. Patienten mit zentralen Sprachstörungen (Aphasien, vgl.

[29] System von Hirnzellen und Faserverbindungen

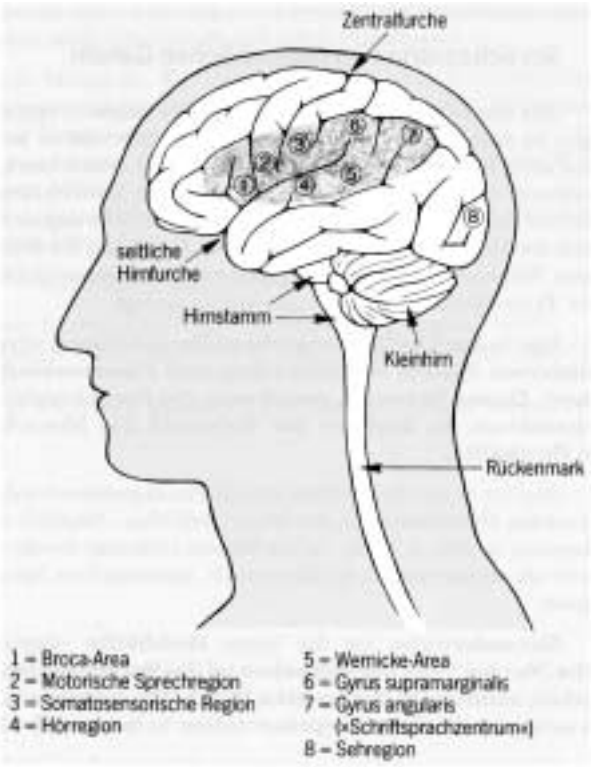


Abbildung 3.9: Sprachzentrum und seine Teile (nach [HPS91])

Abschnitt 3.5.4) besitzen nicht notwendigerweise kognitive oder emotionale Störungen. Gleiches gilt auch in umgekehrter Richtung [SHW99].

Ebene 2: Sprachsystem

Das Sprachsystem enthält *sprachsystematisches Wissen*, das für die Enkodierung und Dekodierung von sprachlichen Strukturen benötigt wird. Bei der *Enkodierung* werden kognitive und emotionale Inhalte in sprechmotorische und graphomotorische[30] Bewegungsabläufe umgesetzt. In umgekehrter Richtung werden bei der *Dekodierung* visuelle und akustische Muster der gesprochenen bzw. geschriebenen Sprache analysiert, Wörter und Satzstrukturen identifiziert und deren Bedeutung kognitiv und/oder emotional interpretiert. Das Sprachsystem leistet diese Zuordnungen in mehrfachen hoch automatisierten Verarbeitungsschritten, wobei unterschiedliche Komponenten und Teilkomponenten des sprachlichen Wissens aktiviert werden. Die funktionale Architektur dieser Komponenten ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Das Zusammenwirken wird anhand eines Beispiels verdeutlicht:

> *Beispiel zur Unterscheidung von Wort-, Satz- und Textverarbeitung*
> Manche sprachliche Äußerungen bestehen lediglich aus einem Wort, wie z.B. „Halt!" oder „Nein!". Ein einzelnes Wort übermittelt die gesamte Botschaft. In

[30] motorische Steuerung schriftsprachlicher Ausführungen

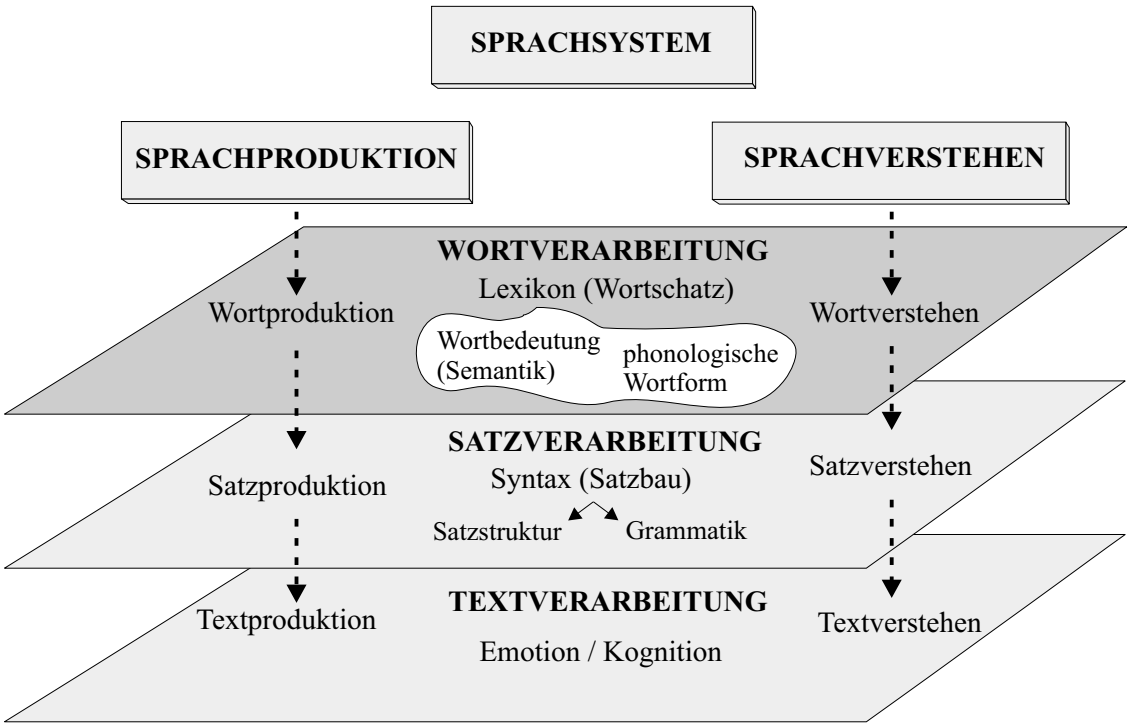


Abbildung 3.10: Ebenen der Sprachverarbeitung

vielen Fällen bestehen sprachliche Aussagen aus syntaktischen Verknüpfungen von Wörtern zu Sätzen. Sätze wiederum bilden eine Oberflächenstruktur, hinter der sich der Sinn des Satzes verbirgt [Gol97]. Wenn in einem Raum mit geöffnetem Fenster zwei Gesprächspartner eine Unterhaltung führen und Person 1 die Aussage macht „Mir ist kalt!", so ist die Bedeutung auf der Wortebene, daß die Erniedrigung der Raumtemperatur zur Entstehung eines Kältegefühls bei Person 1 führte. Die eigentliche Botschaft wird erst auf einer höheren Verarbeitungsstufe, der Textverarbeitung, dekodiert. Sie beinhaltet die implizite Aufforderung an Person 2, das Fenster zu schließen.

Abhängig von der Anforderung erfolgen die Vorgänge der En- und Dekodierung stärker *automatisiert* oder stärker *kontrolliert*. Bei automatisierter Verarbeitung werden die Einheiten des Sprachwissens unmittelbar in die Vorgänge der Sprachproduktion bzw. des Sprachverstehens integriert. Für die kontrollierte Verarbeitung wird angenommen, daß mehrere Einträge alternativ aktiviert, in einem Kurzzeit- bzw. Arbeitsgedächtnis zwischengespeichert, anschließend miteinander verglichen und ausgewählt werden [SHW99].

Ebene 3: Sprachliche Modalitäten

Sprache wird auf unterschiedliche Art verwendet und ausgeführt. Linguistisch werden *sprachliche Modalitäten* unterschieden, die eine orthogonale Beschreibung ermöglichen (s. Abbildung 3.11). Eine erste Trennung erfolgt zwischen *produktiven* (= ex-

pressiven) und *rezeptiven* Vorgängen. Sprachproduktion erfolgt durch Outputsysteme. Beim Sprechen und Schreiben werden hochspezialisierte und i.d.R. automatisierte motorische Programme aufgerufen und koordiniert. Sprachverstehen wird durch Inputsysteme ermöglicht, die sprachliche Information aufnehmen und analysieren. Die Informationsaufnahme erfolgt akustisch (Sprachverstehen) bzw. visuell (Lesen).

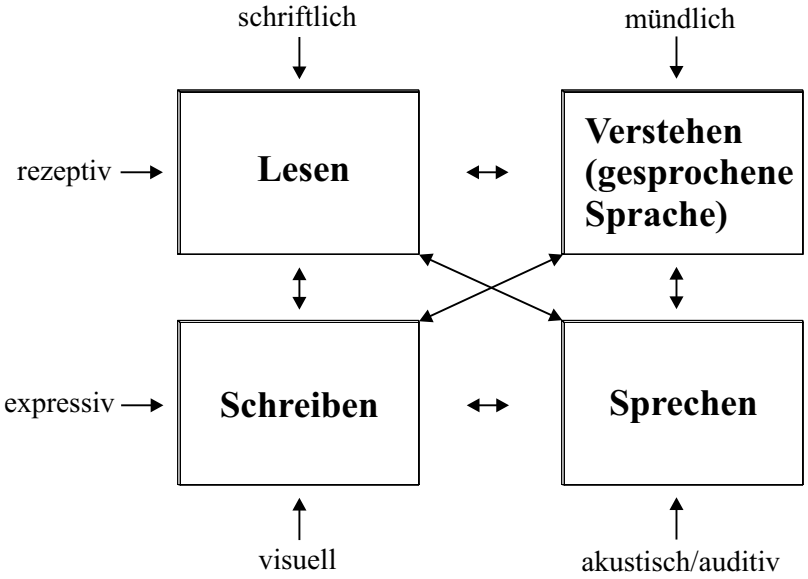


Abbildung 3.11: Orthogonalität der Sprache anhand der sprachlichen Modalitäten

Hirnschädigungen, bei denen das Sprachzentrum betroffen ist, führen zu Sprachstörungen, die abhängig vom Typ den unterschiedlichen Ebenen zugeordnet werden können.

3.5.3 Sprachverarbeitungsprozesse auf Wortebene

Normale, fließende Unterhaltung ist durch eine Wortproduktionsrate von 2 - 3 Wörtern/s gekennzeichnet, d.h. im Durchschnitt werden 120 - 180 Wörtern/min erzeugt [Lev93, Lev89]. Die mittlere Produktionsdauer bei der Benennung eines bildhaften Objekts beträgt etwa 500 - 600 ms [LPM98]. Sprachproduktion ist damit ein automatisierter, effizienter und unter normalen Umständen sehr zuverlässig arbeitender Mechanismus[31]. Die Frage, wie dieser Mechanismus funktioniert und welche Prozesse zugrundeliegen, ist Forschungsgegenstand der Psycholinguistik. Auf der Grundlage experimenteller Beobachtungen an Sprachgesunden enstehen Modelle über die Organisation von Sprachproduktion und -verstehen. Neuropsychologische Untersuchungen verwenden diese Erkenntnisse zur Entwicklung diagnostischer und therapeutischer Ansätze bei Sprachstörungen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden experimentelle Verfahren entwickelt, die sich spezialisiert Störungen in der Wortproduktion zuwenden. Das verwendete Basisexperiment

[31] Fehlerrate $\leq 10^{-3}$[Lev93]

ist die Bildbenennung. Der Patient wird dabei aufgefordert, ein Bild mündlich zu benennen. Diese Aufgabe beinhaltet zwei wesentliche Verarbeitungsleistungen:

1. Prozesse, die von der visuellen Verarbeitung des Bildes zur Auswahl des passenden Wortes führen
2. Produktionsmechanismen zur Erzeugung des ausgewählten Wortes

Zur Beantwortung des ersten Teilbereichs werden Beobachtungen an Sprachgesunden betrachtet, während die Erklärung der Wortproduktion anhand eines psycholinguistischen Modells erfolgt.

Prozesse beim Benennen von Bildern

In der Bildbenennung sind viele Verarbeitungsstufen der „natürlichen" Sprachproduktion involviert. Der Benennvorgang kann in folgende Stufen bzw. Teilprozesse zerlegt werden [LPM98]:

- Erkennung des visuellen Objekts
- Aktivierung eines lexikalischen Konzepts („basic-mapping")
- Wortproduktion

Erkennung des visuellen Objekts

In dieser ersten Stufe entsteht eine visuelle Repräsentation des Objekts. Diese Repräsentation ist nichtsprachlich, beinhaltet allerdings abstrakte typische Eigenschaften des Objekts. Darunter fallen z.B.:

- physikalische Größe (Elefant ist groß, Maus ist klein)
- Farbe

Ferner wird versucht, das Objekt zu erkennen, d.h. die verfügbare visuelle Information, die von der Betrachtungsperspektive abhängt, löst einen Mustervergleich mit bekannten, im Gedächtnis gespeicherten, Bildern von Objekten aus.

Aktivierung eines lexikalischen Konzepts („basic-mapping")

In dieser Stufe findet ein Abbildungsprozeß statt. Die visuelle Erkennung des Objekts in der vorherigen Stufe aktiviert ein *lexikalisches Konzept*. Der Begriff „lexikalisches Konzept" ist ein theoretischer Konstrukt der Psycholinguistik ([Lev89, Gla93, LRM98, LPM98]). Auf einer abstrakten Ebene werden darunter Bedeutungsinhalte verstanden, die durch Wörter ausgedrückt werden können. Lexikalische Konzepte sind Bestandteil des Sprachwissens, sind aber noch nicht mit dem Wort selbst sondern lediglich mit

dessen Semantik verknüpft. In der theoretischen Vorstellung ist das Sprachwissen als Netzwerk organisiert, dessen Knoten die lexikalischen Konzepte sind [LRM98]. Bevor eine Aktivierung erfolgen kann, muß das Problem der *Perspektive* gelöst werden. Abhängig vom kommunikativen Kontext können Objekte in unterschiedlichen Kategorien benannt werden, wie das Beispiel in Abbildung 3.12 verdeutlicht.

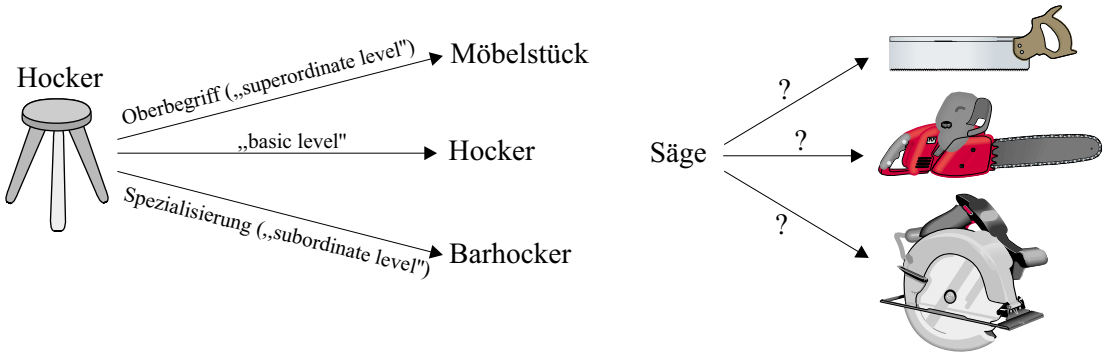


Abbildung 3.12: Perspektivenproblem bei der Auswahl des lexikalischen Konzepts

Der Abbildungs- oder Zuordnungsprozeß zwischen visueller Erkennung und Aktivierung des passenden lexikalischen Konzepts wird als „basic-mapping" bezeichnet [Gla93]. In Experimenten zur Bildbenennung konnte beobachtet werden, daß die unkontrollierte Benennung tendenziell auf dem „basic level" erfolgt.

Wortproduktion

Diese Stufe beinhaltet sämtliche Prozesse und Teilprozesse des Wortabrufs, die im nachfolgenden Abschnitt ausführlich analysiert werden.

Psycholinguistisches Modell lexikalischer Prozesse in der Sprachproduktion

Das Flußdiagramm in Abbildung 3.13 zeigt das im folgenden näher betrachtete lexikalische Modell im Überblick. Die Produktion von Wörtern wird als Prozeß beschrieben, der mehrere Stufen umfaßt. Die Eingangsgröße des Modells ist eine kommunikative Idee, also die Absicht, eine sprachliche Äußerung zu beginnen. Das Modell beschreibt die Umsetzung der kommunikativen Idee, beginnend bei der *konzeptuellen Vorbereitung* bis zur *Initiierung der Artikulation* des geeigneten Wortes, wobei der Artikulationsakt selbst nicht erfaßt wird. Nach Levelt[LRM98] beinhaltet die Wortproduktion Prozesse auf vier Ebenen:

1. Aktivierung lexikalischer Konzepte
2. Lemmaselektion
3. morphologische und phonologische Enkodierung
4. phonetische Enkodierung

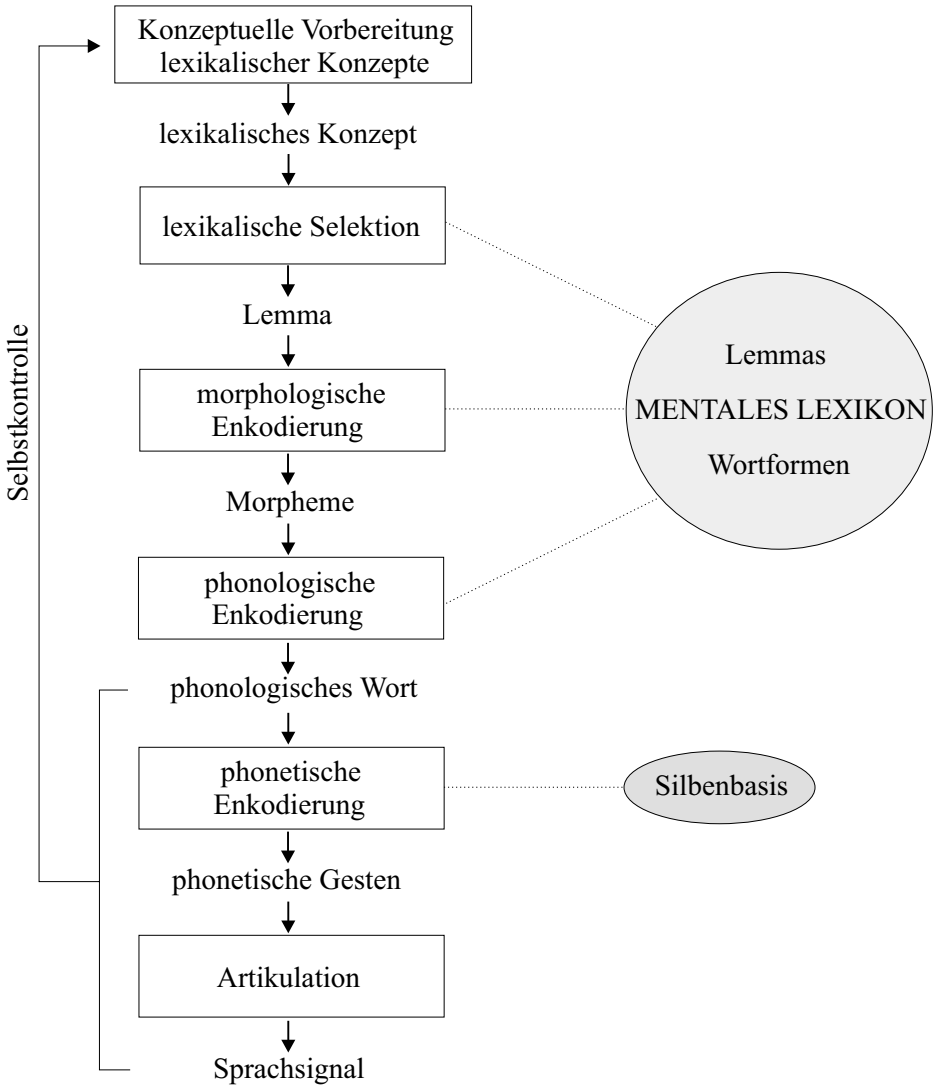


Abbildung 3.13: Psycholinguistisches Modell der Wortproduktion [LRM98]

Das Modell betrachtet die Wortproduktion als informationsverarbeitenden Prozeß. Jede Ebene (Verarbeitungsstufe) erzeugt eine charakteristische Repräsentation am Ausgang, die gleichzeitig die Eingangsgröße für die nachfolgende Stufe ist. Im Kern lassen sich in der Wortproduktion zwei Domänen unterscheiden: Mit von oben nach unten fortschreitender Nummerierung bilden Ebene 1) und 2) die *konzeptuelle/syntaktische Domäne*, in der semantische und grammatikalische Information verarbeitet wird. In den Ebenen 3) und 4) findet die lautsprachliche (phonologische) Verarbeitung des Wortes statt, die als *phonologische/artikulatorische Domäne* zusammengefaßt werden.

Zur Erklärung des Wortproduktionsprozesses werden nachfolgend die Funktionen der einzelnen Komponenten erläutert. Aus Gründen der Komplexität des Modells wird der Detailheitsgrad der Erläuterungen an die Erfordernisse aus Sicht der experimentellen Realisierungen im System *Comp*X angepaßt.

Konzeptuelle Vorbereitung

Auf dieser Stufe erfolgt die Umsetzung einer kommunikativen Idee oder Intention in eine *Nachricht*. Eine Nachricht im Sinne des Modells ist eine Struktur, die aus einem oder mehreren *lexikalischen Konzept(en)* besteht. Jede Produktion eines bedeutungstragenden Wortes[32] erfordert die Aktivierung von mindestens einem *lexikalischen Konzept*, das die Bedeutung des Begriffs (Semantik) beinhaltet. Doch woher kommen diese Inhalte? Beginnend mit frühkindlichen Erfahrungen über die Umwelt (Vorstellungen über das Handeln, interaktive Situationen, zeitliche und kausale Zusammenhänge u.s.w.) baut sich ein „Erfahrungsspeicher" auf, der durch ständige Lernprozesse angereichert wird. Die Erfahrungen stehen anfänglich noch nicht im Kontext der Sprache. Mit dem Erreichen einer bestimmten Entwicklungsstufe und dem einsetzenden Spracherwerb werden diese Erfahrungen in Wörter kodiert, wodurch Erfahrungen, Handlungen u.s.w. sprachlich durch die Wahl erlernter und verfügbarer Wörter beschrieben werden können. Der Prozeß, der mit der Aktivierung des lexikalischen Konzepts endet wird als *konzeptuelle Vorbereitung* bezeichnet. Auch wenn Unklarheit über die genauen Abläufe bei der Aktivierung des lexikalischen Konzepts bestehen, müssen im Rahmen dieser Vorbereitung einer sprachlichen Äußerung mindestens zwei Probleme gelöst werden:

1. Verbalisierungsproblem
2. Wahl der Perspektive

Das *Verbalisierungsproblem* beschreibt die Abbildung einer kommunikativen Intention in ein oder mehrere lexikalische Konzept(e), das als „mapping" bezeichnet wird.

> *Beispiel zum Verbalisierungsproblem*
> Die kommunikative Intention sei im ersten Fall durch die Benennung eines weiblichen Pferdes beschrieben. Ein dazu passendes lexikalisches Konzept ist das Wort „Stute". In einem zweiten Fall soll ein weiblicher Elefant benannt werden. Hier existiert kein eindeutiges lexikalisches Konzept, d.h. der Sprecher wird eine Phrase nutzen z.B. „weiblicher Elefant". Die Abbildung von Intentionen in lexikalische Konzepte (und damit in Nachrichten) ist ein nichttriviales Problem, für dessen Lösung i.allg. keine eindeutige Abbildung existiert.

Selbst wenn ein einzelnes lexikalisches Konzept gefunden wurde, ergeben sich weitere Freiheitsgrade durch die *Wahl der Perspektive*.

> *Beispiel zur Wahl der Perspektive*
> Ein typisches Problem bei der Benennung von Objekten ist die Wahl der Perspektive. Im Fall der bildlichen Darstellung einer Stute sind z.B. folgende Benennungen möglich: „Tier", „Pferd", „Stute" u.s.w.. Auch hier fehlt eine eindeutige Abbildung von Perspektiven und lexikalischen Konzepten.

[32] d.h. Wörter, die relevant für eine sprachliche Äußerung sind; Gegenbeispiel: einfaches Rezitieren oder lautes Lesen

Moderne Erklärungsansätze zur Lösung dieser beiden Probleme gehen von einer netzwerkartigen Struktur der lexikalischen Konzepte aus [Roe92]. Mit der Aktivierung eines bestimmten lexikalischen Konzepts werden gleichzeitig inhaltlich verwandte Konzepte (Wörter mit ähnlicher Bedeutung) aktiviert (s. Beispiel zur Perspektivenwahl: „Tier", „Pferd" und „Stute" wären in diesem Sinne inhaltlich verwandte Konzepte und würden gemeinsam aktiviert). Zusammenfassend wird durch die Aktivierung des lexikalischen Konzepts *semantische Teilinformation* des Wortes bereitgestellt.

Lexikalische Selektion

Lexikalische Selektion bezeichnet den durch das lexikalische Konzept gesteuerten Abruf eines *Lemmas*[33] aus dem mentalen Lexikon. Das mentale Lexikon ist ein zentraler sprachlicher Speicher, in dem die Lemmas permanent abgelegt sind[34]. Sprachliche Äußerungen bestehen i.a. aus der syntaktischen Verknüpfung mehrerer Wörter. Je nach Stellung des einzelnen Wortes im Satz variieren die syntaktischen Merkmale des Wortes. Neben wort-semantischer Information beinhaltet das Lemma auch wort-syntaktische Information (z.B. Tempus, Casus, Genus).

Die lexikalische Selektion schließt die *konzeptuelle/syntaktische Domäne* der Wortproduktion ab. Eine *Aussprache* des Wortes im Sinne einer Artikulation ist allerdings auf dieser Ebene noch *nicht möglich*. Hierzu wird lautsprachliche (phonologische) Information benötigt, die in dieser Verarbeitungsstufe noch nicht verfügbar ist.

Morpho-phonologische Enkodierung

Mit der morphologischen und phonologischen Enkodierung beginnt die *phonologische/artikulatorische Domäne*. Die wesentliche Funktion dieser Domäne ist die Vorbereitung der Artikulation des Wortes im prosodischen Kontext der sprachlichen Äußerung. In der morphologischen und phonologischen Enkodierung wird *phonologische Information* aus dem mentalen Lexikon abgerufen. Ein intaktes mentales Lexikon verfügt daher über mindestens zwei Einträge für jedes Wort: einen Lemma-Eintrag für semantische und wort-syntaktische Teilinformation, sowie einen Eintrag der Wortform für die lautsprachliche Teilinformation des Wortes.

> *Beispiel zur Aktivierung der Wortform („tip-of-the-tongue"-Phänomen)*
> Ein typisches Beispiel für einen gestörten Zugriff auf die Wortform ist das „tip-of-the-tongue"-Phänomen [BM66], d.h. wenn ein Wort „auf der Zunge zu liegen scheint", das auch bei Sprachgesunden häufig auftritt. Die Ursache ist eine momentane Unfähigkeit, phonologische Information des Wortes abzurufen. In experimentellen Untersuchungen [VAG97] konnte gezeigt werden, daß wortsyntaktische Information zu diesem Zeitpunkt durch einen erfolgreichen Lemma-Abruf

[33] Lemmas sind lexikalische Einheiten, die den *semantischen* Gehalt und die *syntaktischen* Merkmale eines Wortes zusammenfassen

[34] Schätzungen gehen davon aus, daß der Inhalt des mentalen Lexikons eines Erwachsenen zu etwa 1/4 aus Objektnamen besteht [LRM98]

> bereits verfügbar ist. So war es Versuchspersonen möglich, das grammatikalische Geschlecht des Zielwortes, das nicht ausgesprochen werden konnte, zu bestimmen. Dieses Untersuchungsergebnis deckt sich mit Alltagserfahrungen, bei denen die Bedeutung des Wortes (lexikalisches Konzept) klar ist, obwohl lautsprachliche Information fehlt.

Das „tip-of-the-tongue"-Phänomen verdeutlicht, daß die Wortproduktion blockiert sein kann, wenn nur eine Teilinformation fehlt. Selbst wenn der Zugriff auf die Wortform nicht blockiert ist, zeigen sich Unterschiede in der Zugriffszeit auf phonologische Teilinformation, die von der Auftrittshäufigkeit eines Wortes in der Sprache abhängt. Experimentell wurde eine Verlängerung der Zugriffszeit um etwa 50 - 100 ms bei selten verwendeten Wörtern beobachtet [JL94]. Der Zugriff auf die Wortform aktiviert phonologische Teilinformation auf drei Ebenen:

- morphologische Form
- metrische Form
- segmentale Form

Die *morphologische Form* beschreibt das Wort als Morphemfolge (z.B. das Zielwort „Autos" durch das Stammorphem „Auto" und „-s"). Wortmelodische Aspekte (z.B. Akzentuierung von Silben) und die Silbenanzahl werden durch die *metrische Form* beschrieben. Die *segmentale Form* beinhaltet die Lautfolge des Wortes, d.h. die Folge der Phone und deren Zusammensetzung zu Phonemen. Dabei ist als Zusatzinformation die Position der Phoneme innerhalb des Wortes kodiert. Die Ausgangsgröße der morphophonologischen Enkodierung ist die lautsprachliche Form des Wortes, ein phonologisches Wort. Damit sind alle zur Bildung des Wortes notwendigen Teilinformationen generiert, die durch die nachfolgenden Stufen in den motorischen Akt der Artikulation umgesetzt werden.

Phonetische Enkodierung

Die Theorie der phonetischen Enkodierung kann bislang nur Teile der vermutlich stattfindenden Prozesse erklären [LRM98]. Die Funktion der *phonetischen Enkodierung* ist die Umsetzung des phonologischen Wortes in artikulatorische Gesten. Zunächst soll erläutert werden, was unter artikulatorischen Gesten zu verstehen ist. Sprachlaute werden in die Gruppe der Vokale und die der Konsonanten unterteilt. Innerhalb einer Gruppe unterscheiden sich die Laute durch die Artikulationsstelle, d.h. durch den Ort der Erzeugung des Sprachlautes (z.B. werden die Laute [s], [t] durch die Zungespitze und die oberen Schneidezähne gebildet, sog. dentale Laute). Die Erzeugung der Sprachlaute erfordert einerseits eine hohe Koordinationsleistung von allen an der Lauterzeugung beteiligten motorischen Komponenten. Andererseits wiederholt sich der Prozeß der Lauterzeugung. Statt die Lauterzeugung jedes Mal neu zu berechnen, verfügt das Sprachsystem über *phonetische Muster* zur Erzeugung elementarer Laute, die nahezu

beliebig zur Bildung konkreter Phoneme aneinandergereiht werden können. Artikulatorische Gesten sind phonetische Muster und stellen abstrakte, kleine „Programme" der Lauterzeugung dar, die schnell und effizient ausgeführt werden können.

Im hier betrachteten Modell werden artikulatorische Gesten auf der Basis von Silben angenommen. Jeder Sprecher verfügt über einen Speicher, der die Menge häufig auftretenden Silben in der Sprache enthält. Die phonetischen Enkodierung beginnt mit dem ersten Phon des phonologischen Wortes. Stellt man sich die Silben im Silbenspeicher als Knoten oder Objekte vor, werden alle Silben aktiviert, die mit dem gleichen Phon beginnen. Durch fortschreitende Analyse der folgenden Phone wird die Auswahl möglicher Silben eingeschränkt und letztlich eine Silbe ausgewählt[35].

Zusammenfassend bedeutet phonetische Enkodierung die Umsetzung des phonologischen Wortes, das aus einer Folge von Phonen und Phonemen besteht, in eine Folge artikulatorischer Gesten auf der Ebene von Silben. Häufig benötigte artikulatorische Gesten sind in einem Speicher abgelegt, wodurch ein effizienter Prozeß begünstigt wird.

Artikulation

Die artikulatorischen Gesten werden im letzten Verarbeitungsschritt durch das *artikulatorische System* ausgeführt. Auf die Funktionsweise des Systems wird in diesem Modell nicht näher eingegangen. Das artikulatorische System ist ein umfangreiches neuronales System, das u.a. die Kontrolle von Atemmuskeln der Lunge und die Steuerung des Vokaltrakts umfaßt. Die Umsetzung abstrakter artikulatorischer Gesten in das physikalische Sprachsignal erfolgt in mehreren Zwischenschritten.

Selbstkontrolle

Die Erzeugung von Sprachlauten unterliegt einem ständigen Überwachungsprozeß, der als „Monitoring" bezeichnet wird. Dadurch können Fehler in der Sprachproduktion erkannt und korrigiert werden. Neben der Möglichkeit das bereits erzeugte Sprachsignal zu überwachen existiert ein weiterer Mechanismus, der als „inneres Sprechen" bezeichnet wird. Dieser beschreibt die Fähigkeit zur Überwachung der Sprachproduktion noch bevor ein gesprochenes Wort erzeugt wird. Aus Beobachtungen spontaner Selbstkorrekturen ist zu schließen, daß einige interne Repräsentationen während der Enkodierung bewußt beobachtet werden können [Lev83]. Nach Levelt [Lev89] wird vermutet, daß die Selbstkontrolle auf der Ebene der phonetischen Repräsentation statfindet.

Zusammenfassung

In der lexikalischen Verarbeitung von Sprache lassen sich *semantische* und *phonologische* Prozesse unterscheiden. Im o.a. psycholinguistischen Modell [LRM98] wird

[35] vgl. Baumstruktur

diese Trennung in der Repräsentation lexikalischer Information und den dazugehörigen Verarbeitungsmechanismen deutlich. So wird in der konzeptuell/syntaktischen Domäne semantische (lexikalisches Konzept) und wort-syntaktische Information (Lemma) verarbeitet (semantische Kategorie, Wortart, grammatikalisches Geschlecht etc.), während in der phonologisch/artikulatorischen Domäne die Enkodierung der Forminformation erfolgt (morphologische, metrische und segmentale Teilinformation). Diese Trennung in der lexikalischen Verarbeitung ist in vielen Sprachproduktionsmodellen vorzufinden[36]. Der Prozeß der Wortproduktion beinhaltet damit zwei unterscheidbare Stufen (2-Stufen-Modell), die jeweils unterschiedliche Teilinformation des Wortes bereitstellen.

Die *Zweiteilung der lexikalischen Verarbeitung* wird zum einen gestützt durch psycholinguistische Experimente zur Einzelwortverarbeitung [LSV+91], die Hinweise auf eine *zeitliche Trennung* semantischer und phonologischer Verarbeitung liefern. Zum anderen läßt sich in Störungsmustern der Sprache die *isolierte Störbarkeit* semantischer oder phonologischer Mechanismen beobachten [SML90], wodurch auf eine getrennte Verarbeitung rückgeschlossen werden kann.

3.5.4 Störung der Sprachfähigkeit durch Aphasie

Aphasien sind Sprachstörungen, die als Folge einer Erkrankung des zentralen Nervensystems (ZNS) auftreten. Betroffen ist das Sprachzentrum, das bei der Mehrzahl der Menschen in der Mitte der linken Großhirnrinde liegt (vgl. Abschnitt 3.5.1). Die häufigsten medizinischen Ursachen sind im Erwachsenenalter Schlaganfälle, im Kindes- und Jugendalter Hirnverletzungen durch Unfälle [HPS91].

Aphasische Sprachstörungen

Aphasien führen zu Beeinträchtigungen in allen sprachlichen Modalitäten (vgl. Abbildung 3.12). Betroffen ist sowohl die Fähigkeit zur sprachlichen Äußerung (Sprechen, Schreiben) als auch die Fähigkeit, sprachliche Mitteilungen zu verstehen (Hören, Lesen). Aphasien sind deshalb *multimodale* Sprachstörungen [SHW99]. Je nach Aphasietyp sind charakteristische Anteile des Sprachsystems (Lexikon, Syntax, Phonologie vgl. Abbildung 3.10) betroffen. Die Aphasie führt nur selten zum kompletten Ausfall aller sprachlichen Fähigkeiten. Lediglich unmittelbar nach der Hirnschädigung ist das Sprechen häufig unmöglich[37]. In den ersten Wochen und Monaten ändern sich die Symptome meist rasch. Obwohl sich die Störungsbilder aphasischer Patienten unterscheiden besitzen die auftretenden Sprachfehler eine Regelhaftigkeit. So treten charakteristische Einzelsymptome in Kombination mit anderen Symptomen immer wieder auf. Dieser

[36] vgl. z.B. [Gar82] führt zwei distinkte Mechanismen „first lexical lookup" und „second lexical lookup" ein

[37] Mutismus

Umstand wird von der Neuropsychologie dazu genutzt wird, Erscheinungsformen (Syndrome) der Aphasie zu klassifizieren. Die Vielfalt der Symptome wird dabei auf eine Kombination aus wenigen Grundstörungen zurückgeführt [Poe89].

Aphasische Störungen werden durch vier *Standardsyndrome* beschrieben, die in Abbildung 3.14 dargestellt sind.

	Globale Aphasie	**Broca-Aphasie**	**Wernicke-Aphasie**	**Amnestische Aphasie**
Sprachliche Leitsymptome	- schwerste Form der Sprachstörung - alle sprachlichen Modalitäten sind betroffen (spontanes Sprechen, Nachsprechen, Verstehen, Lesen und Schreiben) - tlw. neben Aphasie auch schwere Störung der Sprechmotorik - in schweren Fällen fortlaufende Sprachautomatismen (z.B. dododo, tatata u.s.w.)	- meist stockende Sprache, grammatikalisch unvollständig - telegrammartiger Satzbau (Agrammatismus) - viele Lautverwechslungen - relativ gutes Sprachverständnis - häufig mit Sprechapraxie assoziiert	- meist sehr flüssige Sprache (gut erhaltene Sprachmelodie, klare Artikulation) - jedoch sehr inhaltsarm (Gedanken können nur sehr schwierig geäußert werden) - inadäquate Wortwahl (z.B. Mutter statt Frau) - Störung des Sprachverständnis	- ausgeprägte Wortfindungsstörungen (sprachliches Such-verhalten) - inhaltsarme Redefloskeln - relativ gut erhaltenes Sprachverständnis

Abbildung 3.14: Standardsyndrome der Aphasie

Der Schweregrad der Störung ist von links nach rechts abgestuft (globale A. bis amnestische A.). Jedes Aphasiesyndrom ist durch einzelne hervorstechende Merkmale, die sog. *Leitsymptome*, charakterisiert. In der klinischen Diagnostik hat sich ein normiertes Testverfahren etabliert (AAT Aachener Aphasie-Test [HPW83]), mit dem das Vorhandensein und die Klassifikation der Aphasie zuverlässig bestimmt werden kann. Zur Verdeutlichung der Unterschiede zwischen den Aphasiesyndromen kann eine Symptomklassifikation hinsichtlich expressiver und rezeptiver Sprachfähigkeiten vorgenommen werden, die in Abbildung 3.15 dargestellt ist.

		Sprechflüssigkeit / Satzbau	
		stark gestört	leicht gestört
Sprach-verstehen	stark gestört	globale A.	Wernicke-A.
	leicht gestört	Broca-A.	amnestische A.

Abbildung 3.15: Schema der vier Standardsyndrome bei Aphasie (nach [SHW99])

Die charakteristischen Leitsymptome des entsprechenden Standardsyndroms entstehen in verschiedenen sprachsystematischen Komponenten des Planens und Formulierens von Mitteilungen, häufig ist auch die Sprechmotorik mitbetroffen. Die wichtigsten Symptome werden in der *Spontansprache* deutlich (z.B. Erzählen über den Beginn der Erkrankung, Familie, u.s.w.), die hinsichtlich folgender Aspekte klinisch beurteilt wird:

- automatisierte Sprache
- Satzbau und Grammatik
- *Wortwahl und Wortfindung*
- Lautstrukturen
- Artikulation und Stimmgebung

Im Mittelpunkt des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Systems *Comp*X steht die Diagnose und Therapie von Störungen der Wortfindung bzw. des Wortabrufs (vgl. Abschnitt 7), die deshalb im nachfolgenden Abschnitt näher betrachtet werden.

Wortabrufstörungen

Störungen der Wortproduktion kennzeichnen die Spontansprache aphasischer Patienten, wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß und in unterschiedlicher Qualität [SHW99]. So haben alle aphasischen Patienten Mühe, Gedanken sprachlich zu formulieren. Oft meinen sie, ein gesuchtes Wort „liege ihnen auf der Zunge", aber es gelingt ihnen nicht immer, dieses im Wortschatz zu aktivieren. Obwohl von der Störung selten alle Wörter gleichermaßen betroffen sind, äußern sich Schwierigkeiten in der Wortproduktion oftmals in einem veränderten kommunikativen Verhalten. Die Patienten zeigen ein ausgeprägtes sprachliches Suchverhalten oder verwenden Ersatzstrategien, um die kommunikative Absicht umzusetzen. Folgende Auffälligkeiten können im Spontansprachverhalten beobachtet werden:

- Einfügen langer Pausen und Interjektionen (z.B. „äh, äh", „oje", „ach")
- Ausweichen in inhaltsarme Redefloskeln (z.B. „Sie wissen schon was ich meine", „das Dingens")
- Einfügen von Eigenkommentaren (z.B. „also manche Worte da komm ich einfach nicht drauf")
- Beschreibung von Gebrauch oder Eigenschaft statt präziser Nennung
- Ausweichen in Pantomime
- Wiederholen von gerade gebrauchten Wörtern (Perseveration)

- Fortführen des Themas in variierter Form (z.B. da war ich dann zwei Tage in ... na ich soll jetzt denn Trauma sagen oder ... in jedem Fall ich wußte nicht mehr was ich tat")

Bei der Wahl von Wörtern kommt es leicht zu Verwechslungen von Wortbedeutungen (z.B. „meine Mutter" statt „meine Frau"). Typischerweise werden bedeutungsähnliche Wörter verwechselt (z.B. „Stuhl" statt „Tisch"). Bedeutungsmäßige Wortverwechslungen werden als *semantische Paraphasien* bezeichnet [SHW99]. Betreffen die Verwechslungen die Lautform, werden sie als *phonematische Paraphasien* bezeichnet. Obwohl es möglich ist, daß ganze Wörter verwechselt werden, treten Veränderungen einzelner Laute (Phoneme) innerhalb eines Wortes häufiger auf. Es kommt zu Ersetzungen, Auslassungen, Hinzufügungen oder Umstellungen (z.B. „Spille" statt „Spinne", „Tock" statt „Stock", „Bansane" statt „Banane", „Urine" statt „Ruine"). Dadurch kann das Wort derart entstellt werden, daß der Eindruck einer Wortneubildung (*phonematischer Neologismus*) entsteht.

Im folgenden sollen mögliche Ursachen der Wortfindungs- bzw. Wortabrufstörung genauer betrachtet werden. Mit Bezug auf die modelltheoretische Betrachtung der Wortproduktion (vgl. Abschnitt 3.5.3) wird deutlich, daß die Aktivierung eines Wortes beim Sprechen die Verknüpfung von Wortbedeutung (semantische Information) und Wortform (phonologische Information) erfordert. In den Erklärungsansätzen der Wortabrufstörung wird daher von einer Störung in der lexikalischen Verarbeitung ausgegangen [Car97]. Prinzipiell können zwei Ursachen unterschieden werden (s. Abbildung 3.16).

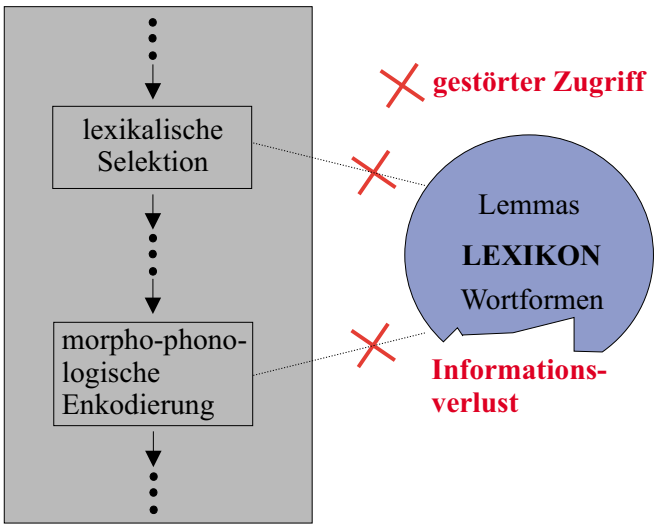


Abbildung 3.16: Störungsformen der lexikalischen Verarbeitung

Der Prozeß der Wortproduktion ist sowohl von intakten Zugriffsmechanismen auf lexikalische Inhalte als auch von der vorhandenen Struktur des Lexikons abhängig. Die Wortfindundungsstörung kann demzufolge den Mechanismus des Informationsabrufs oder auch die Speicherung der abzurufenden Information selbst betreffen (siehe Abbildung 3.16).

Im Gegensatz zur Neglect-Störung (vgl. Abschnitt 3.4.2) zeigen Patienten mit Wortabrufstörungen ein Störungsbewußtsein, das sich in der Entwicklung von Umweg- oder Ersatzstrategien ausdrückt. Eine Patientenschilderung verdeutlicht die wahrgenommenen Schwierigkeiten und zeigt gleichzeitig, daß die Sprachstörung nicht notwendigerweise zu Denkstörung führen[38]:

> *Selbstschilderung eines Patienten [NB96]*
> „...I often had the impression, that I had the letter, syllable or word within my power but through a tempestuous cleavage another element would come and take its place and this would give my speech a quality often incomprehensible and fantastic."

3.5.5 Therapie von Wortabrufstörungen

In der klinischen Untersuchung treten Wortabruf- bzw. Wortfindungsstörungen als reduzierte Benennleistungen in Erscheinung. Die Behandlung dieser Störung steht aufgrund ihrer weitreichenden Beeinträchtigung oftmals im Mittelpunkt sprachtherapeutischer Interventionen. Trotzdem ist die Entwicklung therapeutischer Konzepte im Vergleich zu diagnostischen Verfahren nicht so weit fortgeschritten [NB96]. Nach einer Klassifizierung bestehender therapeutischer Ansätze werden im folgenden Abschnitt experimentelle Verfahren und Ergebnisse erläutert.

Klassifikation therapeutischer Ansätze

In der Behandlung von Wortabrufstörungen wird eine Vielzahl von Ansätzen verfolgt (z.B. [HP89]). Es ist daher hilfreich, zunächst eine methodische Strukturierung vorzunehmen. Abhängig von der Hypothese über die Störungsursache lassen sich drei Ansätze bzw. therapeutische Techniken unterscheiden (s. Abbildung 3.17).

Die *Reorganisation* beruht auf der Nutzung intakter Prozesse zur Umgehung gestörter Prozesse (z.B. [NB96]).

> *Beispiel zur Reorganisation:*
> Patienten mit einer im Vergleich zum Sprechen besser erhaltenen Lesefähigkeit können z.B. durch „lautes Lesen" versuchen, die ursprünglich nicht produzierbaren Wörter zu erzeugen. Durch stufenweises Training lernt der Patient einzelne Buchstaben in Laute umzusetzen, die er anschließend im Gedächtnis aneinanderfügt, um auf diese Weise das Wort auszusprechen.

Der Nachteil dieses Ansatzes besteht darin, daß auf den eigentlich gestörten Prozeß wenig Bezug genommen wird. Zudem setzt Reorgansation zur Entwicklung einer Ersatzstrategie immer das Vorhandensein intakter Prozesse voraus. Viele Patienten verfügen

[38] Patient mit semantischer/phonematischer Paraphasie

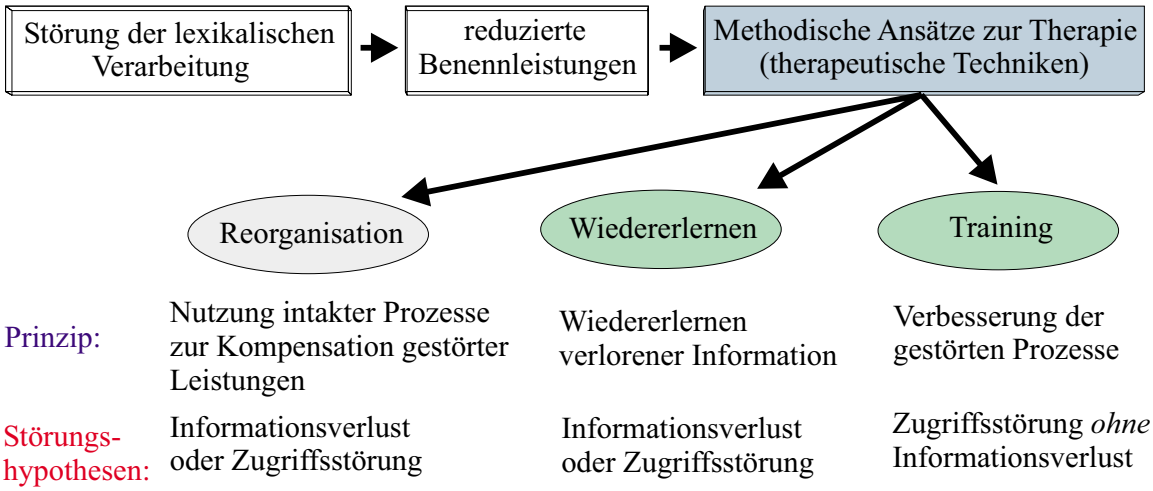


Abbildung 3.17: Methodische Ansätze in der Therapie von Wortabrufstörungen

unglücklicherweise nicht mehr über genügend intakte Prozesse, weshalb die Reorganisationstechnik nicht angewendet werden kann.

Für diese Patienten bieten sich zwei andere Therapieansätze an: *Wiedererlernen* und *Training*. Durch Wiedererlernen sollen verlorene Inhalte ersetzt werden. Inhalte beschränken sich nicht auf lexikalische Einträge sondern erfassen auch nicht mehr verfügbare Einzelprozesse der Wortproduktion. Wiedererlernen setzt voraus, daß durch die Störung ein Informationsverlust eintrat oder mindestens der Zugriff auf die Information erschwert wurde. Demgegenüber liegt das Ziel des *Trainings* in der Verbesserung der gestörten Prozesse. Dies setzt voraus, daß kein Informationsverlust sondern lediglich der Zugriff auf die Information beeinträchtigt ist.

Obwohl die Effizienz therapeutischer Verfahren experimentell in Einzel- und wenigen Gruppenuntersuchungen nachgewiesen wurde [NB96], ist ein Vergleich nur schwer möglich. Hauptursache ist das Fehlen quantitativer Parameter, die eine verlässliche Aussage über den Erfolg und die Wirksamkeit der Therapie ermöglichen. Eine Beurteilung kann anhand folgender Parameter erfolgen:

- Transfereffekte und Generalisation
- zeitliche Dauer von Therapieeffekten

Transfereffekte bezeichnet Therapieeffekte, durch die sich die Verbesserung des Wortabrufs nicht auf das behandelte Wortmaterial beschränkt, sondern auch nichttrainierte Wörter erfaßt. Dieser Effekt kann durch Kontrolluntersuchungen mit zuvor nichtbehandeltem Wortmaterial gemessen werden. In Erweiterung zum Transfereffekt bezeichnet *Generalisation* Leistungsverbesserungen, die über die konkrete therapeutische Aufgabenstellung hinausgehen. So besteht ein Ziel in der Behandlung von Wortabrufstörungen darin, die Spontansprache des Patienten für die alltägliche Kommunikation zu

verbessern. Ein weiterer Parameter betrifft die *zeitliche Stabilität* von Therapieeffekten. Dabei können langanhaltende und kurzfristige Erfolge unterschieden werden. Für einen Vergleich der Therapieergebnisse ist ferner die Kenntnis der experimentellen Bedingungen notwendig. Anschließend müssen die erzielten Ergebnisse in Abhängigkeit von der spezifischen Störungsform des Patienten diskutiert werden.

Therapeutische Untersuchungsansätze

Ein gängiger Ansatz in der therapeutischen Behandlung der Wortabrufstörung besteht darin, dem Patienten eine Hilfestellung anzubieten, falls die Produktion eines gesuchten Wortes nicht oder nur teilweise gelingt. Da die Ursache der Wortabrufstörung auf eine Beeinträchtigung in der lexikalischen Verarbeitung zurückgeführt wird, bieten sich für die Behandlung zwei Verfahren an:

- semantisches Verfahren
- phonologisches Verfahren

Durch beide Verfahren erhält der Patient zusätzliche Information über das gesuchte Wort mit dem Ziel, den Wortabruf zu erleichtern bzw. zu bahnen. Im *semantischen Verfahren* werden Reize verwendet, die Hinweise über die Bedeutung des gesuchten Wortes liefern (z.B. Hinweis auf die Funktion des gesuchten Objekts oder Angebot von sinnverwandten Wörtern). *Phonologische Verfahren* bieten demgegenüber Information über die Wortform an. Während semantische Hilfen zahlreich und häufig eingesetzt werden [NB96], beschränken sich phonologische Hilfen meist auf Anlauthilfen, d.h. dem Patienten werden die ersten Phoneme des gesuchten Wortes angeboten.

> *Beispiele für semantische und phonologische Verfahren:*
> Semantische Verfahren: Hinweise über die Bedeutung des Wortes, z.B. semantisch verwandte Bilder, schiftliche oder mündliche Beschreibung von Eigenschaften („eine Kuh frißt ... Gras")
> Phonologische Verfahren: Hinweise über die Form des Wortes, z.B. Aussprache des Wortes, Anlauthilfe durch initiale Phoneme des Zielwortes, Hilfe durch Reimpaar (gesuchtes Wort steht in Reimbeziehung zum Hilfswort)

Semantische und phonologische Verfahren können in zwei Anwendungsformen eingesetzt werden, die sich vor allem in der Zielsetzung unterscheiden:

- Bahnungsexperiment
- Therapieexperiment

Im *Bahnungsexperiment* wird *eine* Technik (z.B. Anlauthilfe) *eines* Verfahren (z.B. phonologisch) *einmalig* angewendet. Zu einem späteren Zeitpunkt wird die Wirksamkeit des Verfahrens überprüft. Festgestellte Effekte (Bahnungseffekte) können direkt

auf die verwendete Technik zurückgeführt werden. Das Ziel dieses Ansatzes besteht darin, die Wirksamkeit einzelner Techniken isoliert zu untersuchen. In der Therapie ist diese Zusammenhang oftmals nicht mehr erkennbar, da ein Experiment, das mehrere Techniken und Verfahren anwendet, häufig mehrfach durchgeführt wird. Das Ziel der Therapie besteht im Erreichen stabiler, andauernder und über das trainierte Wortmaterial hinausgehender Verbesserungen des Wortabrufs.

3.5.6 Stand der experimentellen Forschung

Es liegen durch Einzelfall- und wenige Gruppenstudien Ergebnisse über den bahnenden Effekt einzelner semantischer und phonologischer Übungen, die zeitliche Dauer und die Generalisierung dieser Effekte vor (vgl. zusammenfassend [NB96]). Obwohl schon früh direkte Vergleiche semantisch orientierter und phonologisch orientierter Therapie vorgenommen wurden[HPF$^+$85a, HPF$^+$85b], besteht insgesamt für die in der Literatur beschriebenen Ergebnisse eine große Variation in der Art der durchgeführten Therapie (expressiv[39] vs. rezeptiv, akustische vs. visuelle Hilfen) sowie in der Dauer und Intensität der Therapien. Insgesamt kann ein Ungleichgewicht zugunsten der Verwendung semantischer Verfahren beobachtet werden. Phonologische Ansätze liegen im Grad ihrer Entwicklung und Differenziertheit weit hinter den semantischen Verfahren zurück.

Weiterführende Fragestellungen

Trotz der Vielzahl bislang durchgeführter Studien leitet sich die noch nicht ausreichend geklärte Frage ab, welcher Behandlungsansatz bei welchem Patienten den „besten" Effekt erzielt. Daraus ergibt sich der Bedarf für *systematisch vergleichende Untersuchungen*, bei denen die Wirksamkeit durch quantitative Parameter erfaßt wird. Das Ziel dieser Untersuchungen besteht darin, aphasische Patienten anhand ihrer Störungsmuster eindeutig Gruppen zuzuordnen, die von einzelnen Therapieansätzen besonders profitieren. Eine weitere Frage betrifft den Ausbau *phonologischer Behandlungsverfahren*.

Für beide Fragestellungen wurde in der vorliegenden Arbeit ein ingenieurtechnisches Anwendungsfeld erkannt. Das Systemmodul „Wortabruf" (vgl. Abschnitt 7) ermöglicht auf der Grundlage einer flexiblen Experimentstruktur die Realisierung zahlreicher Behandlungsverfahren (semantisch und phonologisch). Besonderer Stellenwert wird der Weiterentwicklung phonologischer Verfahren eingeräumt. Zu diesem Zweck stehen dem Therapeuten an die klinischen Bedürfnisse angepaßte Komponenten der digitalen Audiosignalverarbeitung zur Verfügung, mit denen lautsprachliche Information gezielt variiert werden kann.

[39] expressiv beinhaltet die Aussprache des Zielwortes

Kapitel 4

Psychoakustik des räumlichen Hörens

Der nachfolgende Abschnitt führt in die psychoakustischen Grundlagen des räumlichen Hörens ein. Ausgehend von der Frage, wie „gut" die Fähigkeit zum räumlichen Hören bei Normalpersonen ausgeprägt ist werden die physikalischen und kognitiven Parameter analysiert, die das räumliche Hören ermöglichen (Lokalisationsquellen) und beeinflussen. Aufbauend darauf, wird ein technischer Lösungsansatz zur Simulation räumlicher Hörereignisse erläutert (binaurale Simulation), der gleichzeitig die Grundidee des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Simulationsmoduls SPATIAL TOOLBOX ist (vgl. Abschnitt 6). Abschließend wird auf ausgewählte psychoakustische Effekte eingegangen, die bei kontrollierten Untersuchungen des räumlichen Hörens zu berücksichtigen sind.

4.1 Einführung und Interesse am räumlichen Hören

Akustische Signale besitzen neben der Inhaltsinformation durch die physikalische Anordnung der Schallquelle auch eine Richtungsinformation. Räumliches Hören ist ein zentraler Gegenstand der Psychoakustik, die sich allerdings im wesentlichen auf Untersuchungen an hörgesunden Probanden beschränkt. Im System *Comp*X werden experimentelle Anwendungen entwickelt, um räumlich-akustische Wahrnehmungs- und Gedächtnisleistungen an hirngeschädigten Patienten zu untersuchen (vgl. Abschnitt 8). Eine Voraussetzung dafür ist die Erzeugung eines räumlichen Höreindrucks mit klinisch vertretbarem technischen Aufwand, der gleichzeitig den psychoakustischen Anforderungen entspricht.

Eine Besonderheit bei der Untersuchung räumlicher Hörleistungen liegt darin, daß der räumliche Höreindruck zum einen durch *physikalische Parameter* des akustischen Signals (Frequenz, Intensität, Zeitdauer) bestimmt wird, zum anderen aber auch von der *subjektiven Wahrnehmung* der Versuchsperson abhängig ist. Dies begründet das interdisziplinäre Interesse an der Erforschung des räumlichen Hörens. Während technische Disziplinen den Hörer als Englied einer Übertragungskette (Nachrichten-

senke) auffassen, interessieren sich psychologische, physiologische bzw. medizinische Fragestellungen primär für die Wahrnehmung des Hörers.

Für die klinische Neuropsychologie erschließt sich durch das räumliche Hören ein breites, bislang wenig erforschtes Gebiet. Mit Ausnahme weniger klinisch-experimenteller Studien verfügt die klinische Praxis über keine quantitativen Verfahren zur Diagnose räumlich-akustischer Hörleistungsdefizite. Der Anwendungsbereich reicht von psychoakustischen Standarduntersuchungen, deren Aufbau sich an der speziellen Situation des Patienten orientieren muß, bis hin zur Simulation alltagsnaher Szenarien. Diese sollen helfen, den Patienten schon während des klinischen Aufenthalts auf die Anforderungen nach dem Abschluß der Behandlung vorzubereiten.

4.1.1 Definitionen und Vereinbarungen

Schallereignis vs. Hörereignis

Die Unterscheidung zwischen *Schall- und Hörereignissen* bringt die notwendige Trennung zwischen physikalischen Phänomenen und Phänomenen der Wahrnehmung zum Ausdruck. In Hörversuchen übernimmt die Versuchsperson die Doppelrolle von Meßobjekt und Meßgerät. Schall- und Hörerignisse stehen in einer *assoziativen* Beziehung, die in Abbildung 4.1 dargestellt ist.

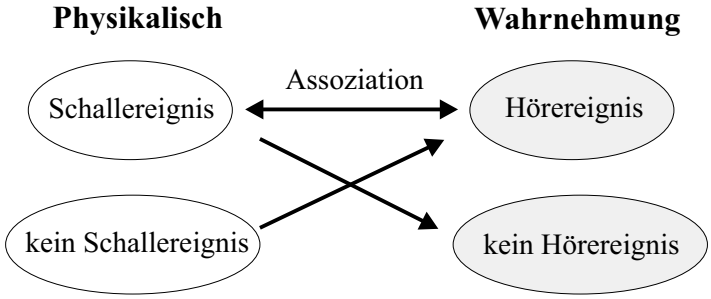


Abbildung 4.1: Assoziation zwischen Schall- und Hörereignissen

Ein Schallereignis führt häufig zu einem korrespondierenden Hörereignis. Nicht jedem Hörereignis muß aber notwendigerweise ein Schallereignis vorangehen (z.B. Hörsturz, Tinitus). Umgekehrt wird nicht jedes Schallereignis wahrgenommen (z.B. Schwerhörigkeit, Unaufmerksamkeit).

Der Begriff „Schall" im folgenden für die physikalische Seite des Hörvorgangs verwendet, während „Hören" den wahrnehmenden Anteil bezeichnet.

Lokalisation und Lokalisationsunschärfe

Ein wesentlicher Parameter zur Beurteilung des räumlichen Hörens wird gewonnen, indem der Ort des Schallereignisses (Position der Schallquelle) mit dem Ort des Hö-

rereignisses (wahrgenommener Hörereignisort) verglichen wird. Die Beschreibung wird durch zwei Definitionen erleichtert [Bla97]:

Lokalisation: Zuordnungsgesetz oder -regel (Operator) zwischen dem Ort eines Hörereignisses (z.B. Richtung und/oder Entfernung) und bestimmten Merkmalen eines Schallereignisses (z.B. Zuordnung von Hörereignis- und Schallquellenort).

Lokalisationsunschärfe: Kleinste Änderung eines bestimmten Merkmals oder bestimmter Merkmale des Schallereignisses, die gerade zu einer Ortsänderung des Hörereignisses (z.B. Richtung und/oder Entfernung) führen[1]. Diese wird auch als MAA („minimum audible angle") bezeichnet [MG91].

Die Lokalisationsunschärfe ist eine Eigenschaft der Lokalisation und bringt zum Ausdruck, daß der Hörereignisraum weniger differenziert ist als der Schallereignisraum. Im Mittelpunkt empirischer Untersuchungen des räumlichen Hörens stehen zwei Fragen:

1. Wo erscheint das Hörereignis bei gegebenem Schallquellenort? (Lokalisation)
2. Wie groß muß die Ortsänderung der Schallquelle mindestens sein, damit das Hörereignis seinen Ort gerade ändert? (Lokalisationsunschärfe)

Kopfbezogenes Koordinatensystem

Die Beschreibung des räumlichen Hörens erfolgt auf der Grundlage von Ortsangaben wie Schallquellenort, Hörereignisort u.s.w.. Deshalb wird für die weitere Betrachtung in Anlehnung an [Bla97] ein *kopfbezogenes Koordinatensystem* von Kugelkoordinaten zugrundegelegt. Kopfbezogen meint, daß das Koordinatensystem linear den Bewegungen des Kopfes folgt. Aufgrund der geringen menschlichen Fähigkeit zur Änderung der Relativposition von Kopf und Ohren ist es damit gleichzeitig ohrenbezogen. Abbildung 4.2 zeigt das Koordinatensystem, dessen Ursprung in der Mitte der Verbindungslinie beider Ohreingänge liegt. Die Verlängerung dieser Verbindungslinie spannt die *Horizontalebene* (internationale Schädelhorizontale) auf. Senkrecht dazu befindet sich die *Frontal-* und die *Medianebene*. Wird der Schädel ideal als symmetrisch angenommen, bildet die Medianebene die Symmetrieebene.

4.1.2 Randbedingungen

In einer natürlichen Hörsituation werden Schallwellen an beiden Ohren empfangen (binaurale Empfangskonstellation). Aus physikalischer Sicht besteht das Schallereignis aus dem summierten Sendesignal einer oder mehrerer Schallquellen, die beliebige Positionen im Raum einnehmen. Die Wellenfronten breiten sich im umgebenden Medium (meist Luft) aus und gelangen bis zum Trommelfell, das die Funktion eines

[1] da es sich um eine *empirisch* zu ermittelnde Größe handelt, wird in der Psychoakustik folgende Regel angewendet: Lokalisationsunschärfe ist die Ortsänderung der Schallquelle, bei der gerade 50% der Versuchspersonen eine Änderung des Hörereignisortes bemerken [Bla97]

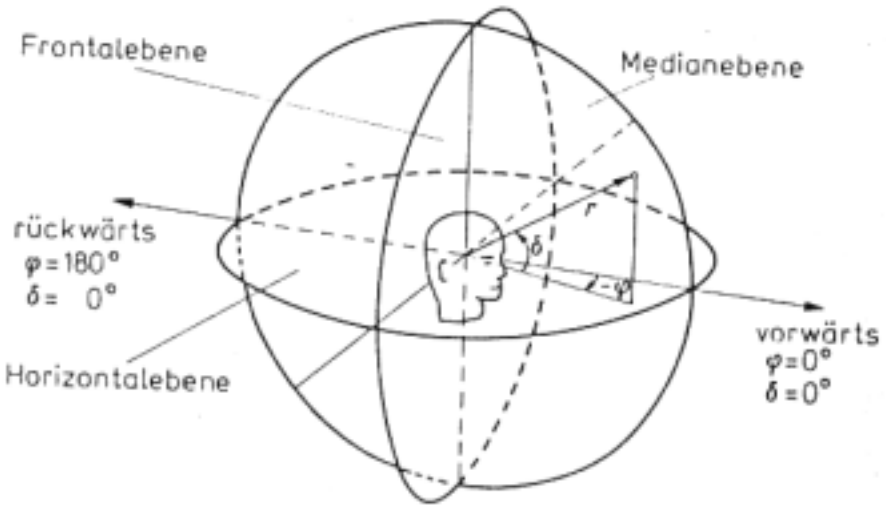


Abbildung 4.2: Kopfbezogenes Koordinatensystem; r: Entfernung, φ: Seitenwinkel (Azimuth), δ: Erhebungswinkel (Elevation)

Schallwellenempfängers besitzt. Das Trommelfell stellt gleichzeitig den Eingang der psycho-sensorischen Vearbeitung dar. Das Empfangssignal ist eine Zeitfunktion des Schalldrucks bzw. der Schalldruckänderungen. Sei $p(t)$ der Schalldruckverlauf, hängt dieser von folgenden Faktoren ab:

- Art, Anzahl und räumliche Anordnung der Schallquellen
- Eigenschaften des abgestrahlten Sendesignals (Schallsignal)
- raumakustische Bedingungen

Unter der Voraussetzung eines näherungsweise linearen Systemverhaltens können prinzipielle Zusammenhänge beim räumlichen Hören durch die Betrachtung von Elementarfällen erkannt werden. Dieser komplexitätsreduzierende Ansatz wird in vielen experimentellen psychoaksustischen Untersuchungen angewendet und liegt auch den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Anwendungen zugrunde.

Schallfeld

Die Wellenfront eines Schallfeldes kann nach dem Prinzip von Huygens und Fresnel [Kuc87] als Überlagerung von Elementarwellen aufgefaßt werden. Jeder Punkt eines beliebigen Wellenfeldes dient als Quelle einer elementaren Kugelwelle, wodurch der Wellenvorgang an jedem Meßpunkt innerhalb des Feldes berechenbar ist. Die Kugelwelle ist eine punktsymmetrische Welle mit folgenden Eigenschaften:

- Wellenparameter abhängig von der Entfernung

- Wellenparameter unabhängig von der Ausbreitungsrichtung

Schallquellen, die Kugelstrahlen erzeugen, werden Kugelstrahler 0. Ordnung, Elementarstrahler oder „atmende" Kugeln[2] genannt. Die erzeugten Schallwellen (Transversalwellen) breiten sich gleichphasig in radialer Richtung aus und lassen sich durch die beiden Gleichungen beschreiben:

$$p(t,r) = R_e\left\{const \cdot \frac{j2\pi f \varrho_0}{r}\, e^{j2\pi ft}\, e^{-j2\pi r/\lambda}\right\}, \tag{4.1}$$

$$v(t,r) = R_e\left\{const \cdot \left(\frac{j2\pi/\lambda}{r} + \frac{1}{r^2}\right)\, e^{j2\pi ft}\, e^{-j2\pi r/\lambda}\right\} \tag{4.2}$$

$p(t,r)$ bezeichnet den von der Entfernung r abhängigen Schalldruckverlauf, $v(t,r)$ den Schallschnelleverlauf. ϱ_0 ist die Dichte des Mediums, in dem sich der Schall ausbreitet. Die Schalldruckamplitude ist mit dem Faktor $1/r$ behaftet, d.h. die Amplitude reduziert sich mit wachsender Entfernung vom Kugelmittelpunkt. Gleiches gilt für den Verlauf der Schallschnelle im *Fernfeld* ($r \gg 2\pi r/\lambda$), während sich der Abfall im *Nahfeld* ($r \ll 2\pi r/\lambda$) proportional zu $1/r^2$ verhält.

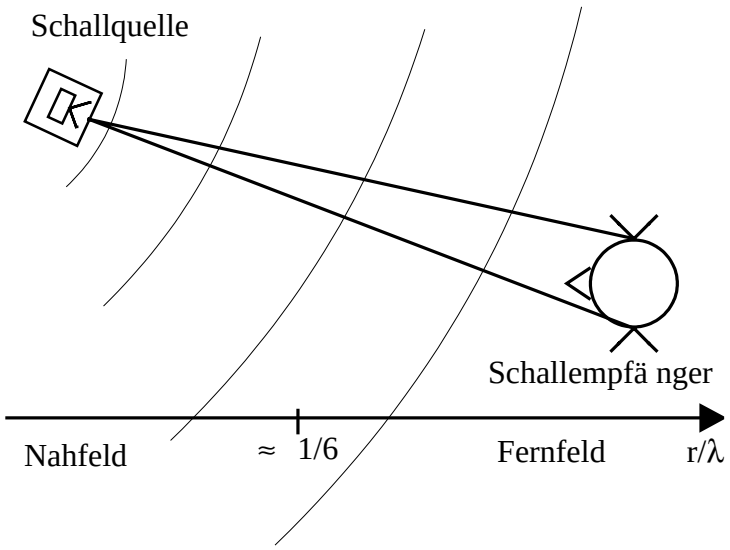


Abbildung 4.3: Physikalische Anordnung des Schallwellenempfangs, Bildung einer näherungsweise ebenen Wellenfront im Fernfeld

In guter Näherung gelten die Feldgleichungen bei genügend großer Entfernung des Meßpunktes auch für beliebige andere Strahler (z.B. Lautsprechermembran). Die Krümmung des Schallfeldes nimmt mit wachsender Entfernung immer weiter ab und das

[2]eine Kugelschallquelle weist eine Kugelform mit schwingender Oberfläche auf (zieht sich zusammen und bläht sich auf)

Wellenfeld nähert sich der *ebenen Welle* (s. Abbildung 4.3) [3].

Die Betrachtung *einer* Schallquelle stellt den physikalischen Elementarfall dar. Die Linearität der Schallfeldgleichungen ermöglicht die Superposition auf beliebig komplizierte Schallfelder. Diese Aussage gilt für die Übertragungsstrecke von der Schallquelle bis zum Eintreffen des Schalls am Trommelfell. Obgleich das weiterverarbeitende Nervensystem als nichtlinear angenommen werden muß, können wesentliche Merkmale des räumlichen Hörens durch die Betrachtung *einer* Schallquelle erkannt werden.

Testsignale

Prinzipiell können für die Untersuchung des räumlichen Hörens beliebig komplizierte Schallfelder verwendet werden. Für die systematische Vorgehensweise eignen sich jedoch besonders Signale mit möglichst elementaren zeitlichen und spektralen Strukturen. In der Psychoakustik werden deshalb häufig *Elementarsignale* als Testsignale verwendet.

- Stoßklick (schmaler Rechteckimpuls, Impulsbreite $\Delta t < 25\mu s$)
- Dauertöne (monofrequente Schwingungen)
- Gauß-Töne
- Rauschsignale („weiß" bzw. „rosa")[4]

Die ersten beiden Signale sind aus der Analyse von Zeitfunktionen durch das Überlagerungsintegral (Impuls) bzw. durch das Fourierintegral (Dauertöne) bekannt,

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)\,\delta(t-\tau)\,d\tau \tag{4.3}$$

und

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)\,e^{j2\pi ft}\,df \tag{4.4}$$

wobei $\delta(t-\tau)$ den Dirac-Stoß zum Zeitpunkt t, $X(f)$ das komplexe Fourierspektrum und der Realteil von $e^{j2\pi ft}$ eine monofrequente Schwingung der Frequenz f und der Amplitude 1 darstellt.

Wie im weiteren erläutert wird, ist das räumliche Hören *frequenzabhängig*. Abhängig davon, ob die Energie bzw. Leistung im Zeit- oder Frequenzbereich konzentriert

[3] für übliche Lautsprecherabmaße wurde in [Bla97] eine Pegeldifferenz von 1 dB ermittelt, wenn in 3 m Entfernung ein Meßmikrophon vom linken zum rechten Ohr bewegt wurde

[4] „weißes Rauschen": konstante Leistung / absoluter Bandbreite Δf; „rosa Rauschen": konstante Leistung / relativer Bandbreite $\Delta f/f_0$)

werden soll, bieten sich Stoßklicks oder Dauertöne an. Der Gaußton erfüllt einen Kompromiß zwischen beiden Forderungen. Eine breitbandige Erregung des Systems wird durch die Verwendung von „weißem" Rauschen ermöglicht. Gleichzeitig können größere Energien an das System abgegeben werden als dies durch Stoßklicks möglich ist, die in ihrer Amplitude zur Vermeidung von Zerstörungen an Schallsender und/oder Schallempfänger (Gehör) begrenzt sind.

Reflexionen

Schallausbreitung in natürlicher Umgebung führt selbst bei *einer* Schallquelle i.d.R. zum Auftreten von Reflexionen an Gegenständen, die die Schallausbreitung hindern (z.B. Wände in einem Raum). Es bildet sich ein überlagertes Schallfeld von sich frei ausbreitenden und reflektierten Wellen. Das resultierende Schallfeld kann durch Methoden der Raumakustik beschrieben werden (z.B. [Rin95, Leh91]). Zweckmäßigerweise wird in prinziporientierten Untersuchungen auf Reflexionseffekte verzichtet. Unter Laborbedingungen kann diese Forderung näherungsweise durch schalltote bzw. reflexionsarme Räume realisiert werden.

4.2 Lokalisationsfähigkeit des menschlichen Gehörs

Bevor die Funktion einzelner am räumlichen Hören beteiligter Komponenten betrachtet wird (siehe Abschnitt 4.3) soll zunächst die Fähigkeiten des Gesamtsystems beurteilt werden. Das läßt sich zusammenfassen in der Frage: Wie gut ist das räumliche Hören beim Menschen ausgeprägt? Die nachfolgende Darstellung betrachtet das Lokalisationsvermögen in der Horizontal- und der Medianebene. Zur Erläuterung wird auf umfangreiche experimentelle Untersuchungen Bezug genommen [Bla97, MG91], in denen hörgesunde Versuchspersonen einem freien Schallfeld ausgesetzt waren (Schallquelle meist ein oder mehrere Lautsprecher unter reflexionsarmen Laborbedingungen). Diese Untersuchungsbedingung wird als *Freifeldhören* („free-field-listening") bezeichnet.

4.2.1 Räumlich-akustisches Auflösungsvermögen

Der „Bereich des schärfsten Hörens" liegt nahe der Vorwärtsrichtung ($\varphi = \delta \approx 0\,^\circ$), d.h. in diesem Bereich führen Ortsänderungen der Schallquelle am ehesten zu korrespondierenden Änderungen des Hörereignisortes. Die untere Grenze der Lokalisationsunschärfe beträgt dort etwa 2-3° [5]. Abbildung 4.4 zeigt repräsentativ das Ergebnis einer Lokalisationsstudie, bei der Versuchspersonen den Hörereignisort so genau wie möglich angeben mußten. Die über mehrere Versuchspersonen gemittelte Lokalisationsunschärfe beträgt etwa 2° in der Horizontalebene (Azimuth) und etwa 3.5° in der

[5] die akustische Lokalisationsfähigkeit liegt damit um zwei Größenordnungen unter dem des Sehsinns, mit dem Richtungsänderungen von weniger als einer Bogenminute erkannt werden

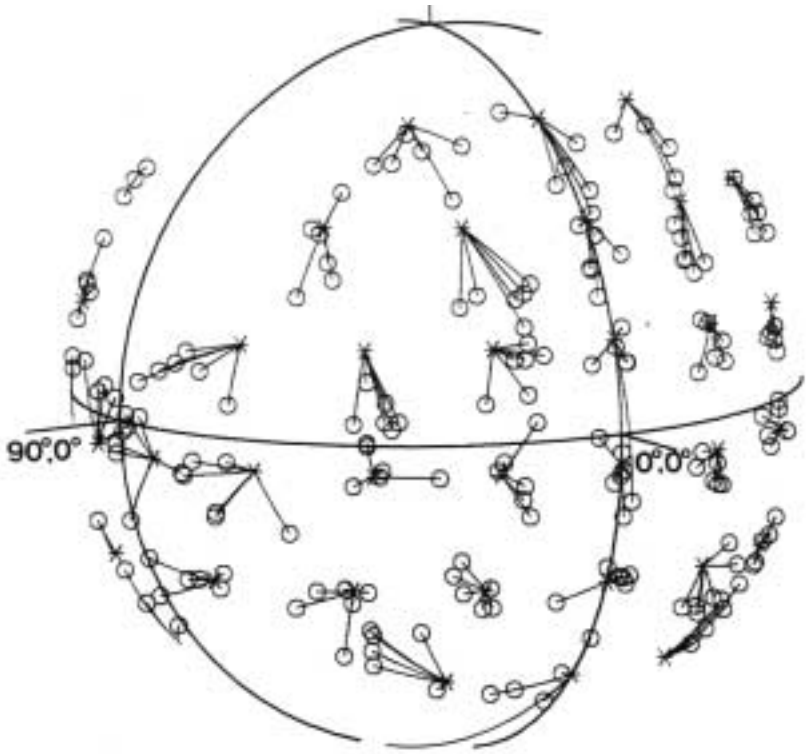


Abbildung 4.4: Lokalisation von Breitbandsignalen. Versuchspersonen im Ursprung der sphärischen Koordinaten, Frontaleinfall bei $(0°, 0°)$. Sterne markieren die Stimulusposition, offene Kreise die Antworten der Versuchspersonen. Stimulusinkremente $20°$ im Azimuth und in der Elevation ([MM90])

Medianebene (Elevation). Bei größerer seitlicher Auslenkung und an weiter hinten gelegenen Positionen erhöht sich die Lokalisationsunschärfe auf etwa $20°$. Zusätzliche Fehler in der Lokalisation treten durch Verwechslungen zwischen vorne/hinten auf („front/back confusions"). Dabei führt ein im vorderen Halbraum gelegenes Schallereignis zu einem achsensymmetrisch zur Ohrenachse gelegenen Hörereignis im hinteren Halbraum (s. Abschnitt 4.2.4).

4.2.2 Hören in der Horizontalebene

Die Besonderheit des Hörens besteht in der *binauralen Empfangskonstellation*. Schallsignale werden sowohl am linken als auch am rechten Ohr empfangen. In der Horizontalebene treten dadurch richtungsabhängige interaurale Intensitäts- und Laufzeitunterschiede auf (vgl. Abschnitt 4.3.1). Laufzeitunterschiede entstehen physikalisch durch Unterschiede in der zurückgelegten Signalwegstrecke zwischen linkem und rechtem Ohr. Intensitätsunterschiede werden im wesentlichen durch den Abschattungseffekt des Kopfes verursacht. So erfährt das der Schallquelle abgewandte Ohr eine Amplitudendämpfung um bis zu 35 dB [MG91]. *Die interauralen Unterschiede bzw. Merkmale sind*

die wesentlichen Lokalisationsquellen in der Horizontalebene. Abbildung 4.5 zeigt die Lokalisationsunschärfe für ausgewählte Schalleinfallsrichtungen. Ein Minimum wird in der Nähe der Vorwärtsrichtung ($\varphi = 0$) erreicht, während Auslenkungen zu den Rändern ($\varphi = 90$ und $\varphi = 270$) einen Anstieg um den Faktor 3 verursachen. Auch in rückwärtigen Positionen erfolgt ein Anstieg um etwa den Faktor 2.

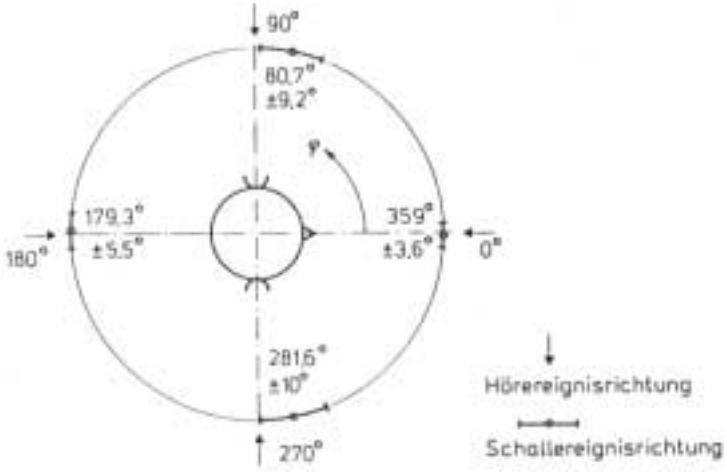


Abbildung 4.5: Lokalisationsunschärfe $\Delta\varphi_{min}$ in der Horizontalebene für ausgewählte Schallereignisrichtungen ($\varphi = \{0\,°, 90\,°, 180\,°, 270\,°\}$; Untersuchungsbedingungen: Signal (gaußverteiltes Rauschen, $t = 100\ ms$); 600 - 900 Versuchspersonen; Kopf fixiert ([Bla97])

Einflußgrößen der Lokalisation in der Horizontalebene

Die Lokalisationsfähigkeit in der Horizontalebene wird durch Signalparameter und durch die Untersuchungsbedingung beeinflußt:

- Signalfrequenz und -bandbreite
- Signaldauer
- Peilbewegungen des Kopfes

Breitbandige Signale können generell mit einer niedrigeren Unschärfe als schmalbandige lokalisiert werden[6]. Abbildung 4.6 zeigt die notwendige Variation der Schalleinfallsrichtung in Abhängigkeit von der Signalfrequenz und -bandbreite für die Wahrnehmung einer konstanten Hörereignisrichtung.

[6]Beispiel: schwierige Lokalisation eines Singvogels, der sehr schmalbandige Töne erzeugt

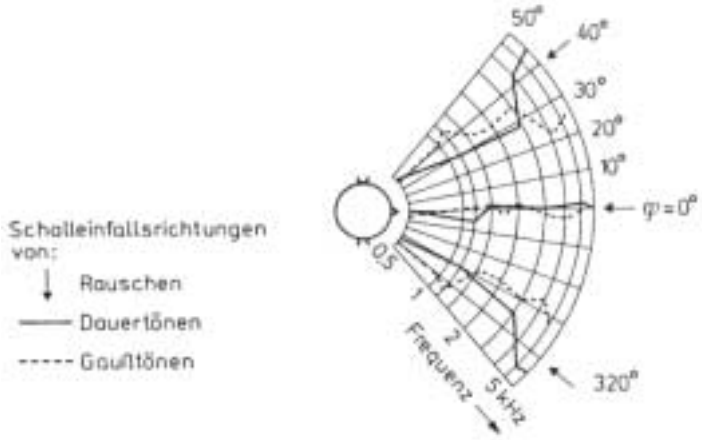


Abbildung 4.6: Lokalisation in der Horizontalebene in Abhängigkeit spektraler Signalparameter für 3 Richtungen $\varphi = \{0\,°, 40\,°, 320\,°\}$ ([Bla97])

Bis etwa 700 ms führt die Verlängerung der Signaldauer ebenfalls zur Verringerung der Lokalisationsunschärfe, während weitere Verlängerungen keinen Effekt mehr verursachen [Bla97]. Peilbewegungen des Kopfes, die geringgradig vielfach unbewußt einsetzen erleichtern die Richtungsbestimmung wesentlich (vgl. Abschnitt 4.3.4). In Lokalisationsuntersuchungen wird daher meist die Kopfposition kontrolliert bzw. Peilbewegungen werden durch Fixation des Kopfes ausgeschlossen.

4.2.3 Hören in der Medianebene

Räumliches Hören in der Medianebene unterscheidet sich systematisch von dem in der Horizontalebene. Bei näherungsweise symmetrischen Kopfabmessungen sind interaurale Merkmalen als Lokalisationsquellen nicht verfügbar. Dennoch ist eine Lokalisation möglich, wie Abbildung 4.7 zeigt. Zu diesem Zweck wertet das Gehör richtungsabängige spektrale Eigenschaften des Empfangssignals aus, die im wesentlichen durch die akustische Filterfunktion des Außenohrs verursacht werden[7] und als *monaurale Merkmale* bzw. „spectral cues" [MG91] bezeichnet werden. Im Gegensatz zu interauralen Merkmalen kann die spektrale Information prinzipiell mit *einem* Ohr ausgewertet werden[8]. Die Lokalisationsunschärfe in der Medianebene ist allerdings insgesamt größer als in der Horizontalebene.

Einflußgrößen der Lokalisation in der Medianebene

Die Lokalisationsfähigkeit in der Medianebene ist abhängig von Signalparametern und der Untersuchungsbedingung:

[7] direkt einfallender Schall überlagert sich mit in den Hohlräumen des Ohrs reflektiertem Schall

[8] der Lokalisationsvergleich mit einem und zwei Ohren bestätigt diese Überlegung [MG91, Bla97]

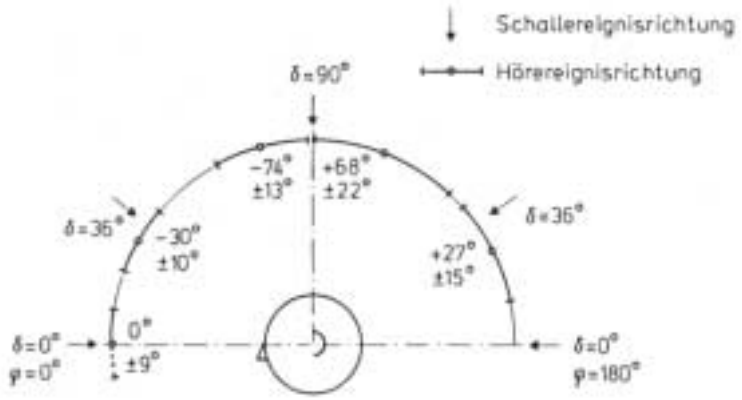


Abbildung 4.7: Lokalisationsunschärfe $\Delta\delta_{min}$ in der Medianebene; Untersuchungsbedingungen: Signal (Sprache eines bekannten Sprechers); 7 Versuchspersonen; Kopf fixiert ([Bla97])

- Signalfrequenz und -bandbreite
- Signaldauer
- Singalkenntnis/ -vertrautheit
- Peilbewegungen des Kopfes

Lokalisation in der Medianebene ist fast ausschließlich für Signale mit einer Bandbreite von $\Delta f \geq$ 1-2 Terzen möglich [Bla97]. Die Richtungswahrnehmung schmalbandigerer Signale ist alleine von der Mittenfrequenz des Signals abhängig (s. Abbildung 4.8). Dabei bewegen sich die Hörerignisse unabhängig vom Schallereignis auf frequenzbestimmten Bahnen.

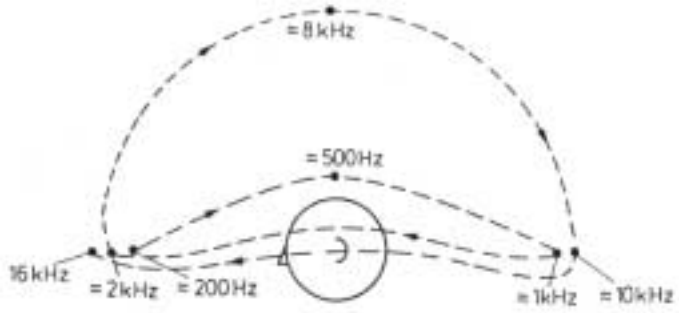


Abbildung 4.8: Hörereignisbahnen in Abhängigkeit von der Mittenfrequenz bei Schmalbandrauschen $\Delta f \leq$ 1-2 Terzen ([Bla97])

Sehr kurze, impulsartige Signale werden tendenziell in den hinteren Halbraum verlagert. Interessanterweise wird die Lokalisation in der Medianebene durch *a priori*

Information beeinflußt. So reduziert sich die Lokalisationsunschärfe, falls den Versuchspersonen das Signal bekannt ist. Hören in der Medianebene ist ein adaptiver, zeitvarianter Vorgang, der von Lernvorgängen profitiert. Ähnlich wie in der Horizontalebene erleichtern Peilbewegungen des Kopfes die Richtungswahrnehmung, durch die zusätzlich interaurale Merkmale auftreten.

4.2.4 Lokalisationsfehler

Richtungsinvertierungen

Ein typisches Phänomen beim Richtungshören in der Horizontalebene sind Richtungsinvertierungen („front/back confusions"). Das Hörereignis tritt dabei nicht in der Nähe des Schallereignisses auf, sondern befindet sich in einer axialsymmetrisch zur Ohrenachse gelegenen Position [Bla97, MG91].

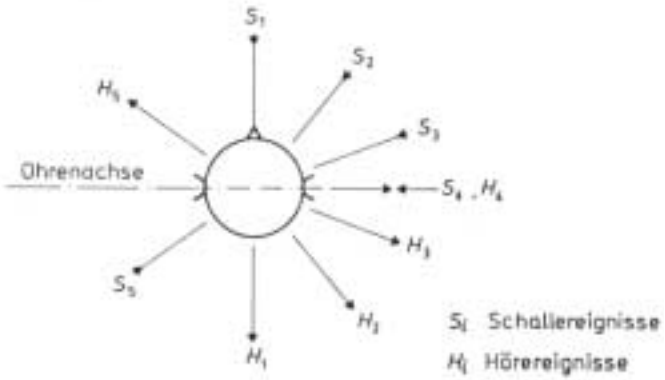


Abbildung 4.9: Axialsymmetrische Richtungsinvertierungen beim Hören in der Horizontalebene

Abbildung 4.9 verdeutlicht diesen Effekt, der vorwiegend bei schmalbandiger Erregung auftritt. Invertierungen können auch in der Medianebene beobachtet werden.

Trägheit des Gehörs

Das zeitliche Auflösungsvermögen des Gehörs ist nach unten begrenzt. Untersuchungen zur Trägheitslatenz in der Horizontalebene bestätigen, daß das Ohr nicht beliebig schnell auf Ortsänderungen der Schallquelle reagieren kann [Bla68, PBK70]. So werden für die Wahrnehmung eines vollständigen Richtungswechsel Links-Rechts durchschnittlich 172 ms benötigt, für einen Vorne-Hinten-Wechsel sogar 233 ms. Bei Unterschreitung dieser Mindestzeiten stellt sich ein diffus lokalisiertes Hörereignis ein. Diese Beobachtung muß vor allem bei Untersuchungen mit rasch wechselnden Schallquellenpositionen (z.B. bewegte Schallquellen) berücksichtigt werden.

4.3 Lokalisationsquellen

Der nachfolgende Abschnitt faßt die wesentlichen Merkmale zusammen, die dem Gehör zur Lokalalisation einer Schallquelle zur Verfügung stehen (Lokalisationsquellen). Obwohl in der Psychoakustik Einigkeit über die Relevanz der einzelnen Merkmale besteht, ist die Gewichtung untereinander und deren Bedeutung in variierenden Experimentsituationen immer noch Gegenstand aktueller Diskussionen.

4.3.1 Interaurale Merkmale (ITD/IPD und IID/ILD)

Interaurale Merkmale entstehen durch unterschiedliche Signalverhältnisse beim Schallwellenempfang an beiden Ohren. Zwei Effekte können unterschieden werden:

1. interaurale Laufzeit- bzw. Phasendifferenzen (ITD „interaural time difference" bzw. IPD „interaural phase difference")
2. interaurale Pegel- bzw. Intensitätsdifferenzen (ILD „interaural level difference" bzw. IID „interaural intensity difference")

Abbildung 4.10 verdeutlicht das Auftreten dieser Merkmale durch die Betrachtung des Schalldruckverlaufs.

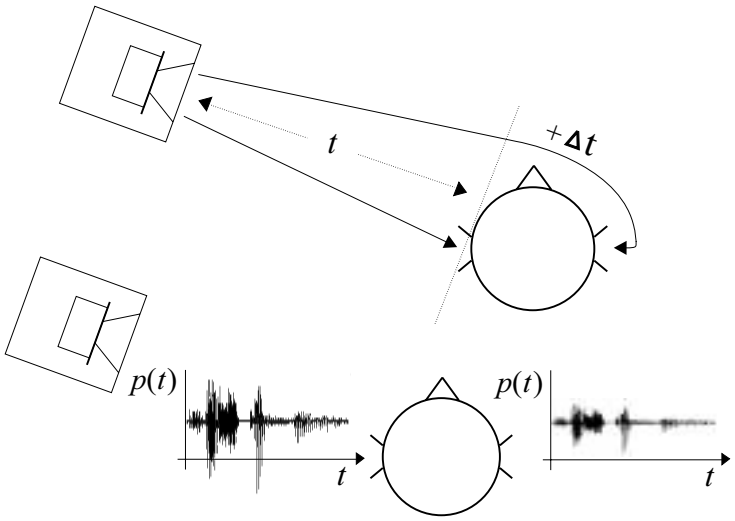


Abbildung 4.10: Interaurale Zeit- und Pegeldifferenzen (ITD/ILD)

Die interauralen Merkmale sind frequenzabhängig und können durch die interaurale (komplexe) Übertragungsfunktion $H_I(f)$ beschrieben werden, die das Verhältnis der Empfangssignale an beiden Ohren bildet.

$$H_I(f) = \frac{P_R(f)}{P_L(f)} = \frac{\hat{p}_r \; e^{j(2\pi f t + \Phi_r(f))}}{\hat{p}_l \; e^{j(2\pi f t + \Phi_l(f))}} = |H_I(f)| \; e^{-j\,b(f)} \tag{4.5}$$

Die Schalldrucksignale am linken ($P_L(f)$) und rechten Ohr ($P_R(f)$) besitzen frequenzabhängige Phasenverschiebungen ($\Phi_l(f)$bzw.$\Phi_r(f)$), die durch das Phasenmaß $b(f)$ beschrieben sind.

Auswertung von ITD und ILD

ITD/ILD werden durch das Ohr in unterschiedlichen Frequenzbereichen ausgewertet. Pegelunterschiede entstehen durch die Abschattungswirkung des Kopfes, die aufgrund der geometrischen Abmessungen erst bei Frequenzen größer als 3 kHz relevante Beiträge liefert. Demgegenüber dominiert die Auswertung von Laufzeitunterschieden bei niederfrequenten Signalanteilen bis etwa 1000 Hz. Dieser Zusammenhang ist unter dem Begriff der „Duplex-Theorie" bekannt [MG91]. Interaurale Merkmale vergrößern sich mit der seitlichen Auslenkung der Schallquelle und erreichen an den Rändern $\varphi = 90° \vee 270°$ jeweils Maxima[9]. Die ITD erreichen dort Werte bis etwa 630 μs bei $f \approx 1600\,\text{Hz}$. Typische ILD-Werte betragen 20 dB bei $f = 4\,\text{kHz}$ und erhöhen sich auf bis zu 35 dB bei $f = 10\,\text{kHz}$.

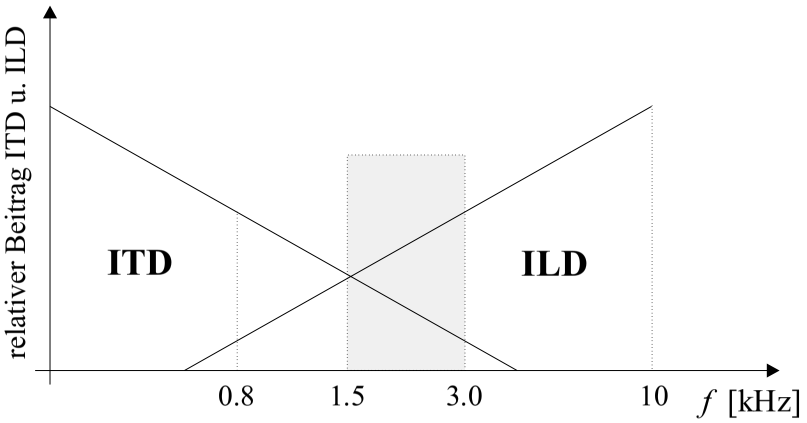


Abbildung 4.11: Frequenzabhängiger Beitrag von ITD und ILD („Duplex-Theorie")

In einem Frequenzband von 1500 - 3000 Hz sinkt die räumliche Hörleistung bedingt durch die schon eingeschränkte Auswertung der ITD und die noch mangelnde Wirksamkeit der ILD ab.

4.3.2 Monaurale Merkmale („spectral cues")

Zwei Überlegungen verdeutlichen, daß interaurale Merkmale alleine für die Erklärung des räumlichen Hörens nicht ausreichend sind:

1. Richtungshören in der Medianebene

[9] bei näherungsweiser Kopfsymmetrie

2. Mehrdeutigkeit interauraler Merkmale

Unter der Annahme symmetrischer Kopfabmessungen stehen für die Lokalisation in der Medianebene *keine* interauralen Merkmale zur Verfügung. Allerdings lassen sich auch beim Richtungshören in der Horizontalebene geometrische Orte mit konstanten interauralen Merkmalen finden. Diese Orte liegen auf Bahnen, die im Raum Mantelflächen eines Kegels bilden und als *Kegel der Verwechslung* („cones of confusion") bezeichnet werden [MG91, WADW93]. Abbildung 4.12 zeigt diese Kegel, die durch Projektion auf die Horizontalebene Konturen konstanter ITD bzw. ILD bilden (iso-ITDs bzw. iso-ILDs). Entlang dieser Linien, die die Medianebene einschließen und abhängig von der individuellen Kopfgeometrie abweichend verlaufen können, führen interaurale Merkmale zur mehrdeutigen Lokalisation. Besonders bei schmalbandiger Erregung ist dem Ohr die Bildung eines eindeutigen Hörereignisses nicht möglich, wodurch vermehrt „front/back confusions" auftreten.

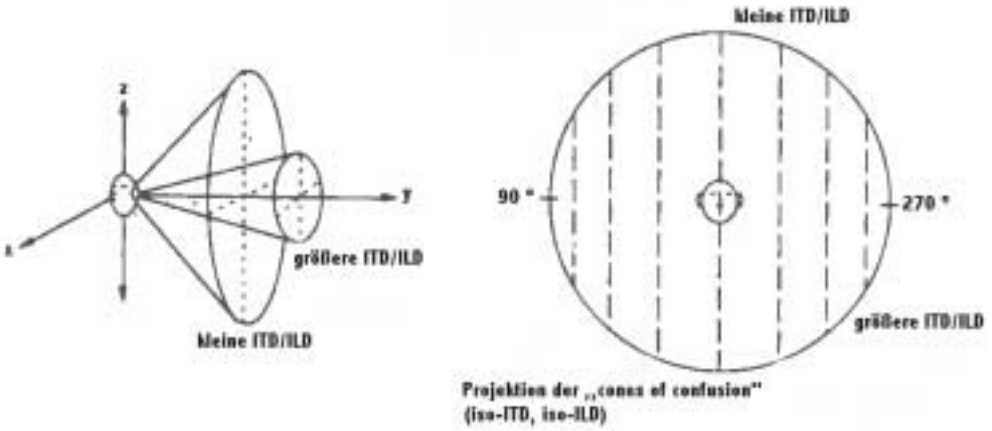


Abbildung 4.12: Orte mit konstanten interauralen Merkmalen (ITD und ILD) („cones of confusion") ([WADW93])

Auswertung monauraler Merkmale

Eintreffender Schall wird an der Ohrmuschel durch physikalische Effekte wie Reflexion, Abschattung, Streuung, Beugung und Interferenz beeinflußt. Das Auftreten dieser Effekte ist abhängig vom Verhältnis der Wellenlänge zur jeweiligen Grenzfläche. Bezogen auf die Abmessungen des Ohrs sind spektrale Veränderungen vorwiegend bei Frequenzen $f \geq 4\,\mathrm{kHz}$ relevant. Die Wirksamkeit monauraler Merkmale setzt damit eine breitbandige Erregung mit hochfrequenten Anteilen voraus. Die Signalform zeigt in diesem Bereich eine spezifische Abhängigkeiten von der Position der Schallquelle, woraus zu schließen ist, daß dort richtungsabhängige Information kodiert ist [Bla97]. Es wird vermutet, daß nicht alle Details durch des Gehör ausgewertet werden, sondern vielmehr kritische, richtungsbestimmende Frequenzbänder („directional bands") existieren [KW92, Bla97].

4.3.3 Interaurale vs. monaurale Merkmale

Interaurale Merkmale dominieren beim Richtungshören in der Horizontalebene, während monaurale Merkmale die Lokalisation in der Medianebene bestimmen. In natürlichen Hörsituationen treten beide Merkmale häufig überlagert auf. Hinsichtlich der Auswertung durch das Gehör können folgende Aussagen getroffen werden:

- monaurale M. dienen zur Auflösung interauraler Ambiguitäten und reduzieren in Folge das Auftreten von „front-back-confusions"
- interaurale M. werden in der Horizontalbene bevorzugt ausgewertet, wenn sowohl interaurale als auch monaurale M. verfügbar sind

4.3.4 Zusätzliche Einflußgrößen des räumlichen Hörens

Interaurale und monaurale Merkmale sind physikalische Eigenschaften der Schallsignale, die am Trommelfell empfangen werden. In einer natürlichen Hörsituation wird der resultierende räumliche Höreindruck durch weitere Parameter beeinflußt.

Einfluß von Kopfbewegungen auf das räumliche Hören

Die linearen Verzerrungen des Schallsignals sind von der Richtung und Entfernung der Schallquelle relativ zum Kopf der Versuchsperson abhängig. Ändert sich die Kopfposition während des Hörens, ändern sich die interauralen und monauralen Merkmale in spezifischer Weise. Es können zwei Kategorien von Kopfbewegungen unterschieden werden:

- unbewußte, spontane (reflektorische) Hinwendungen zum Hörereignisort
- bewußte Peil- und Lauschbewegungen

Die Voraussetzung für Kopfbewegungen der ersten Kategorie ist, daß bereits zu Beginn der Bewegung ein annähernd präzis lokalisiertes Hörereignis vorliegt. Das Hörereignis gelangt durch die Hinwendung in den Bereich des schärfsten Hörens nahe der Vorwärtsrichtung. Bewußte Peilbewegungen setzen eher dann ein, wenn von Anfang an ein unscharf lokalisiertes Hörereignis vorliegt. Durch geringgradige Bewegungen ($1° - 5°$) erhält das Gehör so viel gewinnbringende Information, daß nach vollzogener Kopfbewegung nahezu alle Hörerignisorte mit der Position der Schallquelle übereinstimmen [Bla97]. Kopfbewegungen sind damit ein effektives Mittel zur Auflösung interauraler Mehrdeutigkeiten und reduzieren das Auftreten von „front/back confusions". In kontrollierten Untersuchungen zum räumlichen Hören besteht daher die Notwendigkeit zur Kontrolle von Kopfbewegungen.

Einfluß der Augenposition auf das räumliche Hören

Räumliches Hören kann als *eine* Eingangsgröße in ein körperbezogenes System der Raumwahrnehmung aufgefaßt werden (vgl. Abschnitt 3.4). Eine kohärente räumliche Wahrnehmung wird in diesem System u.a. durch die Integration akustischer und visueller Information erzielt. Zwischen visueller und akustischer Lokalisation existieren substantielle Unterschiede. Während ein visueller Reiz immer eine entsprechende Position auf der visuellen Rezeptoroberfläche (Netzhaut) hinterläßt, muß die Position eines Schallereignisses durch die Auswertung interauraler und monauraler Merkmale berechnet werden. Untersuchungen zur visuell-akustischen Interaktion zeigen, daß das visuell bessere Lokalisationsvermögen für die akustische Lokalisation verwendet wird und quasi als Kalibrierung dient [KB95, SM90]. Naheliegend ist daher die Frage nach dem Einfluß der Augenposition auf die akustische Lokalisation. In mehreren Studien wurde eine Verlagerung der Hörereignisse in zur Augenposition entgegengesetzter Richtung beobachtet [FFNA96, LE96].

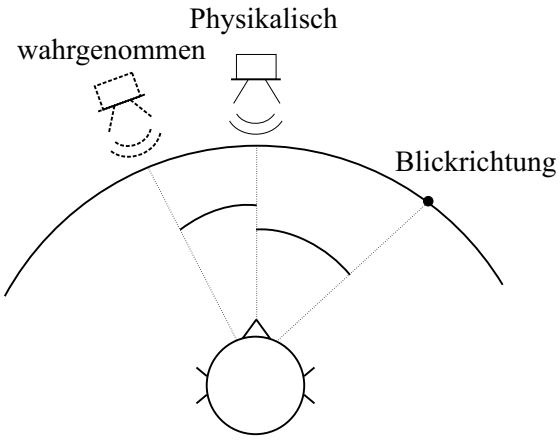


Abbildung 4.13: Einfluß der Augenposition auf das räumliche Hören
α**:** seitliche Auslenkung der Augenposition (Blickrichtung)
β**:** korrespondierende (gegensinnige) Verlagerung des Hörereignisses

Abbildung 4.13 verdeutlicht diesen Effekt. Die Schallquelle ist physikalisch frontal vor der Versuchsperson angeordnet. Bei nach vorne gerichtetem Blick wird das Hörereignis in der *subjektiv empfundenen Mitte* (SSA, „subjective straight ahead") wahrgenommen. Wechselt die Blickrichtung bei konstanter Schallquellenposition um den Winkel α nach rechts, entsteht ein Hörereignis, das um den Winkel β nach links verlagert ist. Die Ursache für diesen Effekt liegt in einer zur Blickrichtung gleichsinnigen Verlagerung der subjektiv empfundenen akustischen Mitte nach rechts. Um bei nach rechts gerichteter Blickrichtung einen aus der Mitte empfundenen Höreindruck zu erzielen, muß die Schallquelle physikalisch ebenfalls nach rechts verschoben werden. Die Größenordnung der Verlagerung wurde experimentell untersucht, wobei für β Werte zwischen $1^\circ - 8^\circ$ bei $\alpha = 45^\circ$ bestimmt werden konnten [LE96].

4.4 Systemtheorie der binauralen Simulation

Die Untersuchung räumlicher Hörleistungen erfordert die Erzeugung eines räumlichen Höreindrucks. In der Psychoakustik wird hierzu häufig eine kreisförmig um die Versuchsperson angeordnete externe Lautsprecheranordnung verwendet (*Freifeldanordnung*), die sich zur Vermeidung von Störeinflüssen in einer reflexionsarmen Laborumgebung befindet. Der folgende Abschnitt beschreibt ein technisches Lösungskonzept (*binaurale Simulation*), mit dessen Hilfe ein räumlicher Höreindruck über Kopfhörer erzielt werden kann.

4.4.1 Grundgedanke der binauralen Simulation

Unter der Voraussetzung, daß alle Lokalisationsquellen für die Entstehung des räumlichen Höreindrucks beim Freifeldhören bekannt sind, sollte es prinzipiell möglich sein, diesen Höreindruck auch unter Kopfhörerbedingungen zu simulieren [WK89a]. Diese Überlegung beschreibt die Grundidee der binauralen Simulation. Das Schallsignal am Trommelfell (Ohrsignal) wird dabei als wesentliche Eingangsgröße für das räumliche Hören betrachtet. Ein vergleichbarer Höreindruck entsteht genau dann, wenn die Signalverhältnisse am Trommelfell unter Kopfhörerbedingungen exakt denen unter Freifeldbedingungen entsprechen. Dieser Ansatz stellt insofern eine Vereinfachung dar, als nur Lokalisationsquellen berücksichtigt werden, die im Empfangssignal kodiert sind (interaurale und monaurale Merkmale) und weitere psychoakustische Abhängigkeiten (vgl. Abschnitt 4.3.4) zunächst unbeachtet bleiben. Die zentrale Frage ist, wie die akustischen Signale aufbereitet werden müssen, damit sie am Empfangsort (Trommelfell) den gleichen Informationsgehalt besitzen wie beim natürlichen Freifeldhören.

4.4.2 Schallwellenempfang am Ohr

Faßt man das räumliche Hören als System auf[10], erfährt das akustische Signal durch die Übertragung von der Schallquelle zum Trommelfell richtungsabhängige Amplituden- und Phasenverzerrungen. Das System besitzt die Eigenschaft der Linearität, die aus der Linearität der Schallwellengleichungen folgt (vgl. Abschnitt 4.1.2). Bei konstanter Sender-Empfänger Konstellation ist das System ferner zeitinvariant und kann als LZI-System beschrieben werden. Die Übertragungsstrecke des Schalls kann in mehrere Abschnitte untergliedert werden:

1. Freifeldübertragung (Schallquelle - Kopfnähe)
2. Außenohrübertragung (Kopfnähe - Eingang Gehörgang)
3. Übertragung im Gehörgang (Eingang Gehörgang - Trommelfell)

[10] betrifft ausschließlich die physikalische Übertragungsstrecke ohne Berücksichtigung von Verarbeitungsprozessen im ZNS

Freifeldübertragung

Bei hinreichend großer Entfernungen ($r/\lambda \geq 1/6$) der Schallquelle bildet sich in Kopfnähe näherungsweise eine ebene Welle (vgl. Abbildung 4.3). Im hörbaren Frequenzbereich (16 Hz $\leq f \leq$ 20 kHz) wird der Schalldruckverlauf bis etwa 15 m Entferung durch die linearen Schallfeldgleichungen (4.1) und (4.2) beschrieben. Der Verlauf des Schalldrucks als breitbandig gemessener Effektivwertpegel folgt dem $1/r$-Gesetz, d.h. die Schalldruckamplitude nimmt mit Verdopplung der Entfernung um 6 dB ab. Die Übertragungsstrecke weist in diesem Abschnitt lediglich eine *Dämpfung* auf und ist als *quasi verzerrungsfrei* zu betrachten. Erst bei größeren Entfernungen überlagert sich eine frequenzabhängige Verzerrung[11]. Die Dämpfung ist *richtungsunabhängig* und enthält damit *keine* Richtungsinformation.

Außenohrübertragung

In Kopfnähe bis zum Eingang des Gehörgangs wird das akustische Signal durch physikalische Effekte (Reflexion, Abschattung, Streuung, Beugung, Interferenz) beeinflußt. Diese finden am Rumpf, Kopf und vor allem am Außenohr statt.

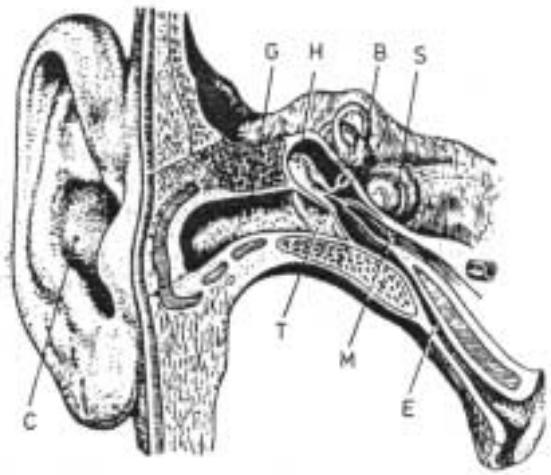


Abbildung 4.14: Ohrenmodell (nach [Bla97]);
Legende: B: Bogengänge, S: Schnecke, M: Trommelfellspanner
C: Cavum conchae (Haupthöhle), G: äußerer Gehörgang, T: Trommelfell
H: Hammer

Das Außenohr besteht aus der Ohrmuschel und dem Eingang des Gehörganges. Die Ohrmuschel weist eine reliefartige Öberfläche mir zahlreichen Höhlen auf, in denen sich Schall sammeln kann. Das Empfangssignal erfährt dadurch *frequenzabhängige Dämpfungen und Verzögerungen*, weshalb das Außenohr die Funktion eines akustischen Filters besitzt [Bla97]. Die linearen Verzerrungen sind *richtungs- und entfernungsabhän-*

[11] hohe Spektralanteile werden stärker als niedrige gedämpft

gig. Außenohrverzerrungen bilden einen bedeutenden Anteil der monauralen Merkmale und erfüllen damit eine zentrale Rolle beim räumlichen Hören.

Übertragung im Gehörgang

Von außen betrachtet bildet der Gehörgang eine Röhre, die durch das Trommelfell einseitig abgeschlossen ist. Schallwellen werden am Trommelfell, das die Funktion eines Druckempfängers erfüllt, in Schwingungen umgesetzt. Der Gehörgang kann näherungsweise als akustische Röhre mit schallharten Wänden betrachtet werden, weshalb die Schallausbreitung mit Hilfe der Leitungsgleichungen beschrieben werden kann:

$$p(l) = p_{Tr} \cosh \gamma\, l \;+\; \frac{Z_W}{Z_{Tr}}\, p_{Tr} \sinh \gamma\, l, \tag{4.6}$$

$$q(l) = q_{Tr} \cosh \gamma\, l \;+\; \frac{Z_{Tr}}{Z_W}\, p_{Tr} \sinh \gamma\, l \tag{4.7}$$

Glg. (4.6) und (4.7) beschreiben den (komplexen) Schalldruck- bzw. Schallflußverlauf ($p(l)$ bzw. $q(l)$) einer schwach verlustbehafteten Leitung mit dem (komplexen) akustischen Wellenwiderstand Z_W, die mit der Trommelfellimpedanz Z_{Tr} abgeschlossen ist bei sinusförmiger Erregung. Das komplexe Ausbreitungsmaß $\gamma = \alpha + j\,\beta$ enthält die Dämpfung α und reduziert sich im verlustfreien Fall auf das Phasenmaß $\beta = 2\pi/\lambda$. Abbildung 4.15 verdeutlicht das Prinzip der Ersatzschaltung und weist auf die Ana-

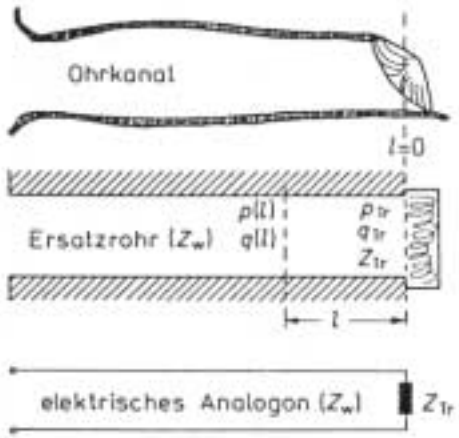


Abbildung 4.15: Ersatzschaltbild der Schallausbreitung im Gehörgang

logie elektrischer Leitungen und akustischer Schallausbreitung hin (Schalldruck $\rightarrow$ Spannung, Schallfluß $\rightarrow$ Strom). Aus den Leitungsgleichungen folgt, daß die Schallausbreitung im Gehörgang lediglich vom Abschluß der Leitung abhängig sind. Für die Schalldrucküübertragungsfunktion an einem beliebigen Ort im Gehörgang $H_G(f)$ gilt:

$$H_G(f) = \frac{p_{Tr}}{p(l)} = \frac{1}{\cosh \gamma\, l \;+\; \frac{Z_W}{Z_{Tr}} \sinh \gamma\, l} \tag{4.8}$$

Die Schallausbreitung im Gehörgang ist damit *richtungsunabhängig*, d.h. die vollständige Richtungsinformation ist bereits am Eingang des Gehörgangs verfügbar[12]. Der Gehörgang liefert daher keinen direkten Beitrag zum Richtungshören.

Schallübertragung als System

Unter Vernachlässigung zeitvarianter Adaptions- und Lernvorgänge, Kopfbewegungen und visuellen Einflüssen kann das räumliche Hören als lineares, zeitinvariantes Übertragungssystem aufgefaßt werden (s. Abbildung 4.16).

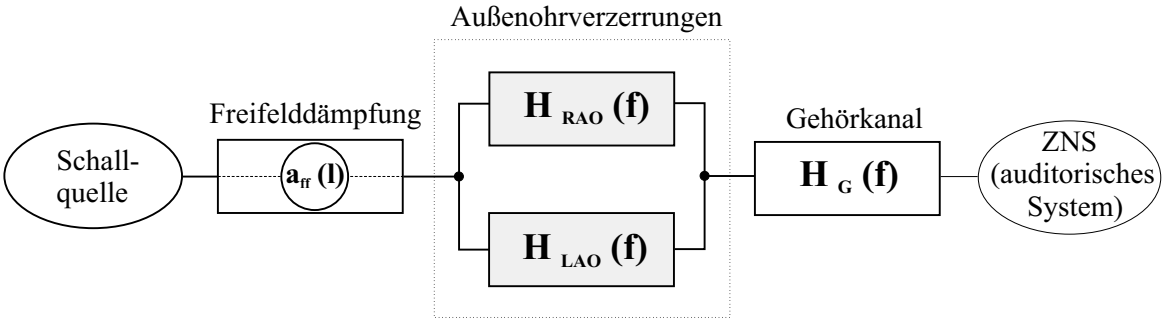


Abbildung 4.16: Räumliches Hören als LZI-System

Die Freifelddämpfung wird durch ein entfernungsabhängiges Dämpfungsglied $a_{ff}(l)$ repräsentiert. Die *richtungsabhängigen* Verzerrungen durch die Außenohren werden durch die beiden Außenohrübertragungsfunktionen $H_{LAO}(f)$ (linkes Ohr) und $H_{RAO}(f)$ (rechtes Ohr) beschrieben werden, an die sich die Gehörgangübertragung $H_G(f)$ anschließt, die allerdings keinen Beitrag mehr zur Richtungsinformation liefert.

4.4.3 Prinzip der HRTF (head-related-transfer-function)

Durch Superposition können die einzelnen Abschnitte der Übertragungsstrecke (Freifeld, Außenohr, Gehörgang) zusammengefaßt werden. Die entstehende Übertragungsfunktion wird in der Psychoakustik als HRTF (head-related-transfer-function) bezeichnet. Die binaurale Empfangssituation erfordert die getrennte Betrachtung von linkem und rechtem Ohr ($HRTF_L$ und $HRTF_R$).

Wie bereits erwähnt, ist das Ziel der binauralen Simulation, die Signalverhältnisse am Trommelfell unter Kopfhörerbedingungen so zu simulieren, daß sie identisch mit denen beim natürlichen Hörern in freier Umgebung (Freifeldhören) sind. Mit Hilfe der Eingang-Ausgang Beziehung linearer Systeme wird die Beschreibung auf beliebige Sendesignale (Eingangssignale) erweitert:

$$Y_L(f) = HRTF_L(f)\, X_L(f) \tag{4.9}$$

$$Y_R(f) = HRTF_R(f)\, X_R(f) \tag{4.10}$$

[12] näherungsweise ab einer Eintrittstiefe von ca. 5 mm in den Gehörgang

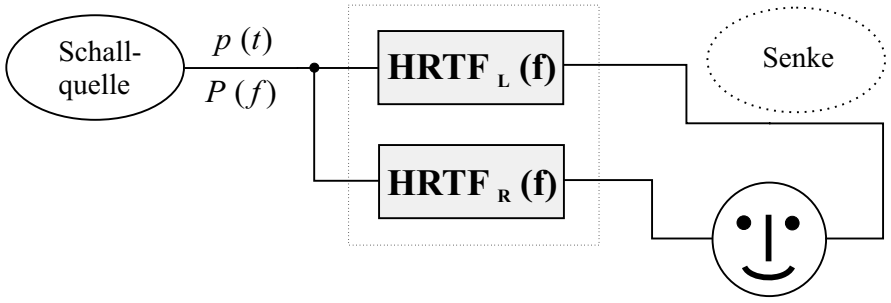


Abbildung 4.17: Übertragungssystem des Freifeldhörens

Y bzw. X sind die Fouriertransformierten des Empfangs- bzw. Sendesignals an beiden Ohren. Aufgrund der Richtungsabhängigkeit existiert für jede Position der Schallquelle ein Paar von Übertragungsfunktionen $HRTF_L(f, \varphi, \delta)$ und $HRTF_R(f, \varphi, \delta)$.

4.4.4 Messung der HRTF

In folgenden Abschnitt wird das Prinzip erläutert, nach dem die Übertragungsfunktion HRTF meßtechnisch bestimmt werden kann. Gleichzeitig werden Überlegungen zur Aufwandsabschätzung und -reduktion dargestellt.

Prinzip der HRTF-Messung

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der HRTF besteht in der Messung der Impulsantwort z.B. durch ein akustisches Impulsantwortverfahren ([MB95, Van94, RV89]). Hierzu wird das Empfangssignal am bzw. in der Nähe des Trommelfells bei impulsförmiger Anregung des Systems aufgezeichnet. Abbildung 4.18 zeigt den vereinfachten Meßaufbau zur Bestimmung der HRTF. Das Eingangssignal $x_1(t)$ wird durch eine Steuereinheit (Workstation oder PC mit Signalprozessorkarte) erzeugt, das einen Lautsprecher erregt. Mit Hilfe von im Gehörkanal (in der Nähe des Trommelfells) applizierten Miniaturmikrophone werden die Zeitsignale $y_{1l}(t)$ und $y_{1r}(t)$ am linken und rechten Ohr aufgezeichnet. Der Lautsprecher ist auf Kreisbahnen im Abstand r um den Kopf herum beweglich, wodurch die binaurale Impulsantwort für alle interessierenden Schallquellenpositionen bestimmt werden kann. Die gesamte Versuchsanordnung befindet sich zur Minimierung störender Einflüsse in einem reflexionsarmen Raum. Aus den gewonnenen Meßdaten ($y_{1l}(t)$ bzw. $y_{1r}(t)$) ist die HRTF allerdings nicht unmittelbar bestimmbar. Für die gemessene Antwort an den Mikrophonen $y_1(t)$ gilt im Frequenzbereich:

$$Y_1(f) = X_1(f)\, H_{LS}(f)\, HRTF(f)\, H_M(f) \tag{4.11}$$

Enthalten ist die Charakteristik des Eingangssignals $X_1(f)$ und neben der interessierenden $HRTF(f)$ auch die Übertragungseigenschaften von Lautpsrecher ($H_{LS}(f)$) und

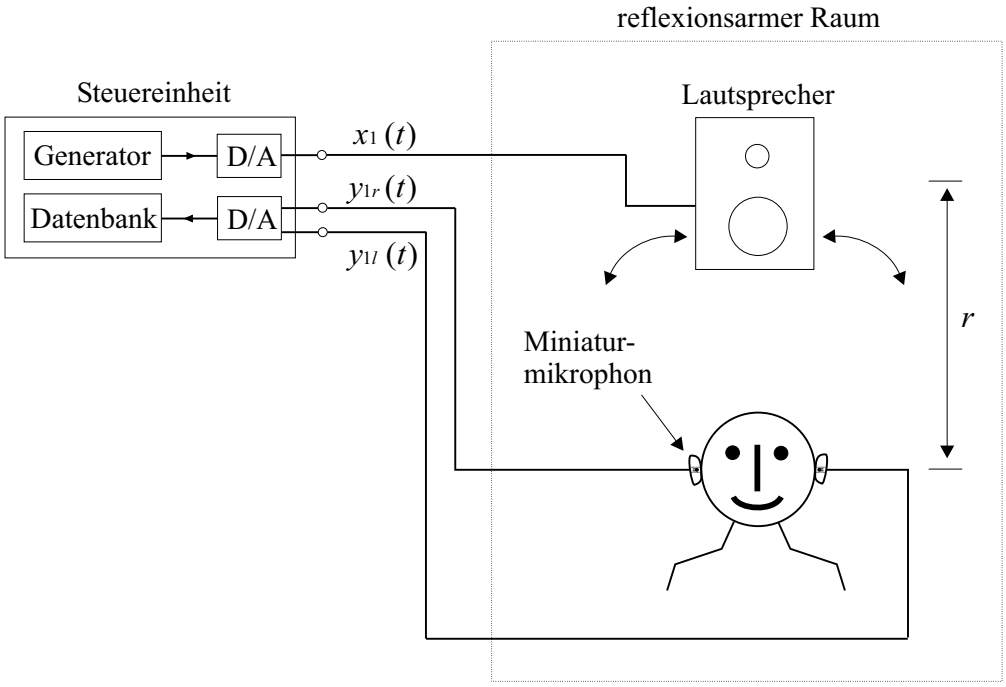


Abbildung 4.18: Meßaufbau zur Bestimmung der HRTF

verwendetem Mikrophon ($H_M(f)$). Neben den gesuchten richtungsabhängigen Verzerrungen treten zusätzlich *aufnahmeseitige* Verzerrungen auf.

In der binauralen Simulation treten ferner *wiedergabeseitige* Verzerrungen durch die Übertragungseigenschaften des verwendeten Kopfhörers auf. Diese Verzerrungen lassen sich mittels geschickter Referenzmessungen ermitteln. Die *richtungsunabhängige*[13] Übertragungsfunktion des Kopfhörers $H_{KH}(f)$ kann durch die Anordnung im oberen Teil der Abbildung 4.19 bestimmt werden:

$$Y_2(f) = X_1(f)\, H_{KH}(f)\, H_M(f) \tag{4.12}$$

Durch Division der Antworten $Y_1(f)/Y_2(f)$ wird die doppelt vorhandene Übertragungsfunktion des Mikrophons eliminiert und gleichzeitig die Kopfhörerübertragungsfunktion invertiert:

$$HRTF'(f) = \frac{Y_1(f)}{Y_2(f)} = HRTF(f)\, H_{LS}(f)\, {H_{KH}}^{-1}(f) \tag{4.13}$$

Unter der Voraussetzung, daß für die Aufzeichnung und Wiedergabe baugleiche Kopfhörer verwendet werden, sind die Signalverzerrungen in der binauralen Simulation identisch mit denen unter Freifeldbedingungen. Die Kopfhörerwiedergabe beinhaltet allerdings noch die Verzerrungen des in der Aufzeichung verwendeten Lautsprechers, was abhängig vom Anwendungsfall störend sein kann. Im unteren Teil von Abbildung

[13] d.h. zur Bestimmung der Impulsantwort genügt es, eine Position zu vermessen

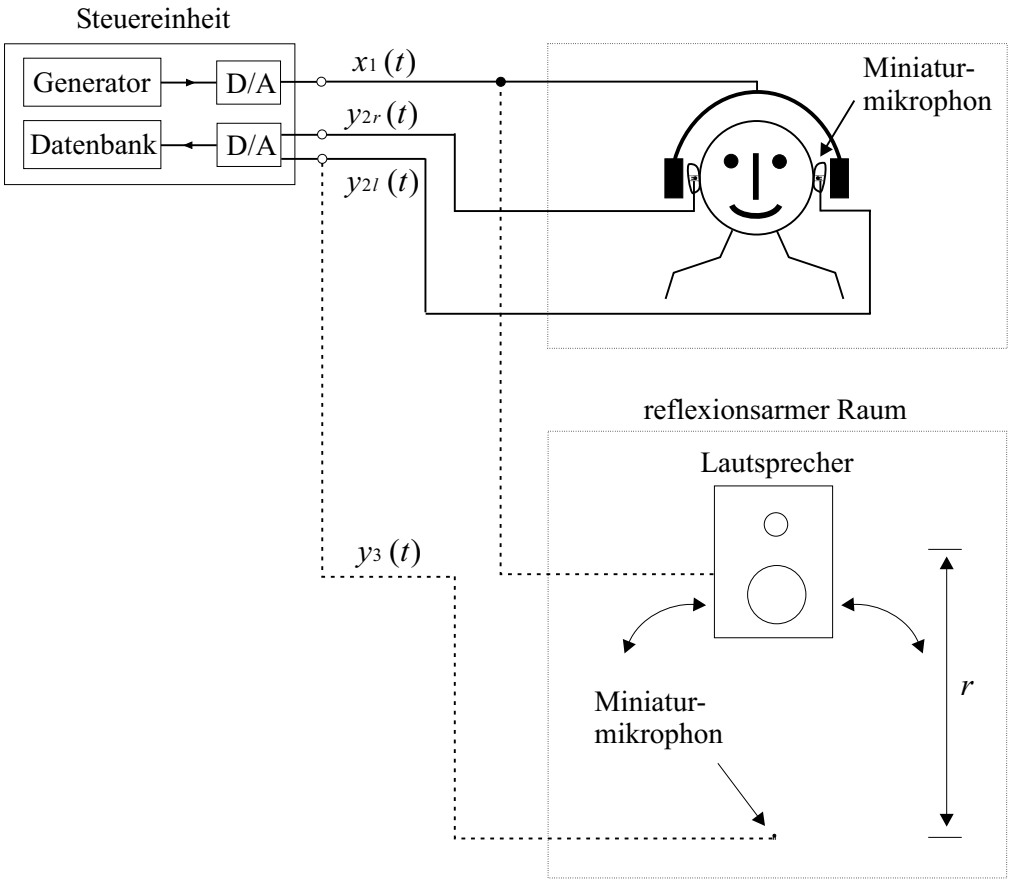


Abbildung 4.19: Meßaufbau zur Bestimmung von Kopfhörer- und Lautsprecherübertragungsfunktion (Referenzmessungen)

4.19 ist daher eine Anordnung zur Messung der ebenfalls *richtungsunabhängigen* Lautsprecherübertragungsfunktion $H_{LS}(f)$ dargestellt:

$$Y_3(f) = X_1(f)\, H_{LS}(f)\, H_M(f) \tag{4.14}$$

$$HRTF''(f) = \frac{Y_1(f)}{Y_2(f)\, Y_3(f)} = HRTF(f)\, {H_M}^{-1}(f)\, {H_{KH}}^{-1}(f) \tag{4.15}$$

Als störendes Residuum in der Übertragungsfunktion $HRTF''(f)$ verbleibt lediglich die inverse Mikrophonübertragungsfunktion ${H_M}^{-1}(f)$.

Zur Abschätzung des Meßaufwandes soll kurz zusammengefaßt werden: Die Gewinnung der interessierenden Übertragungsfunktion $HRTF(f)$ erfordert Messungen nach Abbildung 4.18, die getrennt für jedes Ohr und für jede in der binauralen Simulation benötigte Schallquellenposition (φ, δ) bei konstanter Entfernung r durchgeführt werden müssen[14]. Abhängig von der Art der Entzerrung sind zusätzlich einmalige (da richtungsunabhängige) Messungen zur Bestimmung der Kopfhörer- und/oder Lautsprecherübertragungsfunktion notwendig, die in Abbildung 4.19 dargestellt sind.

[14] in der Horizontalebene sind bei einer Auflösung von 5° dadurch 72 Messungen notwendig

4.4.5 Binaurales Simulationssystem

Unter der Voraussetzung, daß die Übertragungsfunktion HRTF bekannt ist, kann ein binaurales Simulationssystem nach dem Prinzip in Abbildung 4.20 aufgebaut werden. Die Funktionsweise wird im Zeitbereich für eine digitale Realisierung beschrieben, wobei die Impulsantwort der Übertragungsfunktion HRTF als HRIR (head-related-impulse-response) bezeichnet wird.

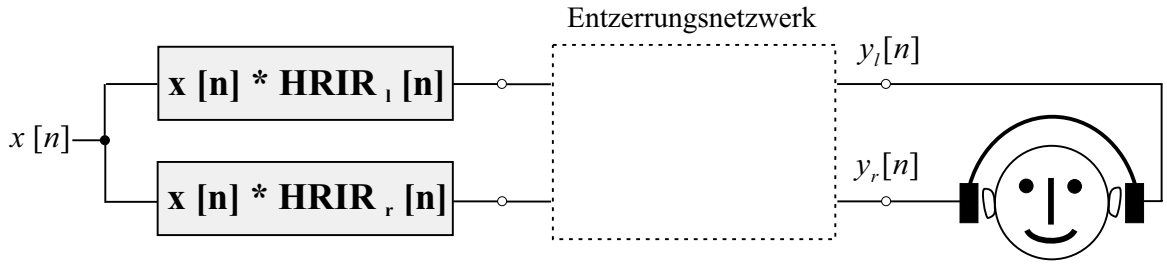


Abbildung 4.20: Prinzip des binauralen Simulationssystems in zeitdiskreter Realisierung

Eine beliebige Eingangsfolge $x[n]$ erhält durch zeitdiskrete Faltung mit der Impulsantwort $HRIR[n]$ die richtungsabhängigen Verzerrungen, die einer Freifeldübertragung entsprechen. Im nachfolgenden Entzerrungsnetzwerk werden störende aufnahmeseitige und/oder wiedergabeseitige Verzerrungen mittels inverser Filterung kompensiert. Die Kopfhörerwiedergabe erfolgt getrennt für beide Ohren in zweikanaliger Darbietung $(y_l[n], y_r[n])$. Zu beachten ist, daß für jede simulierte Position der Schallquelle ein separates Paar von Impulsantworten $HRIR_l[n]$ bzw. $HRIR_r[n]$ erforderlich ist, das an genau jener Schallquellenposition im Meßaufbau (s. Abbildung 4.18) zuvor bestimmt wurde.

Die Impulsantwort HRIR enthält die Summe aller Verzerrungen, die das Schallsignal in der Übertragung von der Schallquelle bis zum Empfang am Trommelfell erfährt. Enthalten sind sowohl richtungsabhängige spektrale Verzerrungen (monaurale Merkmale) als auch interaurale Merkmale, die eine für jedes Ohr getrennte Betrachtung erforderlich machen.

4.4.6 Psychoakustische Validität

Die Zuverlässigkeit der binauralen Simulation kann prinzipiell in zwei Aspekten überprüft werden:

- Signaläquivalenz der akustischen Signale
- Empirischer Nachweis durch Hörversuche

Im ersten Fall wird untersucht, welche Abweichungen die Empfangssignale am Trommelfell aufweisen, wobei die binaurale Simulation mit dem Hören in natürlicher Umgebung (Freifeldhören) verglichen wird. Durch Korrelationsverfahren können quantitative Aussagen über die Äquivalenz der akustischen Signale gewonnen werden, wodurch die Zielsetzung der binauralen Simulation (Erzeugung identischer Ohrsignale) überprüft wird. Der Erfolg der Simulation ist allerdings nicht alleine von der Signaläquivalenz abhängig, sondern muß in *psychoakustischen Untersuchungen* bestätigt werden, bei denen Parameter wie Lokalisation und Lokalisationsunschärfe in beiden Untersuchungsbedingungen bestimmt und verglichen werden.

Beide Aspekte wurden im Rahmen repräsentativer Studien[15] überprüft [WK89a, WK89b]. Im Signalvergleich wurden Abweichungen von weniger als 1 - 2 dB im Amplitudengang bzw. von weniger als 10° im Phasengang festgestellt, von denen kein relevanter Einfluß auf die Lokalisation erwartet wird [WK89a]. In vergleichenden Hörversuchen konnte eine generell gute Übereinstimmung der Lokalisationsergebnisse bei Freifeld- und binauraler Simulationsbedingung beobachtet werden. Diese Aussage gilt insbesondere für Schallquellenpositionen in der Horizontalebene. Ein Leistungsunterschied wurde für Positionen in der Medianebene unter Kopfhörerbedingungen festgestellt. Ferner erhöhte sich die Anzahl der Richtungsinvertierungen („front/back confusions") unter Simulationsbedingungen [WK89b]. Diese Beobachtungen beschreiben typische Einschränkungen binauraler Simulationssysteme [Beg91].

Maßnahmen zur Aufwandsreduktion

Die Realisierung eines binauralen Simulationssystems erfordert die Kenntnis des Systemverhaltens, das durch die HRTF beschrieben ist. Ein Idealfall in der Simulation wird dann erreicht, wenn die Übertragungsfunktion individuell für jede Person, die das binaurale Simulationssystem anwendet, meßtechnisch bestimmt wird. Die individuelle Messung der HRTF, die für jede simulierte Schallquellenposition separat erfolgen muß, ist ein apparativ und zeitaufwendiges Verfahren (z.B. erfordert eine Auflösung von 15° im Azimuth und 6 Elevationswinkel 144 HRTF-Paarmessungen pro Person). Gleichzeitig stellt sich das Problem der Datenverwaltung. Das binaurale System muß sicherstellen, daß das akustische Signal mit den HRTFs der entsprechenden Person gefiltert wird. Die Folge ist, daß die Anwendung des Systems auf wenige Personen beschränkt ist. Daher werden im folgenden Maßnahmen zur Reduktion dieses Aufwands betrachtet.

Verwendung von Kunstköpfen

Ein Lösungsweg, der in der binauralen Meß- und Aufnahmetechnik angewendet wird, besteht darin, anstelle der individuellen Vermessung einzelner Personen die Übertragungsfunktion an einem Kunstkopf zu bestimmen (z.B. [Sch95]). Kunstköpfe sind physikalische Nachbildungen von Kopf, Außenohren und Oberkörper. Die geometrische Konstruktion des Kunstkopfes beruht auf mittleren, typischen Abmessungen, die

[15] individuelle Bestimmung der HRTF an jeder Versuchsperson

durch Messungen und Hörversuche ermittelt werden. Der Aufwand zur Bestimmung der HRTF reduziert sich damit auf eine *einmalige* Messung an allen relevanten Positionen der Schallquelle. Der Einsatz von Kunstkopfmessungen erfordert allerdings die Überprüfung der psychoakustischen Auswirkungen.

Binaurale Simulation mit nicht-individuellen HRTFs

Die kritische Frage in der Verwendung eines Kunstkopfes kann allgemeiner als Frage formuliert werden, welche Lokalisationsfähigkeit mit nicht-individuellen HRTFs erzielt werden kann. Ausgehend von der Filterwirkung der Außenohren, die ihren richtungsabhängigen Einfluß erst bei höheren Frequenzen entfaltet und der individuellen Form der Außenohren sind Abweichungen vor allem bei monauralen Merkmalen zu erwarten. Diese liefern relevante Beiträge beim Hören in der Medianebene (Elevation), sowie in der Auflösung mehrdeutiger Hörereignisse und Richtungsinvertierungen (vgl. Abschnitt 4.3.2). Psychoakustische Untersuchungen bestätigen die Eignung nicht-individueller HRTFs vor allem für die binaurale Simulation in der Horizontalebene [WADW93]. Abweichungen in der Lokalisation werden in der Medianebene beobachtet. Gleichzeitig erhöht sich die Anzahl der Richtungsinvertierungen („front/back confusions"), was auf die unvollständige Rekonstruktion monauraler Merkmale zurückzuführen ist. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden interessanterweise auch individuelle Unterschiede in der Fähigkeit zum räumlichen Hören festgestellt [WADW93, WWDF88]. Eine Ursache dafür sind individuelle Abweichungen in der Außenohrcharakteristik. So können auch unter natürlichen Hörbedingungen Hörer mit einer signifikant höheren Anzahl an „front/back confusions" und höherer Lokalisationsunschärfe beim Hören in der Medianebene beobachtet werden. Teilweise konnte bei diesen „schlechten" räumlichen Hörern sogar eine Verbesserungen dadurch erzielt werden, daß nicht deren individuelle HRTF sondern die eines „guten" Hörers bzw. die eines Kunstkopfes verwendet wurde.

Insgesamt bietet die Verwendung eines Kunstkopfes zur Gewinnung von HRTF-Daten eine effiziente und mit überschaubarem Aufwand realisierbare Möglichkeit. Die Qualität der Daten ermöglicht die Entwicklung wirksamer Verfahren zur binauralen Simulation.

4.5 Psychoakustische Effekte

4.5.1 Im-Kopf-Lokalisiertheit (IKL)

Im-Kopf-Lokalisiertheit (IKL) ist ein Merkmal der Kopfhörerdarbietung. Das Phänomen beschreibt die Beobachtung, daß sich die entstehenden Hörereignisse auf der Verbindungsachse beider Ohren befinden. Der Begriff IKL steht in engem Zusammenhang mit dem Entfernungshören und beschreibt die Wahrnehmung von Hörereignissen am oder im eigenen Körper [Bla97]. Demgegenüber weisen akustische Reize unter natürlichen Hörbedingungen generell eine Außer-Kopf-Lokalisiertheit (AKL) auf, d.h. die physikalische Entfernung der Schallquelle wird wahrgenommen. Eine Ursache für das

Auftreten der IKL unter Kopfhörerbedingungen besteht darin, daß die akustische Filterwirkung der Außenohren unterbunden wird, wovon vor allem monaurale Merkmale betroffen sind. IKL tritt vor allem dann auf, wenn lediglich interaurale Merkmale vorhanden sind (z.B. konventionelle Stereo-Darbietung). In Abgrenzung zur Lokalisation wird daher für im-Kopf-lokalisierte Hörereignisse der Begriff *Lateralisation* verwendet. Allerdings kann die Verfügbarkeit monauraler Merkmale nicht notwendiger das Auftreten der IKL verhindern. IKL ist auch im Zusammenhang mit der binauralen Simulation zu beobachten. Obwohl eine exakte Erklärung der Ursachen immer noch Gegenstand der Forschung ist, können einige Einflußfaktoren genannt werden, die zur Externalisierung des Hörereignisses beitragen:

- Verfügbarkeit monauraler Merkmale
- Vorhandensein von Hall
- Zulässigkeit von Kopfbewegungen
- visuelle Wahrnehmung
- individuelle Fähigkeit zum räumlichen Hören

Die akustische Filterwirkung der Außenohren liefert einen wesentlichen Beitrag zur Externalisierung von Hörereignissen, was aus der Beobachtung stereophoner Kopfhörerdarbietungen resultiert. Ein weiterer Einflußfaktor ist das Vorhandensein von Hall. Hall ensteht in natürlicher Umgebung durch die Überlagerung von direkt einfallenden mit reflektierten Schallwellen, Dadurch ensteht ein diffuses, u.U. aufgeweitetes Hörereignis. Das Vorhandensein von Hall erleichtert die Externalisierung, erhöht allerdings gleichzeitig die Lokalisationsunschärfe und führt zum erhöhten Auftreten von „front/back confusions"[D$^+$92]. Ein weiterer Beitrag stammt aus Kopfbewegungen (Translation, Rotation), die i.allg. dazu dienen, ein Hörereignis eindeutig zu lokalisieren (vgl. Abschnitt 4.3.4). Ferner beeinflußt auch die visuelle Wahrnehmung den Höreindruck, wie in Lokalisationsuntersuchungen beobachtet wurde, in denen die Ergebnisse von Versuchspersonen mit offenen und verdeckten Augen verglichen wurden [D$^+$92]. Letztlich kommt der Hörerfahrung und der individuellen Fähigkeit zum räumlichen Hören Bedeutung zu.

Die Erzielung eines externalisierten Höreindrucks ist nach wie vor eine der größten Herausforderungen der binauralen Simulation. Die HRTF inklusive der Außenohrfilterwirkung ist ein wesentlicher aber nicht der einzige bestimmende Faktor. Bei Maßnahmen zur Verbesserung der IKL ist zu beachten, daß dadurch häufig andere Nachteile (z.B. reduzierte Lokalisationsfähigkeit in hallreicher Umgebung) verbunden sind.

4.5.2 Gesetz der ersten Wellenfront

In der bisherigen Betrachtung wurde von der Idealbedingung *einer* Schallquelle *ohne* Berücksichtigung von Schallreflexionen ausgegangen, was auf natürliche Hörsituationen nur selten zutrifft. Nach dem Prinzip von Huygens und Fresnel [Kuc87] kann ein

durch Reflexionen gestörtes Schallfeld durch eine Mehrzahl von Elementarschallquellen beschrieben werden, was in der Verallgemeinerung zum räumlichen Hören bei mehreren aktiven Schallquellen führt. In Bezug auf die räumlich-akustischen Experimente im System *Comp*X (vgl. Abschnitt 8.7) soll im folgenden ein psychoakustischer Effekt erläutert werden, der bei der Präsentation mehrerer akustische Signale in kurzen Zeitabständen relevant ist.

Betrachtet wird der Fall, daß eine Folge von zwei akustischen Signalen präsentiert wird. Das resultierende Hörereignis ist abhängig vom zeitlichen Abstand der Präsentation, wobei mehrere Effekte unterschieden werden:

- Summenlokalisation
- Gesetz der ersten Wellenfront („precedence-effect")
- Primärschallunterdrückung
- Auftreten von *zwei* Hörereignissen

Besitzen beide Signale nur geringfügige Zeit- und Pegelunterschiede, entsteht *ein* Hörereignis, dessen Ort abhängig ist von der Richtung und Eigenschaft jedes Signals[16]. Dieser Fall wird als *Summenlokalisation* bezeichnet [Bla97]. Wird der zeitliche Abstand auf $\Delta t \geq 1\,ms$ vergrößert, entsteht ebenfalls nur ein Hörereignis[17], dessen Ort allerdings vom ersten Signal bestimmt wird, weshalb dieser Effekt auch als *„Gesetz der ersten Wellenfront"* bezeichnet wird. Durch weitere Vergrößerung des zeitlichen Abstandes auf $\Delta t \geq 100\,ms$ entstehen *zwei* getrennte Hörereignisse. Der Übergang zwischen einem und zwei Hörereignissen ist durch einen weiteren Effekt gekennzeichnet, der als *Primärschallunterdrückung* bezeichnet wird. Beträgt $\Delta t \approx 70\,ms$, wird das resultierende Hörereignis alleine durch das nachfolgende Signal bestimmt. Das Auftreten und die Schwelle des letztgenannten Effekts ist allerdings stark von der Untersuchungsbedingung und von Signaleigenschaften abhängig [Bla97].

[16] Nutzung beim Stereoeffekt

[17] gleichzeitig ist eine räumliche Aufweitung des Hörereignisses zu beobachten

Kapitel 5

Systementwurf und technische Realisierung von CompX

Der folgende Abschnitt beschreibt den Entwicklungsansatz und den technischen Aufbau des PC-basierten Systems *Comp*X. Zunächst werden die Ziele und Anforderungen des Systems beschrieben, wobei insbesondere klinische Randbedingungen berücksichtigt werden. Im Anschluß daran wird die Konzeption und der Systemaufbau erläutert, der zwischen Software- und Hardwarearchitektur unterscheidet. Im Mittelpunkt steht dabei das Datenbankkonzept als Kernelement des Systems. Während der Entwurf und die Realisierung der experimentellen Systemmodule jeweils in eigenen Abschnitten beschrieben sind (Modul „Wortabruf" s. Abschnitt 7 bzw. Modul „Akustische Raumrepräsentation" s. Abschnitt 8), werden die gemeinsam genutzten Module der digitalen Audiosignalverarbeitung am Ende dieses Abschnitts erläutert.

5.1 Ziele und Anforderungen

5.1.1 Rechnergestützte Systeme in der klinischen Neuropsychologie

Die Idee, rechnergestützte Systeme in der Behandlung hirngeschädigter Patienten einzusetzen, ist nicht neu und es existieren in der Zwischenzeit zahlreiche Anwendungsbeispiele für unterschiedliche Zielgruppen[1]. Trotz dieser Entwicklungen ist die Behandlung von Patienten durch die Verwendung konventioneller Hilfsmittel (Bild-/Schriftkarten, Tonbandgerät für akustisches Reizmaterial) geprägt. Eine Ursache dafür ist, daß der Bereich der klinischen Rehabilitation ein aus marktwirtschaftlicher Sicht wenig erschlossenes Randgebiet ist. Die industrielle Forschung konzentriert sich vielmehr auf

[1] ein Überblick mit kritischen Beiträgen ist z.B. in [Rot92] enthalten; eine fortlaufend aktualisierte Übersicht verfügbarer Systeme ist im WWW unter [Bus99] zu finden

den kapitalträchtigen Konsumgütermarkt, der sich in den letzten Jahren zur treibenden Kraft der Informationstechnologie entwickelt hat[2]. Eine weitere Ursache ist, daß der Entscheidung für den Einsatz eines technischen Systems (insbesondere im klinischen Umfeld) eine kritische Kosten-Nutzen-Analyse vorangestellt wird, in der die Vorteile des Systemeinsatzes unter klinischen Bedingungen überzeugen müssen. Rechnerunterstützte Behandlungsverfahren müssen sich an den speziellen Anforderungen dieses Anwendungsbereichs ausrichten. Diese Voraussetzung gilt sowohl für hardware- als auch für softwaretechnische Gesichtspunkte. Anwendungen, die für gesunde Personen entwickelt wurden, sind nicht oder nur z.T. für den Einsatz an hirngeschädigten Patienten geeignet. Bei der Entwicklung rechnergestützter Systemen für diesen Personenkreis geht es darum, technische Systemlösungen aus unterschiedlichen Disziplinen auf ihre klinische Anwendbarkeit hin zu überprüfen. Falls Entwicklungspotentiale erkannt wurden, ist vor dem klinischen Einsatz gewöhnlich ein Anpassungsprozeß erforderlich. Synergieeffekte durch bereits bestehende Systemlösungen bieten eine wertvolle Hilfe, müssen i.d.R. jedoch erst erschlossen werden.

Zielrichtungen technischer Systemlösungen

Die neuropsychologische Diagnostik und Therapie hirngeschädigter Patienten erfolgt oftmals experimentell. Eine Anwendung besteht gewöhnlich aus einer Folge von Aufgaben, in denen dem Patienten zunächst ein oder mehrere Reiz(e) präsentiert werden. Anschließend wird der Patient zur Antwort aufgefordert, die aus einer Reaktion bzw. Entscheidung besteht. Über den Ausgang des Experiments (Antwortverhalten) bestehen i.allg. spezifische Erwartungen. Diese Hypothesen werden in der Auswertung der Antwortdaten durch statistische Verfahren verifiziert oder falsifiziert. Für rechnergestützte Systemlösungen eröffnen sich prinzipiell zwei Zielrichtungen:

1. Abbildung existierender Behandlungsverfahren
2. Entwicklung innovativer Behandlungsverfahren

Im ersten Fall konzentrieren sich die Überlegungen auf die Nutzung allgemeiner Vorteile rechner-/computerunterstützter Systeme. Beispielhaft sind zu nennen:

- verbesserte Kontrolle der Untersuchungsbedingungen[3]
- vereinfachte Verwaltung umfangreicher Stimulusbibliotheken[4]
- erleichterte Gewinnung quantitativer Ergebnisparameter[5]

[2] z.B. Mobile Telekommunikation, kommerzielle Nutzung des Internets, Speicher- und Prozessorentwicklung, etc.

[3] Erleichterung der Replizierbarkeit von Untersuchungsergebnissen

[4] Effizienzsteigerung durch vereinfachte Wiederverwendbarkeit von Reizen

[5] Erhöhung der Verlässlichkeit (Reliabilität) empirischer Aussagen

Vor dem Einsatz eines rechnerunterstützten Systems wird der Untersuchungsablauf des Experiments analysiert. Dabei werden möglichst viele Teilschritte automatisiert, wodurch die Untersuchungsbedingungen kontrollierbarer werden. Gleichzeitig wird die Gewinnung quantitativer Parameter (z.B. Antwortverhalten, Reaktionszeit) erleichtert. Ferner erhöht sich die Flexibilität der Untersuchung durch eine vereinfachte Verwaltung des Reizmaterials, das im Vergleich zu konventionellen Methoden (z.B. Listen) leichter aufbereitet, ausgetauscht und wiederverwendet werden kann. Systeme auf der Grundlage dieses Entwicklungskonzepts erhöhen die Effizienz der Behandlung.

Im zweiten Fall soll durch technische Systemlösungen ein gezielter Wissens- und/oder Technologietransfer ausgelöst werden. Ausgehend von der Diskrepanz zwischen technisch realisierbaren und klinisch verfügbaren Hilfen besteht die wichtigste Aufgabe dieses Ansatzes darin, Anwendungsideen für technische Lösungskonzepte in einem medizinischen Kontext zu finden. Zusätzlich zu den bereits im ersten Fall beschriebenen Vorteilen werden existierende Behandlungsmethoden erweitert.

5.1.2 Forschungsansatz und Zielsetzung

Die forschungsleitende Idee für die Konzeption und Entwicklung des Systems *Comp*X ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Im folgenden wird der zugrundeliegende Ansatz erläutert.

Ausgangspunkt der Überlegung sind die Sinnesempfindungen des Menschen im Wachzustand. Die sensorischen Systeme[6] ermöglichen die Sinneswahrnehmungen wie Sehen, Hören, Fühlen, Schmecken und Riechen, die als *Sinneskanäle* bzw. *Sinnesmodalitäten* bezeichnet werden [KW93]. Der Forschungsansatz konzentriert sich aus zwei Beweggründen auf die *akustische* bzw. *auditive* Modalität:

1. Der akustische bzw. auditive Sinneskanal besitzt unter kommunikativen Aspekten eine *herausragende Bedeutung*
2. Die neuropsychologische Diagnostik und Therapie konzentriert sich bislang auf *visuelle* Untersuchungsansätze (vgl. Abschnitt 3.3)

Bei der Wahrnehmung von Schallsignalen kann zwischen *sprachlichen* und *nichtsprachlichen* Signalen (Umweltgeräusche, Töne, Musik) unterschieden werden. Im Zentrum der Verarbeitung gesprochener Sprache durch das Gehirn steht die *Inhaltsinformation*, d.h. die Frage nach der *Bedeutung* der sprachlichen Äußerung. Demgegenüber dienen Geräuschsignale hauptsächlich der *Orientierung im Raum*, d.h. ausgewertet wird die *Richtungsinformation* des akustischen Signals.

Im Mittelpunkt des Systems *Comp*X steht die Untersuchung zentraler Verarbeitungsprozesse beider Informationen, die im zentralen Nervensystem (ZNS) getrennt und in unterschiedlichen Regionen des Gehirns ausgeführt werden (Sprache in der linken,

[6] Sinnesorganen und Teile des Nervensystems

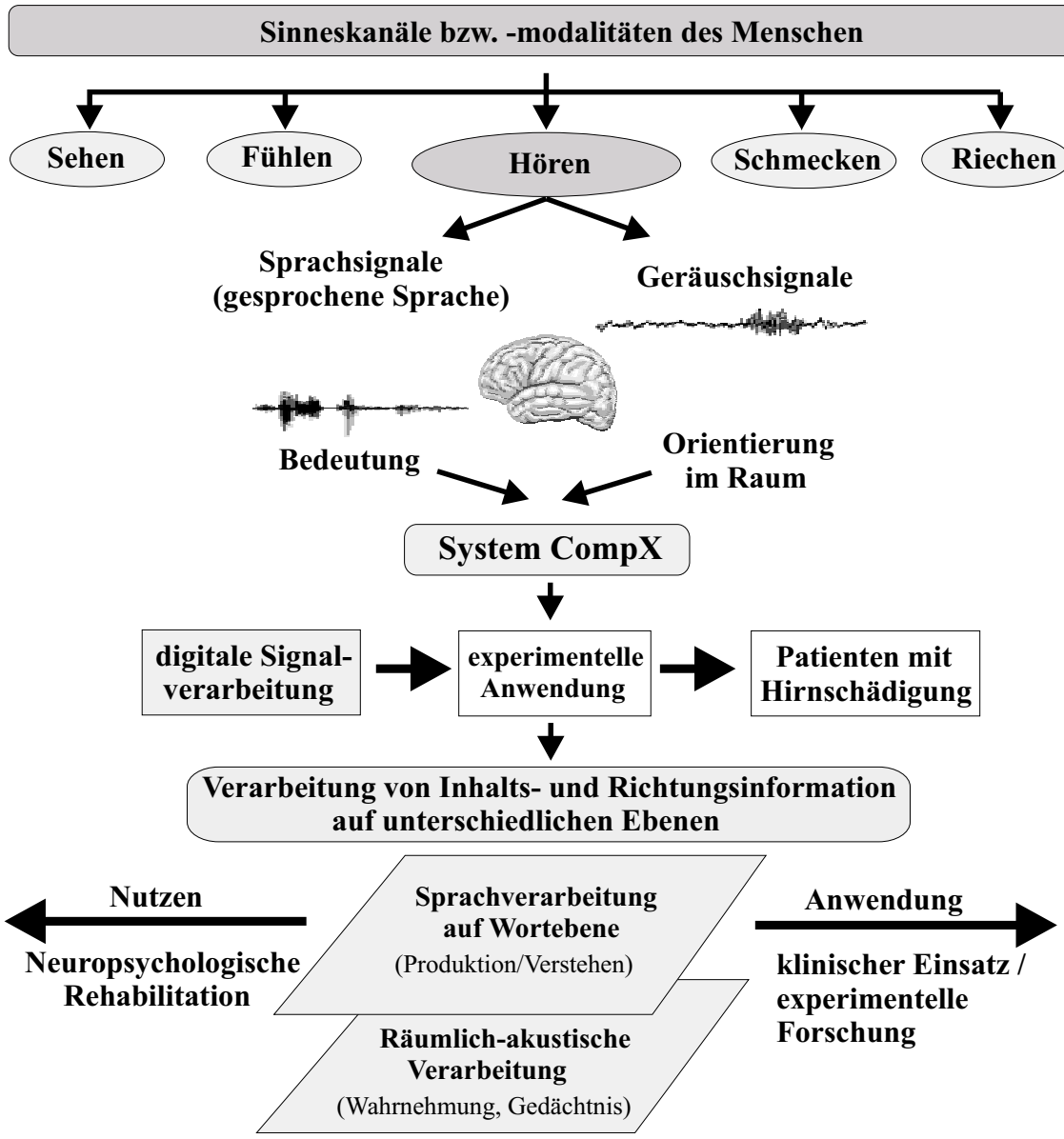


Abbildung 5.1: Entwicklungsidee und Forschungsansatz des Systems *Comp*X

räumlicher Informationsverarbeitung bevorzugt in der rechten Hirnhälfte). Zu diesem Zweck werden experimentelle Behandlungsverfahren in beiden Teilgebieten entwickelt:

- Experimente zur Sprachverarbeitung (Produktion und Verstehen von Wörtern)
- Experimente zur räumlich-akustischen Verarbeitung (Wahrnehmung und Arbeitsgedächtnis)

Die systematische Untersuchung akustischer Verarbeitungsleistungen erfordert technische Möglichkeiten, mit denen die Inhalts- und Richtungsinformation im akustischen

Signal gezielt variiert werden kann. Für diesen Zweck eignen sich besonders Methoden der digitalen Signalverarbeitung. Mit der Systementwicklung werden daher folgende Ziele verfolgt:

- Entwicklung signalverarbeitender Werkzeuge für den flexiblen Umgang mit akustischen Signalen
- Integration dieser Werkzeuge in ein Behandlungs- und Systemkonzept, das an die klinischen Bedürfnisse angepaßt ist

Der *Anwendungsbereich* des Systems liegt in der *klinischen Behandlung* von Patienten mit Sprachstörungen und räumlichen Störungen. Durch die Flexibilität in der Gestaltung und Anpassung der Experimente werden gleichzeitig Fragestellungen der *klinisch-experimentellen Forschung* unterstützt. So eröffnen sich interessante Erweiterungen in der Sprachverarbeitung durch das Einbeziehen der Richtungsinformation[7]. Umgekehrt können auch Geräusche Bedeutung bzw. Inhaltsinformation übermitteln[8].

5.1.3 Klinische Randbedingungen der Systementwicklung

Die Konzeption des PC-basierten Systems *Comp*X orientiert sich eng an den Anforderungen des klinischen Umfelds. Die iterative Entwicklung und frühzeitige klinische Erprobung von Prototypen stellt am Ende des Entwicklungszyklus sicher, daß neben der Funktionalität des Systems die Anwendbarkeit gewährleistet wird. Abbildung 5.2 zeigt ausgewählte Schlüsselanforderungen, die gleichzeitig Randbedingungen der Entwicklung sind.

Skalierbares Experimentdesign

Das *Experimentdesign* faßt die Struktur und die Bildschirmgestaltung des Experiments zusammen. Während die Struktur den funktionalen Aufbau und Ablauf des Experiments definiert, ist die Bildschirmgestaltung ein Kernelement der Mensch-Maschine- bzw. Patient-System-Schnittstelle, der beim Einsatz an hirngeschädigten Patienten besondere Bedeutung zukommt (vgl. Abschnitt 8.3.3). Ein skalierbares Experimentdesign ermöglicht eine flexible Anpassung der Untersuchungsbedingungen an den Untersuchungszweck bzw. an die individuelle Situation des Patienten.

Eine *variierbare Struktur* erweitert die Anzahl realisierbarer Experimente und verbreitert dadurch den Einsatzbereich des Systems. Insbesondere die klinisch-experimentelle Forschung profitiert von diesem Ansatz, da häufig wissenschaftliches „Neuland" betreten wird und die Struktur von Experimenten oftmals Versuchscharakter besitzen[9], die schrittweise modifiziert werden.

[7] z.B. Gesprächssituation mit mehreren beteiligten Sprechern: Richtungsinformation dient zur Lenkung der Aufmerksamkeit

[8] z.B. typische Umweltgeräusche (Auto, Zug, etc.)

[9] Experimente zur Prüfung von Hypothesen

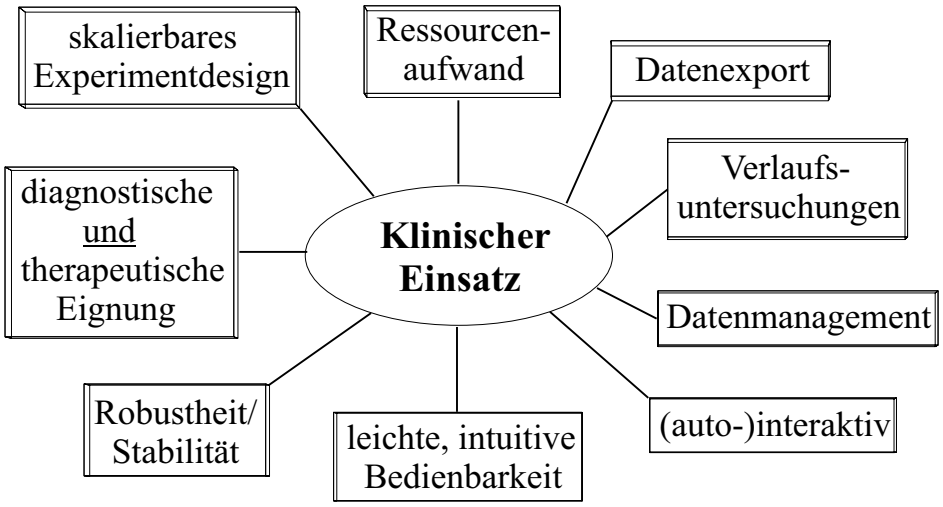


Abbildung 5.2: Schlüsselanforderungen des klinischen Einsatzes

Die Bildschirmgestaltung als „User-Interface" besitzt für jedes anwendungsorientierte System einen hohen Stellenwert. Im klinischen Einsatz kann zwischen zwei Gruppen von Anwendern unterschieden werden:

- Untersuchungspersonal (z.B. Therapeut, Arzt, etc.)
- Patienten

Während beim Untersuchungspersonal auf die Verwendung möglichst standardisierter bzw. „gängiger" Benutzerelemente zu achten ist, müssen abhängig von der Störungsform der Patienten spezifische Anpassungen des Bildschirms erfolgen. Bestehende Beeinträchtigungen können auf zwei Ursachen zurückgeführt werden:

- Einschränkungen durch die zu behandelnde Störungssform bzw- symptomatik
- Einschränkungen durch begleitende (assoziierte) Phänomene

Beeinträchtigungen als Folge der zu behandelnden Störung sind meist beschreibbar und daher bekannte Größen. Störungen des ZNS treten in der klinischen Praxis meist nicht in „Reinform" auf, sondern werden durch Phänomene begleitet, die schwer vorhersagbar sind und u.U. eine individuelle Anpassung des Bildschirms erfordern.

Diagnostische und therapeutische Eignung

Diagnostische Experimente können durch geringfügige Variation für die therapeutische Behandlung verwendet werden[10]. Eine Zielvorstellung des klinischen Vorgehens ist die

[10] z.B. durch die Lockerung der engen Reiz-Antwort-Relation

therapieorientierte Diagnostik, bei der schon während der Diagnose therapeutische Ansätze erkannt werden. Systemseitig wird diese Forderung im wesentlichen durch ein skalierbares Experimentdesign erfüllt.

Robustheit/Stabilität

Diese Anforderung besitzt für den klinischen Einsatz aus zwei Gründen besondere Bedeutung:

- patientenseitiges Vertrauen in die Behandlung
- Akzeptanz des Systems durch das klinische Personal

Eine Voraussetzung für die therapeutische Behandlung ist das Vertrauen und die Mitarbeit des Patienten („Compliance"). Der Aufbau dieses Vertrauens wird nachhaltig gestört, wenn Untersuchungen fortlaufend durch Systemfehler unter- oder abgebrochen werden müssen. Andauerende Stabilitätsprobleme des Systems führen dazu, daß der klinische Anwender sich von der Nutzung abwendet, wodurch die Nutzung innovativer Behandlungsformen aus pragmatischen Gründen erschwert wird. Dieser Aspekt betrifft vor allem frühe Nutzungsphasen des Systems, da hier naturgemäß die Anzahl der Fehlfunktionen am größten ist.

Bedienbarkeit

Eine einfache und intuitive Bedienbarkeit des Systems fördert den Einsatz des Systems. Unter dem Druck der angespannten Kostensituation in klinischen Einrichtungen ist die personelle Ressource ein knappes Gut. Ein System wird sich daher nur dann etablieren können, wenn der Aufwand zum Erlernen der Bedienung entsprechend gering ist. Obwohl die Forderung sowohl für hardware- als auch für softwaretechnische Realisierungen gilt, treten Schwierigkeiten in der Bedienung häufiger softwareseitig auf. Als Leitlinie sollte sich die Bedienung an bestehenden Benutzerregeln im jeweils verwendeten Betriebssystem orientieren.

Übersteigt die Komplexität des Programms eine kritische Schwelle, können Maßnahmen zur Strukturierung der Bedienung ergriffen werden. Eine Möglichkeit besteht in der Einrichtung von *Anwendergruppen*:

- Experten-Anwender
- Normal-Anwender

Der Experten-Anwender erhält den Zugriff auf Detaileinstellungen, die z.B. zur Vorbereitung der Untersuchung erforderlich sind. Dem Normal-Anwender wird dadurch eine einfache Handhabung des Systems ermöglicht, die sich auf wenige, rasch erlernbare Funktionen beschränkt. Der Normal-Anwender kann z.B. der behandelnde Therapeut sein, der die Untersuchung am Patienten lediglich durchführen möchte und standardisierte Verfahren zur Ergebnisauswertung nutzt. Ein Optimum wird dann erreicht,

wenn die Durchgängigkeit beider Anwendergruppen vom System gewährleistet wird, d.h. es einem Normal-Anwender möglich ist, durch schrittweises Hinzulernen die Ebene des Experten zu erreichen.

(auto-) interaktiv

Ein wesentlicher Vorteil computerunterstützter Systeme ist die Bereitstellung graphisch-interaktiver Benutzeroberflächen. GUIs („Graphical-User-Interfaces") sind heute für fast jede Betriebssystemplattform verfügbar. Interaktive Systemlösungen erleichtern zum einen dem Untersuchungspersonal den Umgang mit dem System. Bei Untersuchungen am Patienten tritt ein weiterer Effekt auf, der in dieser Arbeit als *Auto-Interaktion* bezeichnet wird. Darunter werden Interaktionen verstanden, die der Patient selbst am System vornimmt (z.B. Aufruf von Hilfen bei Wortfindungsschwierigkeiten vgl. Modul „Wortabruf", Abschnitt 7). Die aktive Beteiligung des Patienten trägt über den spezifischen Trainingseffekt hinaus zur Förderung der Motivation bei. Für den Patienten öffnen sich u.U. Lebensbereiche, in denen er trotz der bestehenden Behinderung Erfolgserlebnisse erfahren kann.

Datenmanagement

Die klinisch-experimentelle Untersuchung erfordert eine strukturierte Organisation und Verwaltung von Daten (Datenmanagement). Folgende Datenquellen (Entitäten) sind zu unterscheiden:

- Benutzerdaten (Untersuchungspersonal, Patienten)
- Untersuchungsdaten (Konfiguration, Durchführung, Auswertung von Experimenten)
- eingesetztes Reizmaterial (Stimuli)

Eine Systemlösung ist die Verwendung von Datenbankkonzepten, die dem Anwender die Möglichkeit geben, Daten flexibel zu ergänzen, auszutauschen und wiederzuverwenden. Von diesem Ansatz profitiert besonders die Verwaltung der Stimuli. Die Erstellung einer geeigneten Reizmaterialsammlung erfordert vom Untersucher kreatives Vorgehen. Eine Datenbank ermöglicht die einfache Wiederverwendbarkeit einmalig angelegter Stimuli.

Verlaufsuntersuchungen

Die Therapie erfordert für die Kontrolle der Wirksamkeit der Behandlung Folgeuntersuchungen in regelmäßigen zeitlichen Abständen (Verlaufsuntersuchungen). Systemseitig ist diese Anforderung durch das Datenmanagement zu berücksichtigen.

Datenimport/-export

Die Anforderung des *Datenimport/-export* umfaßt folgende Aspekte:

- Betrieb des Systems an mehreren Arbeitsplätzen

- Weiterverarbeitung von Ergebnisdaten

Beide Aspekte erfordern die Implementierung einer flexiblen Import-/Export-Schnittstelle. Der mehrfache Betrieb des Systems ermöglicht eine räumliche Trennung zwischen der Untersuchung am Patienten und der Ergebnisauswertung (z.B. Vermeidung von Engpässen am Untersuchungsplatz). Technisch stellt sich dadurch das Problem der Datensynchronisation zwischen mehreren Kopien des Systems, wobei auch die Möglichkeit vorzusehen ist, Teilmengen des Datenbestandes (z.B. Untersuchungsdaten eines ausgewählten Patienten) zu exportierten bzw. zu importieren.

Unabhängig von im System integrierten Möglichkeiten zur Ergebnisauswertung, erfordern empirische Aussagen die Absicherung durch statistische Methoden. Unterstützt das System den Datenexport in einem möglichst rudimentären Datenformat (z.B. ASCII), können handelsübliche statistische Anwendungsprogramme zur Weiterverarbeitung genutzt werden.

Ressourcenaufwand

Der Ressourcenaufwand beschreibt die hardware- und softwaretechnischen Anforderungen, die an den Betrieb des Systems gestellt werden. Dieser sollte aufgrund der Kostensensitivität in klinisch-rehabilitativen Einrichtungen möglichst gering sein. Es besteht daher die Notwendigkeit, schon in frühen Phasen der Systementwicklung zu prüfen, welche Funktionalitäten des Systems durch *standardisierte Hardware- bzw. Softwarekomponenten* erfüllt werden können. Beispielhaft sind zu nennen:

- Nutzung einer weitverbreiten Rechnerarchitektur (z.B. PC)
- Verwendung einer gängigen Betriebssystemplattform
- Audioaufzeichung und -wiedergabe über standardisierte Einsteckkarten (Soundkarten)

Dabei erweist es sich als vorteilhaft, die Wahl der Rechnerarchitektur auf die vorhandene Infrastruktur im klinischen Umfeld abzustimmen. Ein PC, der für den Einsatz des Systems genutzt werden kann, gehört mittlerweile in vielen klinischen Einrichtungen zur Standardausstattung. Die Nutzung standardisierter Komponenten besitzt u.a. folgende Vorteile:

- geringerer Aufwand in der Anschaffung
- vereinfachte Produktpflege
- reduzierter Wartungsaufwand

Neben geringeren Anschaffungskosten[11] wird die Produktpflege und technische Anpassung an zukünftige Spezifikationen wesentlich erleichtert. Mit Blick auf den Lebenszyklus folgt nach der Inbetriebnahme bzw. Auslieferung des Systems die Wartungsphase.

[11] Fertigung in großen, rentablen Stückzahlen

Auch hier zeigen sich Vorteile durch die Verwendung standardisierter Komponenten, z.B. beim Ersatz einer ausgefallenen Komponente. Demgegenüber ist die Verfügbarkeit von Spezialkomponenten über den Nutzungszeitraum des Systems meist nur eingeschränkt gewährleistet. Der Ausfall einer Komponente, die nicht mehr ersetzt werden kann, gefährdet u.U. die Einsatzbereitschaft des Gesamtsystems.

5.2 Aufbau und Komponenten des Systems

Das System *Comp*X ist ein PC-basiertes multimediales System, das die technischen Voraussetzungen zur Durchführung experimenteller Untersuchungen in der klinischen Behandlung hirngeschädigter Patienten bereitstellt. Im Mittelpunkt steht die Entwicklung und Erweiterung *akustischer* Behandlungsverfahren bei zentral bedingten Sprachstörungen und Störungen des räumlichen Hörens. Diese Anwendungen sollen beispielhaft demonstrieren, welches Entwicklungspotential der Einsatz akustischer Verfahren bietet. Im folgenden Abschnitt wird die *Architektur* des Systems vorgestellt. Da der Anteil softwaretechnischer Lösungen den der hardwaretechnischen überwiegt, ist der Darstellung der Softwarearchitektur breiterer Raum eingeräumt.

5.2.1 System- und Softwarearchitektur

System- und Softwarearchitektur sind im System *Comp*X eng verknüpft. Die Trennung beider Architekturen erfolgt durch die Unterscheidung von *konzeptionellen* Aspekten, die der Systemarchitektur zugerechnet werden, und *funktionalen* Aspekten, die sich näher an der Realisierung des Systems orientieren und daher der Softwarearchitektur zugeordnet sind. Die System- und Softearearchitektur ist zusammenfassend in Abbildung 5.3 dargestellt.

Systemarchitektur

Die oberste konzeptionelle Entscheidung besteht in der Auswahl der zu *untersuchenden Größen*. Bedingt durch die Konzentration auf akustische Untersuchungsansätze (vgl. Abschnitt 5.1.2) können folgende Untersuchungsgrößen methodisch unterschieden werden:

- Zentrale Prozesse sprachlicher Verarbeitungsleistungen (Produktion und Verstehen gesprochener Sprache)
- Zentrale Prozesse beim Hören sprachlicher und nichtsprachlicher Reize

Diese Unterscheidung berücksichtigt, daß bei der Verarbeitung akustischer Information zwischen Prozessen der Sprachproduktion, des Sprachverstehens und der nichtsprachlichen Hörwahrnehmung getrennt wird. Gleichzeitig erfolgt eine Differenzierung hinsichtlich der akustischen Reize selbst, die sprachlich oder nichtsprachlich sein können.

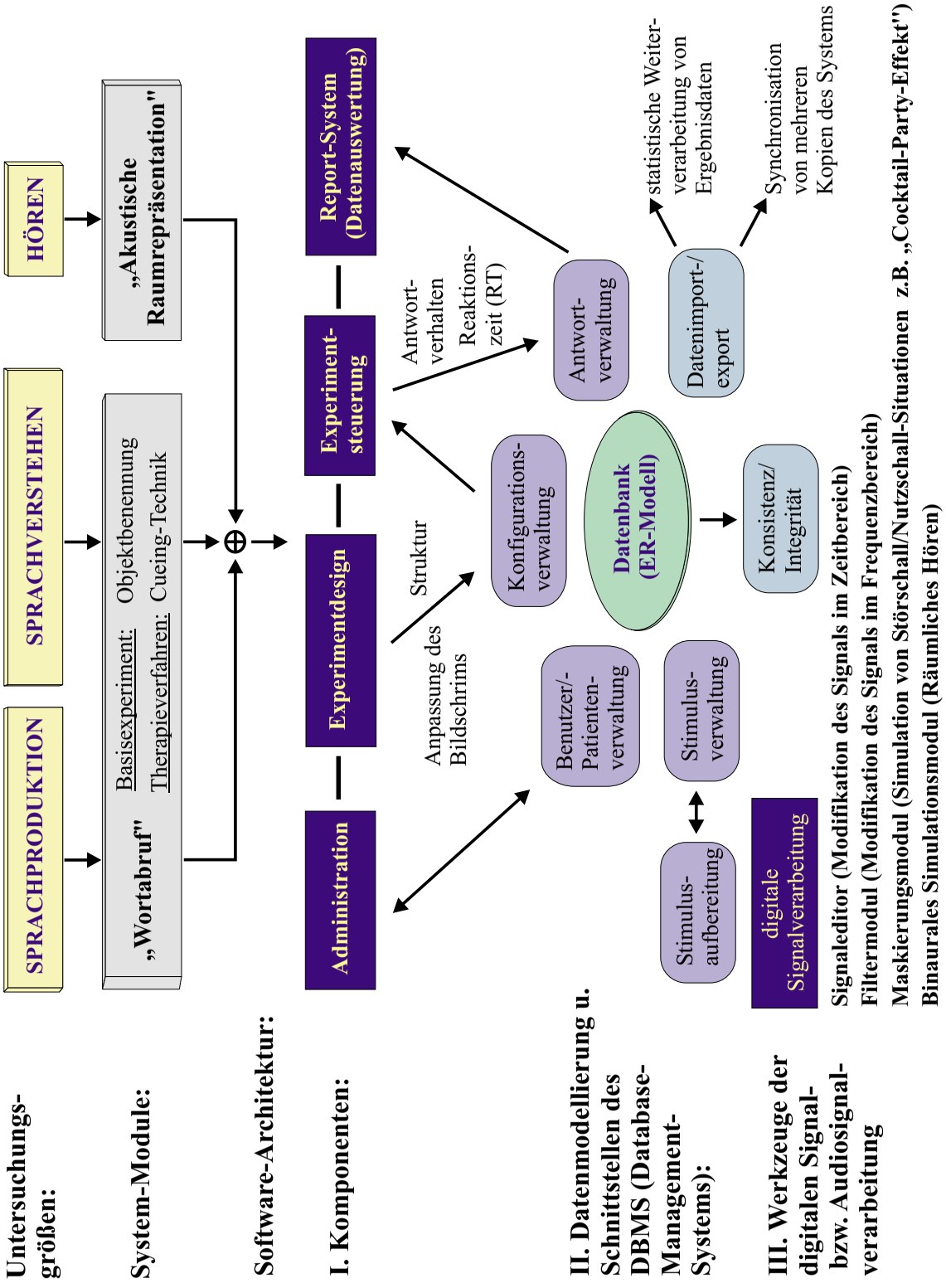


Abbildung 5.3: System- und Softwarearchitektur von *Comp*X, Modellierung der relationalen Datenbank nach dem ER („Entity-Relationship")-Modell

Innerhalb der Untersuchungsgrößen findet eine weitere Spezialisierung statt. Sprachliche Verarbeitungsleistungen werden auf der Wortebene betrachtet (Produktion und Verstehen), während sich die Analyse von Wahrnehmungsleistungen auf die Verarbeitung räumlich-akustischer Information (Hören) konzentriert. In der Realisierung des führt dieser Ansatz zur Implementierung von zwei Systemmodulen.

System-Module

Das System besteht aus den beiden Modulen „Wortabruf" und „Akustische Raumrepräsentation", in deren Mittelpunkt die Erstellung von Aufgaben mit akustischer Reizdarbietung steht.

Das Modul „Wortabruf" konzentriert sich auf *Sprachverarbeitungsprozesse auf der Wortebene* (vgl. Abschnitt 3.5.3). Die Zielgruppe besteht aus Patienten mit aphasischen Wortabruf- bzw. Wortfindungsstörungen. Die Aufgabe des Patienten besteht darin, ein Objekt mündlich zu benennen. Das Objekt ist eine digitale Ressource und kann alternativ ein Bild, ein Text oder ein akustisches Signal (z.B. Umweltgeräusch) sein. Im Fall einer nicht erfolgten oder fehlerhaften Benennung erhält der Patient eine Hilfe durch das System („Cueing-Technik" s. Abschnitt 7.1.3). Durch die Hilfen, die sich zum einen an der Bedeutung (semantisch) oder an der Form (phonologisch) des gesuchten Wortes orientieren, erhält der Patient zusätzliche Information, die ihm den Wortabruf „erleichtern" sollen. Das Modul „Wortabruf" konzentriert sich auf die systematische Erprobung *phonologischer* Hilfen. Für die gezielte Variation phonologischer Information stehen dem Untersucher integrierte Werkzeuge der digitalen Audiosignalverarbeitung (Signaleditor, Filtermodul, Maskierungsmodul) zur Verfügung (s. Abschnitt 5.3). Für eine ausführliche Beschreibung des Systemmoduls wird auf Abschnitt 7 verwiesen.

Das Modul „Akustische Raumrepräsentation" dient zur Bestimmung *räumlich-akustischer Wahrnehmungs- und Gedächtnisleistungen*. Die Zielgruppe besteht aus Patienten mit räumlichen Verarbeitungsstörungen (z.B. Neglect, Hemianopsie). In insgesamt fünf Submodulen wird die Fähigkeit zum räumlichen Hören systematisch mit variierender Anforderung und in unterschiedlichen Aspekten überprüft. Eine Besonderheit des Moduls besteht darin, daß zur Begrenzung des apparativen Aufwands der räumliche Höreindruck über eine 2-kanalige, stereophone Kopfhörerdarbietung erzeugt wird. Zu diesem Zweck wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte binaurale Simulationsmodul SPATIAL TOOLBOX verwendet (vgl. Abschnitt 6). Eine ausführliche Beschreibung des Systemmoduls „Akustische Raumrepräsentation" ist in Abschnitt 8 enthalten.

Softwarearchitektur

Trotz der bestehenden Unterschiede in der Struktur und im Aufbau der Experimente innerhalb beider Systemmodule wird in *Comp*X der Ansatz einer gemeinsamen Softwarearchitektur verfolgt. Dieses Vorgehen wird durch die Anwendung der Grundsätze *objektorientierter Softwareentwicklung* ermöglicht, dessen Entwurfsgrundlage auf dem

Objektmodell basiert [Boo94, Bur97]. Der erste Entwicklungsschritt besteht aus einer objektorientierten Analyse, an dessen Ende ein Modell steht, welches geeignet ist, statische und dynamische Eigenschaften des Anwendungsbereichs derart zu beschreiben, daß eine softwaretechnische Implementierung möglich ist. Die entstandene Softwarearchitektur ist im mittleren und unteren Teil von Abbildung 5.3 dargestellt und besteht aus drei Ebenen:

- Ebene I: Komponentenbasierte Modularisierung des Programms
- Ebene II: Datenbankbasierte Datenverwaltung
- Ebene III: Werkzeuge der digitalen Signal- bzw. Audiosignalverarbeitung

Ebene I: Komponentenbasierte Modularisierung des Programms

Auf der Ebene I werden Funktionen und Anforderungen des Anwendungsbereichs, die in logischem Zusammenhang stehen, gruppiert und in Programmkomponenten abgebildet. Im einzelnen besteht *Comp*X aus folgenden Komponenten:

- Administration
- Experimentdesign
- Experiment-Steuerung
- Report-System

Komponente *Administration*

In jeder experimentellen Untersuchung stellt sich das Problem der Datenverwaltung. Der Umfang der Daten ist abhängig von der Komplexität der zu realisierenden experimentellen Anwendung und bestimmt die Wahl der Technik, die zur Verwaltung der Daten eingesetzt wird. Folgende Aufgabenfelder sind zu unterscheiden:

- Benutzer-/Patientenverwaltung
- Stimulusverwaltung
- Antwortverwaltung[12]

Die Komponente *Administration* übernimmt die Aufgaben der Benutzer- und Patientenverwaltung. Jeder Benutzer des Systems wird mit einem frei zu vergebenden Paßwort im System angemeldet. Das Paßwort des Benutzers dient gleichzeitig dem Schutz der Patientendaten, die nur von authorisierten Benutzern des Systems eingesehen und geändert werden können (s. Abbildung 5.4).

[12] Reaktionen des Patienten, die vom System während der Untersuchung aufgezeichnet werden

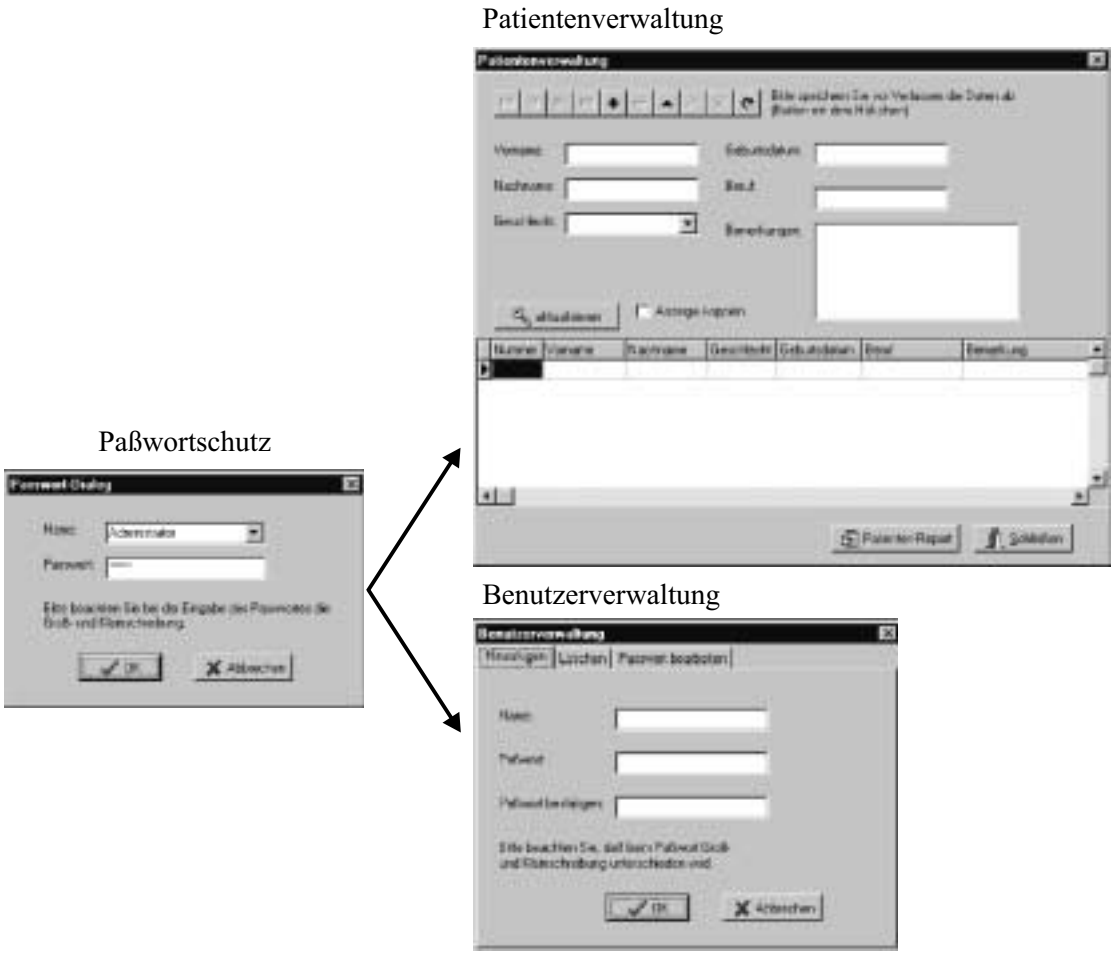


Abbildung 5.4: Paßwortgeschützter Zugang zur Benutzer- und Patientenverwaltung

Hierzu besitzt die Komponente Schnittstellen zu den entsprechenden Datenmengen der Systemdatenbank (vgl. Ebene II).

Komponente *Experimentdesign*

Das *Experimentdesign* beschreibt die Struktur und Bildschirmgestaltung des Experiments. Die Flexibilität des Designs bestimmt damit den Einsatzbereich des Gesamtsystems. *Comp*X verfügt über Möglichkeiten zur Anpassungen des Experimentdesigns. Diese haben einerseits die *strukturelle Variabilität* zum Ziel, wobei folgender Ansatz verfolgt wird: Das komplexe Gebilde „Experiment" wird modularisiert, d.h. in einzelne Abschnitte bzw. Segmente zerlegt. In der Vorbereitung einer Untersuchung entscheidet der Anwender, welche Segmente er verwenden möchte und kann damit den Untersuchungsablauf an diagnostische bzw. therapeutische Fragestellungen anpassen. In der Therapie wird durch die patientenspezifische Veränderung eine „Optimierung" der Behandlungsstrategie ermöglicht.

Ähnliche Möglichkeiten sind für die *Gestaltung des Bildschirms* implementiert, wobei folgendes Prinzip angewendet wird:

- Parametrisierung des Bildschirms in relevanten Details
- Angebot mehrerer Bildschirmvorlagen

Parametrisierung des Bildschirms bedeutet, daß der Bildschirm in Elemente zerlegt wird, die vom Anwender einzeln aktiviert bzw. deaktiviert werden können. Das Experimentdesign ist stark abhängig vom individuellen Experiment, weshalb für die Entwicklung keine allgemeingültigen Regeln aufgestellt werden können. In *Comp*X werden Designentscheidungen deshalb in der Konfiguration der Einzelexperimente vorgenommen. Abbildung 5.5 zeigt als Beispiel die Bildschirmgestaltung eines Experiments im Modul „Akustische Raumrepräsentation".

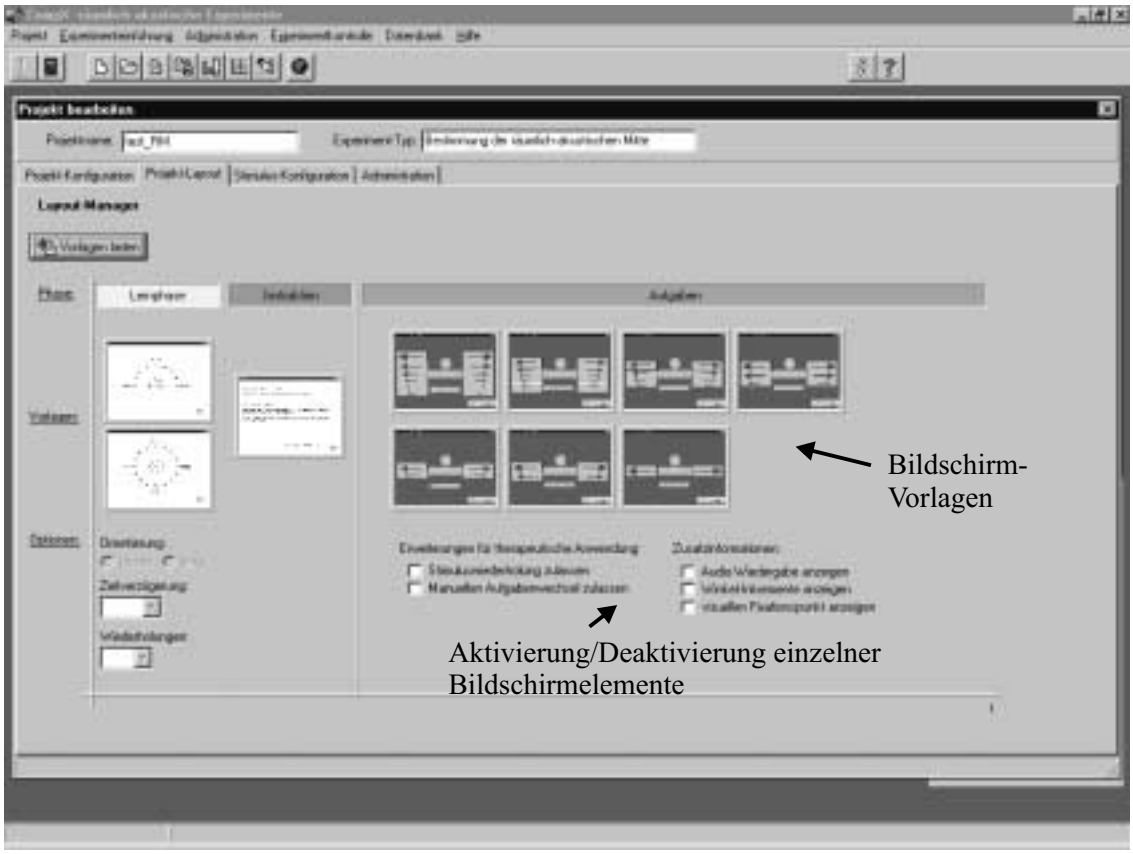


Abbildung 5.5: Anpassung der Bildschirmgestaltung (Konfigurationsbeispiel aus dem Modul „Akustische Raumrepräsentation" vgl. Abschnitt 8.5.2)

Komponente *Experiment-Steuerung*

Die *Experiment-Steuerung* dient dazu, dem Anwender den Eingriff in die Untersuchung während einer Patientensitzung zu ermöglichen. Abhängig von der individuellen Belastbarkeit des Patienten, die zusätzlich durch überlagerte Störungen (z.B. reduzierte Aufmerksamkeit) eingeschränkt sein kann, kann eine Unterbrechung, das Überspringen

von Aufgaben oder der vorzeitige Abbruch des Experiments erforderlich sein. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, regelmäßige Unterbrechungen nach einer benutzerdefinierten Anzahl von Aufgaben einzufügen. Die Komponente Experiment-Steuerung stellt dabei sicher, daß Inkonsistenzen im System durch diese Aktionen vermieden werden.

Komponente *Report-System*

Neben operativen Funktionen, die im Mittelpunkt der vorangegangenen Komponenten standen, dient das *Report-System* der tabellarischen und graphischen Aufbereitung von Daten der Systemdatenbank. Die implementierten Abfragen umfassen Konfigurations-, Durchführungs- und Antwortdaten. Abfrageergebnisse können mit Hilfe graphischer Werkzeuge durch den Anwender individuell visualisiert werden. Ferner sind Datenexport-Schnittstellen realisiert, durch die z.B. Antwortdaten im ASCII-Format für die statistische Weiterverarbeitung oder Archivierung exportiert werden können.

Ebene II: Datenbankbasierte Datenverwaltung

Unterhalb der Programmkomponenten befindet sich ein DBMS (Datenbank-Management-System), das die Aufgaben der Datenverwaltung und flexiblen Erstellung von Suchabfragen übernimmt. In der weiteren Beschreibung werden die Bezeichnungen DBMS und Systemdatenbank synonym verwendet. Die Hauptaufgabe bei der Realisierung der Systemdatenbank besteht in der Entwicklung eines Datenmodells, das als Abstraktionskonzept eine möglichst umfassende Abbildung realer Datenvorkommen in eine sinnvolle, redundanzfreie Systematik ermöglicht. Das Datenmodell ist dadurch zum einen abhängig vom Anwendungsbereich, zum anderen vom verwendeten Datenbankkonzept. Im System *Comp*X wurde aus mehreren Gründen ein relationales Datenbankkonzept gewählt, das in Abschnitt 5.2.2 näher erläutert wird.

Ebene III: Werkzeuge der digitalen Signal- bzw. Audiosignalverarbeitung

Das System verfügt über angepaßte Werkzeuge der digitalen Signalverarbeitung, mit denen akustische Reize erstellt und aufbereitet werden können. Folgende Werkzeuge stehen dem Anwender zur Verfügung:

- Signaleditor zur Modifikation des Zeitsignals
- Filtermodul zur Modifikation spektraler Signaleigenschaften
- Maskierungsmodul zur Simulation definierter Störschall/Nutzschall-Situationen[13]
- Binaurales Simulationsmodul zur Erzeugung eines räumlichen Höreindrucks über Kopfhörer

Eine Besonderheit besteht darin, daß die Werkzeuge mit Ausnahme des binauralen Simulationssystems (vgl. Abschnitt 6) in das System integriert sind. Vor allem im

[13] Verdeckungseffekte, komplexe akustische Szenarien z.B. „Cocktail-Party-Effekt"

Modul „Wortabruf" ergeben sich dadurch zahlreiche Vorteile (s. Abschnitt 7.2.3). Die Werkzeuge stehen ebenfalls als eigenständige Anwendungen zur Verfügung, was deren Nutzung für Untersuchungen erlaubt, die über den intendierten Anwendungsbereich des Systems hinausgehen. Für nähere Erläuterungen zum Aufbau und zur Realisierung der Werkzeuge wird auf Abschnitt 5.3 verwiesen.

5.2.2 Datenbankkonzept und Datenmodellierung

Experimentelle Untersuchungen werden von umfangreichen Datensammlungen begleitet. Die adäquate und effiziente Organisation, Erzeugung, Unterhaltung und Verwaltung dieser Daten spielt eine zentrale Rolle bei rechnergestützten Systemen. In der Systementwicklung von *Comp*X bestand zunächst das Problem, ein geeignetes technisches Lösungskonzept zu finden, das zum einen für die experimentelle Anwendungen geeignet ist und zum anderen Möglichkeiten für die Abstraktion und formale Beschreibung von Datenstrukturen bietet. Der nachfolgende Abschnitt erläutert Kriterien und Argumente, die zur Auswahl des realisierten Datenkonzepts geführt haben und erläutert anhand des entwickelten Datenmodells beispielhaft die Struktur und Organisation der Daten in *Comp*X.

Auswahl des Datenbankkonzepts

Ein technischer Lösungsansatz zur effizienten Organisation und Verwaltung umfangreicher Datenmengen besteht in der Verwendung eines Datenbanksystems (DBS), das vereinfacht formuliert aus einer Software, dem Datenbankmanagementsystem (DBMS) und einer gewissen Anzahl von Datenbanken besteht, welche die eigentliche Informationssammlung enthalten [Vos95]. Das DBS ist i.d.R. getrennt vom Anwendungssystem implementiert und beruht auf der Grundidee, daß Daten der realen Welt (in diesem Fall experimentelle Untersuchungsdaten), welche von Anwendungsprogrammen manipuliert und verarbeitet werden, als integrierte Ressource unabhängig von diesen Programmen behandelt werden sollen. Der Einsatz eines DBS hilft gleichzeitig bei der Lösung von grundlegenden Problemen im Umgang mit großen Datenmengen:

- Redundanz
- Inkonsistenz
- Integrität

Zur Erläuterung wird als Beispiel die Konfigurationsverwaltung von Experimenten betrachtet. Ein Experiment besteht typischerweise aus mehreren Aufgaben, in denen jeweils ein oder mehrere Reize präsentiert werden. Sowohl Experiment- als auch Aufgaben- und Reizdaten werden in separaten Datenbanken (z.B. Dateien) gespeichert. Für die Datenorganisation bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten:

(1) In der Konfiguration werden sämtliche Aufgabendaten (inkl. verwendeter Reize) in die Experimentdatenbank kopiert. Damit ist ein und dieselbe Aufgabe doppelt vorhanden (Experiment- und Aufgabendatenbank), was zu *Redundanzen* führt. Erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt eine Änderung in der Aufgabendatenbank (z.B. Austausch eines Reizes gegen einen anderen), treten durch die unterschiedlichen Aktualisierungszustände von Aufgaben in der Experiment- und Aufgabendatenbank *Inkonsistenzen* auf.

(2) Alternativ sind die Aufgaben nur an einem Ort gespeichert (z.B. in der Aufgabendatenbank) und mit einem eindeutigen Index versehen. Die Experimentdatenbank referenziert die benötigten Aufgabe lediglich anhand des Index. Änderungen an der Aufgabendatenbank werden so automatisch in der Experimentdatenbank berücksichtigt. Probleme treten bei dieser Methode dann auf, wenn Aufgaben aus der Aufgabendatenbank entfernt werden ohne die zugehörigen Referenzen aus der Experimentdatenbank zu entfernen. Die Einhaltung dieser Beziehungen wird als *referentielle Integrität* bezeichnet.

Ein weiterer Vorteil, der sich aus dem Einsatz eines DBS ergibt, besteht in der Bereitstellung von Konzepten zur Datenabstraktion und angemessenen Formalisierung von Beziehungen zwischen einzelnen Datenmengen, die aufgrund der Behandlung von Datenbanken durch die theoretische Informatik verfügbar sind. Diese Argumente führten dazu, ein DBS in die Systementwicklung von *Comp*X aufzunehmen.

Auswahl des Datenbanktyps

Auf dem aktuellen technischen Entwicklungsstand von Datenbanken können im wesentlichen zwei Typen unterschieden werden:

- relationale Datenbanken
- objektorientierte Datenbanken

Beide Typen verfolgen unterschiedliche Ansätze in der Datenorganisation. *Relationale Datenbanken* vollziehen eine klare Trennung zwischen einem logischen Datenmodell, das auf einem einfachen Konzept (Relationen) beruht und einem physischen Datenmodell. Sie verfügen daher über einen hohem Grad an physischer Datenunabhängigkeit, d.h. ein logisches Modell kann weitgehend unabhängig von der physischen Realisierung entwickelt werden. Umgekehrt kann das physische Modell verändert werden, ohne daß zwangsläufig eine Anpassung des logischen Modells erforderlich ist[14]. Relationen sind ein wichtiges mathematisches Konzept, weshalb die Theorie relationaler Datenbanken weit entwickelt ist (erstmalig durch [Cod70]).

Objektorientierte Datenbanken bilden eine neue Generation von Datenbanken [Unl95]. Es wird versucht, das aus anderen Bereichen der Informatik bekannte Objektmodell auf die Datenorganisation zu übertragen, um Beschränkungen des relationalen Modells

[14]das physische Datenmodell entspricht z.B. dem binären Datenbankformat, das durch Updates einem ständigem Wandel unterworfen ist

zu überwinden[15]. Allerdings haben die theoretischen Grundlagen noch nicht den Stand der relationalen Datenbanken erreicht, was sich auch im Angebot und der Zuverlässigkeit verfügbarer OODBMS (Objektorientierter Datenbank-Management Systeme) niederschlägt.

In einer Gegenüberstellung beider Datenbanktypen wurde die Funktionalität einer relationalen Datenbank für den Anwendungsbereich des Systems *Comp*X als ausreichend bewertet, weshalb die Entscheidung zugunsten eines RDBMS (RDBMS Relationales Datenbank-Management System) getroffen wurde.

Datenmodell der Systemdatenbank

Zunächst soll die Frage beantwortet werden, was das Datenmodell einer Datenbankanwendung ist und warum dessen sorgfältige Entwicklung so bedeutsam ist. Eine Datenbank bietet aus der Sicht des Benutzers[16] mehrere Abstraktionsebenen, die in Abbildung 5.6 dargestellt sind.

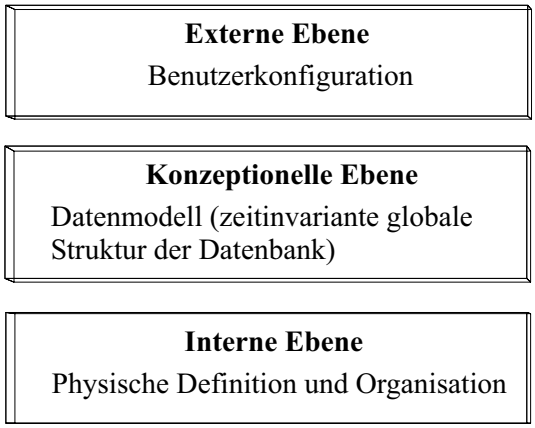


Abbildung 5.6: Abstraktionsebenen einer Datenbank nach dem ANSI/SPARC-Modell zur Erzielung logischer und physischer Datenunabhängigkeit [TK78]

Die unterste Ebene (*interne Ebene*) legt die physische Struktur (Speicherverwaltung, Verarbeitung von Transaktionen zur Zugriffssteuerung auf den Datenbestand etc.) fest, deren technische Realisierung i.d.R. durch das DBS bereitgestellt wird[17]. Die nächsthöhere Ebene beschreibt die logische Gesamtsicht auf die Struktur der Datenbank (*konzeptionellen Schema, logisches Modell*) in der Sprache eines spezifischen Datenmodells[18], das von der physischen Ebene abstrahiert. Die höchste Ebene (*externe Ebene*) definiert die spezielle Benutzersicht auf die DB-Struktur (Anwendungsprogramme und Endbenutzer). Dabei handelt es sich beispielsweise um Datenbankabfragen.

[15] Objekte als komplexe Datentypen, die Struktur und Verhalten kapseln, Kommunikation zwischen Objekten über Nachrichten (Message Passing), Vererbung

[16] auch der Entwickler von Anwendungsprogrammen z.B. System *Comp*X ist ein *Benutzer* des DBS

[17] Beschreibungssprache: SSL Storage Structure Language

[18] Beschreibungssprache: DDL Data Definition Language

Diese Darstellung verdeutlicht, daß die Entwicklung des Datenmodells im Mittelpunkt einer Datenbankanwendung steht. In diesem Modell muß möglichst umfassend und redundanzfrei die „Realität" der Anwendung beschrieben sein. Die Beschreibung erfolgt durch geeignete Sprachen (siehe weiter unten „ER-Modell").

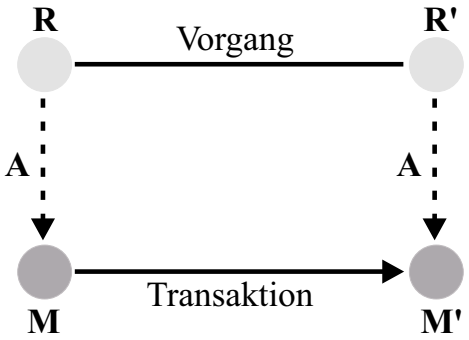


Abbildung 5.7: Grobe Zusammenhänge bei der Bildung eines Modells für eine Datenbankanwendung
R: Realitätsausschnitt (Miniwelt)
M: Modell der Miniwelt (beschrieben durch konzeptionelles Schema)
A: Abbildung wichtiger Objekte und Beziehungen (Entities und Relationships)

Abbildung 5.7 verdeutlicht die Zusammenhänge zwischen Realität und Modell. Ein relevanter Ausschnitt der Realität (Miniwelt) wird auf das konzeptionelle Schema der Datenbank mit Hilfe von Objekten und deren Beziehungen abgebildet. Gleichzeitig werden Zustandsübergänge berücksichtigt. Vorgänge in der Realität ($R \rightarrow R'$) werden im Modell durch Transaktionen beschrieben, die durch eine Folge von Datenbankoperationen definiert sind ($M \rightarrow M'$).

Im vorangegangenen Abschnitt wurde erwähnt, daß im System *Comp*X ein relationales DBS eingesetzt wird. An einem Beispiel soll erläutert werden, welches grundlegende Konzept dabei verfolgt wurde. Das Relationenmodell basiert auf dem mathematischen Konzept der Relation und organisiert Daten anschaulich in Form von *Tabellen*. Die Kopfzeile der Tabelle enthält *Attribute*, die Eigenschaften von Datenobjekten beschreiben. Die weiteren Zeilen heißen *Tupels* und enthalten die zu den Datenobjekten gehörigen Datenwerte. Eine Tabelle ist demnach eine *Menge von Tupels*, deren Komponenten über die zugeordneten Attribute identifizierbar sind. Relationale Datenbanken werden aus diesem Grund als *mengenorientiert* bezeichnet [Vos95].

Abbildung 5.8 zeigt den Aufbau von zwei Tabellen des Systems *Comp*X. Die erste Spalte enthält die Attribute und wird in der Datenbank später zur ersten Zeile (Kopfzeile). Die zweite Spalte legt den Wertebereich der Daten (Datentyp bzw. Domain) für jedes Attribut fest. Im Gegensatz zu Programmiersprachen, die üblicherweise die Konstruktion komplexer Datenstrukturen erlauben, sind bei Datenbanken lediglich *atomare Datentypen* (I Integer, A String, L Boolscher Wert etc.) zulässig, die nicht weiter zerlegt werden können.

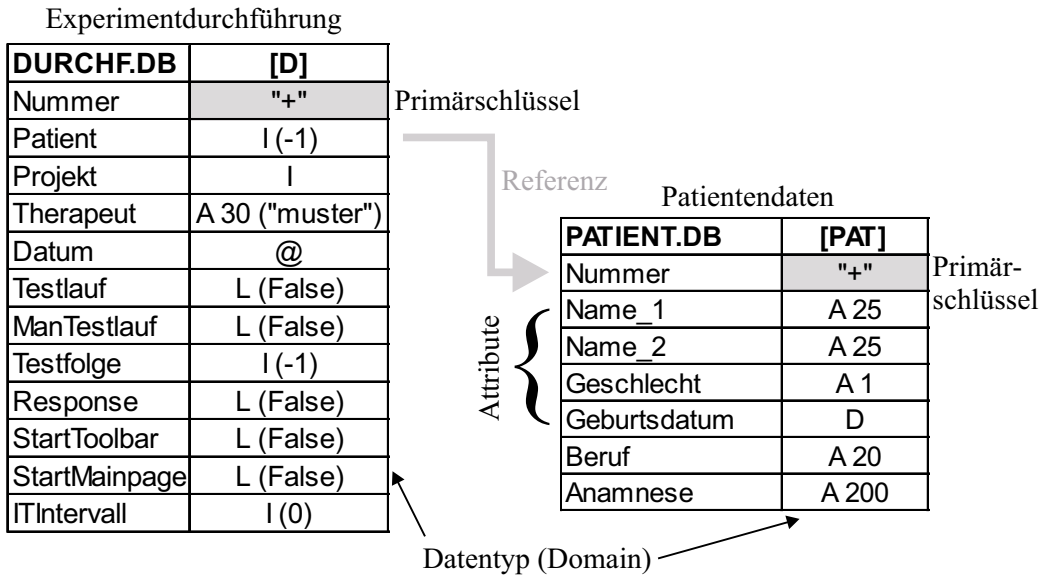


Abbildung 5.8: Relationale Struktur am Beispiel von zwei Tabellen

Die geklammerten Werte hinter den Attributen sind *Vorgabewerte*, die durch das DBS automatisch eingefügt werden, falls ein neuer Datensatz erzeugt wird und dem Attribut kein Wert durch die Anwendung zugewiesen wird.

Die Datenbank wird durch den Vorgang der *Normalisierung* schrittweise optimiert, wodurch die sog. Normalform erreicht wird. Das Ziel der Normalisierung ist die Vermeidung von Redundanzen im Datenbestand. Allerdings enstehen dadurch gewöhnlich viele Tabellen, die durch Referenzen verbunden sind. Im Beispiel in Abbildung 5.8 wurde für jede Tabelle ein „Primärschlüssel" (Primary Key, Primärindex) vergeben, der jeden Datensatz eindeutig identifiziert. Dieser Index ist als Referenz besonders geeignet. Ein Datensatz der Experimentdurchführung, der einem Patienten zugeordnet werden soll, enthält keine Kopie der Patientendaten sondern lediglich eine Referenz auf den Patientendatensatz in der Patiententabelle bzw. -datenbank. Die Voraussetzung für die Funktion dieses Prinzips ist die Eindeutigkeit des Schlüssels[19]. Neben der Endeutigkeit muß sichergestellt sein, daß bestehende Referenzen auch aufgelöst werden können. Jeder Datensatz der Experimentdurchführung sollte davon ausgehen können, daß der referenzierte Patientendatensatz auch tatsächlich vorhanden ist. Diese Forderung wird durch die *referentielle Integrität* erfüllt. Ein RDBMS unterstützt technisch die Erstellung der Tabellen und Referenzen (Interne Ebene vgl. Abbildung 5.6). Die Entwicklung des (logischen) Datenmodells ist jedoch eine kreative und anwendungsabhängige Aufgabe.

Die Entwicklung des Datenmodells wird durch das *Entity-Realtionship-Modell* (ER-Modell) erleichtert und systematisiert [Ebn97]. Das ER-Modell analysiert den Anwendungsbereich zunächst nach Objekten bzw. *Entitäten* und versucht im nächsten

[19]Primary Keys sind durch ihre Eindeutigkeit besondere Schlüssel, sog. *Candidate Keys*

Schritt die Beziehungen bzw. *Relationships* zwischen den Entitäten zu beschreiben (vgl. Abbildung 5.7). Dabei werden drei Beziehungsgrade unterschieden:

- 1:1 Eins-zu-Eins Beziehung
- 1:n Eins-zu-viele Beziehung
- n:m Viele-zu-viele Beziehung

Abbildung 5.9 zeigt die Grundstruktur des ER-Modells im System *Comp*X.

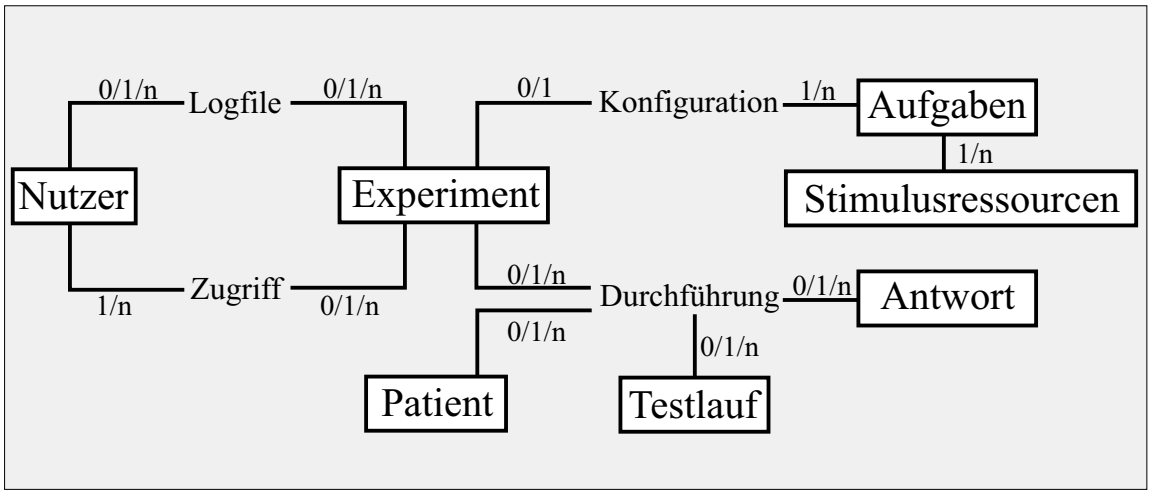


Abbildung 5.9: Vereinfachtes ER-Modell der *Comp*X Systemdatenbank

Die Entitäten sind durch Rechtecke gekennzeichnet. Im Mittelpunkt steht das Datenobjekt *Experiment*, welches durch einen *Nutzer* angelegt oder verändert werden kann. Durch die Zugriffsverwaltung besitzt der Ersteller des Experiments automatisch ein Zugriffsrecht, das explizit auch anderen Nutzern erteilt werden kann. Jeder Nutzer besitzt (falls er ein Experiment erstellt hat) also mindestens ein Zugriffsrecht, optional auch mehrere. Diese Beziehung besitzt den Grad *1/n* und kennzeichnet eine Beziehung, die als *obligatorische Mitgliedschaft* bezeichnet wird. Umgekehrt hat i.d.R. nicht jeder Nutzer ein Zugriffsrecht auf alle Experimente, d.h. hier wird die Beziehung durch *0/1/n* beschrieben. Ähnliches gilt für die Erstellung eines *Logfiles*, das Benutzeraktivitäten protokolliert. Allerdings ist dieses optional, d.h. es muß kein Logfile erstellt werden. Deshalb hat die Beziehung in beide Richtungen den Grad 0/1/n. Ein Experiment kann abhängig vom Bearbeitungsstand konfiguriert sein oder nicht. Die Konfiguration setzt sich aus mindestens einer *Aufgabe* zusammmen, die wiederum aus einer definierten Folge von *Stimulusressourcen* (Anzahl mind. 1) besteht. Soll das Experiment durchgeführt werden, müssen Durchführungsparameter gewählt werden (z.B. ob Pausen zwischen den Einzelaufgaben zulässig sind oder nach x Aufgaben eine Unterbrechung automatisch durch das System eingefügt wird usw.). Erst in der Durchführung werden die Daten *patientenspezifisch*. So kann ein beliebiges Experiment ohne

Einschränkung mehrfach mit dem gleichen oder verschiedenen Patienten durchgeführt werden. Das Objekt *Testlauf* erlaubt eine in experimentellen Untersuchungen häufig notwendige Einführung des Patienten in den Untersuchungsablauf[20]. Während einer Durchführung werden Antwortdaten des Patienten aufgezeichnet. Dabei besteht eine 0/1/n-Beziehung zwischen *Durchführung* und *Antwort*, d.h. jede Durchführung referenziert i.d.R. n Antwortdatensätze (für jede Aufgabe), minimal jedoch keinen, falls das Experiment vor der ersten Aufgabe abgebrochen wird. Die Darstellung ist insofern vereinfacht, da *Comp*X einerseits mehrere Experimenttypen unterstützt und die Anforderungen an das *Stimulusressourcen-Objekt* durch parametrisierte Aufbereitung der verwendeten Stimuli erheblich komplexer ist.

Auf der Grundlage des ER-Modells erfolgt die Realisierung des Datenmodells in Form von Tabellen und Beziehungen, wobei auf die Erläuterung der Einzelschritte an dieser Stelle verzichtet wird. Deutlich herausgestellt werden soll der *Einfluß der Datenmodellierung auf den späteren Funktionsumfang* des Systems. Die Strukturen der späteren Anwendung müssen in frühen Entwicklungsphasen analysiert werden, was eine sorgfältige Planung und intensive Auseinandersetzung mit dem Anwendungsbereich voraussetzt.

5.2.3 Hardwarearchitektur

Die für den den Betrieb von *Comp*X benötigten Hardwarekomponenten sind zusammenfassend in Abbildung 5.10 dargestellt. Aus wirtschaftlichen und technologischen Gründen wurde darauf geachtet, möglichst marktübliche Standardkomponenten zu verwenden. Dadurch besteht zum einen die Möglichkeit, die evtl. vorhandene Ausstattung im klinischen Umfeld zu nutzen, was die Betriebskosten reduziert und die Verbreitung des Systems begünstigt. Zum anderen wird die Wartung des Systems erleichtert, was sich positiv auf die Lebensdauer des Systems auswirkt.

Einzelplatzcomputer

Das System *Comp*X ist lauffähig auf einem PC mit folgender Spezifikation:

- 90 MHz Pentium-Prozessor oder schneller
- minimal 16 Mbyte Arbeitsspeicher (RAM), empfohlen 32 oder 64 MByte
- VGA Graphikkarte, Bildschirmauflösung 1024 x 768 Pixel
- installierte Audio-/Videoerweiterungskarten

[20] erst wenn dem Patienten das Prinzip des Experiments klar ist, können aussagekräftige Daten gewonnen werden

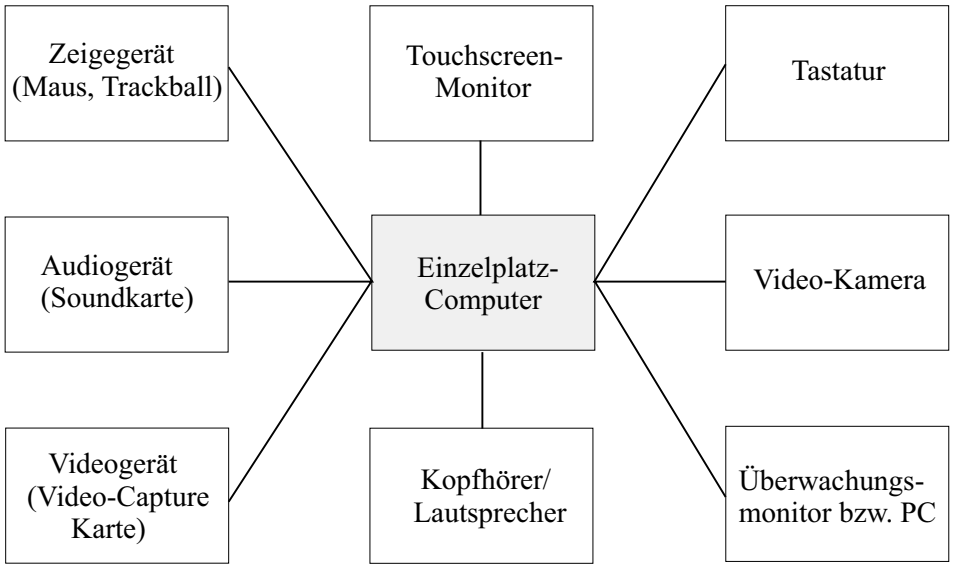


Abbildung 5.10: Hardwarearchitektur von *Comp*X

Als Betriebssystem müssen Microsoft Windows 9.x (95/98) oder Windows NT Version 4.0 auf dem PC vorinstalliert sein (s. Abschnitt 5.2.4). *Comp*X verfügt über eine vollautomatische Setup-Routine, durch die das System vollständig oder in Teilen installiert werden kann. Um den vollen Funktionsumfang zu nutzen wird für die Verwendung des psychoakustischen Werkzeuges „SPATIAL TOOLBOX" eine vorinstallierte Version von MATLAB Version 4.x benötigt. Dies wird allerdings nur im Bereich der neuropsychologischen Forschung nötig sein, so daß im klinischen Alltag keine lizenzpflichtigen Anwendungen für den Betrieb von *Comp*X erforderlich sind.

Benutzerschnittstellen

Die Bedienung des Systems erfolgt alternativ über drei Eingabegeräte. Standardmäßig stehen dem Therapeuten als Nutzer Tastatur und Zeigegeäte wie Maus oder Trackball zur Verfügung. In der Untersuchungen erfolgt die Patientenreaktionen bzw. antworten entweder durch den Therapeuten (falls keine Reaktionszeitmessung erforderlich ist) oder alternativ interaktiv durch den Patienten. Patientenseitig kann der Umgang mit herkömmlichen Zeigegeräten nicht vorausgesetzt werden, weshalb ein Touchscreen-Monitor mit einer tastdrucksensitiven Bildschirmoberfläche angeboten wird. Technisch betrachtet werden Zeigegeräte und der Touschscreen-Monitor über standardisierte Schnittstellen angesprochen, weshalb keine zusätzlichen Anforderungen entstehen.

Audio- und Videoverarbeitung

Die experimentellen Untersuchungen in *Comp*X nutzen extensiv die Audiowiedergabe. Technisch wird dies durch eine Audio- oder Soundkarte realisiert, die als Einsteckkarte

im PC implementiert ist. Es werden grundsätzlich keine spezifischen Anforderungen an die Austattung der Karte gestellt, jedoch ergeben sich einige Qualitätsanforderungen aus der Durchführung psychoakustischer Experimente. Bedingt durch das binaurale Simulationsverfahren zur Erzeugung des räumlichen Höreindrucks (siehe Abschnitt 6) treten Verzerrungen der Audiokarte bei der Wiedergabe des digitalen Signals als zusätzliche Störgrößen auf, die systemseitig im voraus nicht kompensierbar sind. Generell sollte daher die verwendetet Audiokarte wiedergabeseitig über einen möglichst konstanten Frequenzgang verfügen. Gleiches gilt für den verwendeten Kopfhörertyp. Systemseitig wurden die Kopfhörerverzerrungen für eine Auswahl unterschiedlicher Kopfhörertypen durch inverse Filterung kompensiert (s. Abschnitt 6.3.3). Idealerweise sollten daher baugleiche Kopfhörer oder zumindest solche verwendet werden, deren akustische Übertragungseigenschaften ähnlich sind.

Die Videoverarbeitung wird zur Kontrolle der Augenposition in Untersuchungen zum räumlichen Hören im Modul „Akustische Raumrepräsentation" eingesetzt (s. Abschnitt 8). Während der Patient eine Aufgabe bearbeitet, wird die Position seiner Augen durch eine hochauflösende Video- bzw. Augenkamera beobachtet. Das Videosignal wird an einen am PC angeschlossenen Zweitmonitor geleitet und in Echtzeit dargestellt. Der Diagnostiker erhält dadurch die Möglichkeit für korrigierende Eingriffe zur Laufzeit der Untersuchung (z.B. Patient auffordern, die Augen auf einen bestimmten Punkt zu richten). Alternativ kann das Videosignal für die spätere Auswertung aufgezeichnet werden. Die Auflösung und Lichtempfindlichkeit der Kamera muß geeignet sein, um Pupillenbewegungen des Patienten zu erfassen[21].

5.2.4 Systemplattform und Entwicklungswerkzeuge

Betriebssystem

Das System *Comp*X wurde auf der Betriebssystemplattform Microsoft Windows (Version 9.x und NT Version 4) entwickelt. Die Entscheidung für diese Plattform wurde getroffen, da es sich um ein *weit verbreitetes* Betriebssystem handelt, das *fensterorientiert* konzipiert ist. Nahezu alle im klinischen Einsatz befindlichen Rechner sind mit Varianten dieser Betriebssystemfamilie ausgestattet. Dadurch werden plattformbedingte Kompatibilitätsprobleme im praktischen Einsatz vermieden. Ferner lassen sich *allgemeine Erfahrung des klinischen Personals* im Umgang mit „Windows-PC's" für die Bedienung des Systems *Comp*X nutzen. Das fensterorientierte Konzept in Verbindung mit einer *graphischen Benutzeroberfläche* unterstützt ferner flexible Anwendungsszenarien in der theapeutischen Behandlung.

[21] moderne Videokameras verfügen über eine „Auto-Tracking" Funktion, die eine automatische Suchverfolgung eines Objekts durch die Kamera ermöglicht

Technische Aspekte der multimedialen Entwicklung

Das Betriebssystem besitzt in der aktuellen Version eine 32-Bit-Architektur[22], die ausreichende Systemressourcen für *Comp*X als multimediale Anwendung bietet. Ein Vorteil von Windows liegt in der Unterstützung folgender Verarbeitungskonzepte:

- Multitasking
- Multithreading

Multitasking ermöglicht die quasi gleichzeitige Ausführung mehrerer Programme und simuliert eine Parallelverarbeitung[23]. *Multithreading* bedeutet, daß die Ausführung eines Programms („task") in mehrere „Threads" (kleine Programmroutinen) unterteilt wird, die durch Synchronisationsmechanismen gesteuert werden. Laufzeitkritische Operationen können so auf mehrere Threads mit unterschiedlicher Priorität aufgeteilt werden (z.B. kann die Aktion „Daten speichern" in einen separaten Thread ausgelagert werden, wenn im Vordergrund gerade Audiodaten abgespielt werden sollen). Insbesondere das Multithreading-Konzept wird durch *Comp*X bei der Realisierung zeitkritischer Funktionen genutzt. Hierzu zählen z.B. die Reaktionszeitmessung (Auflösung in ms) und die Audiosignalverarbeitung zur Laufzeit der Anwendung.

Windows unterstützt die Entwicklung multimedialer Anwendungen durch die MCI-Schnittstelle (Media Control Interface). Standardfunktionen (z.B. Abspielen/Aufzeichnen von Audio- und Videodaten) können unabhängig von der spezifischen Hardware einheitlich angesprochen werden. Der Nachteil ist, daß spezielle Funktionen der verwendeten Hardware (z.B. Audiokarte, Video-Capture Karte) nicht genutzt werden. Der Betriebssystemhersteller Microsoft bietet seit kurzem eine neue Gruppe von Technologien unter der Bezeichnung „DirectX" [Dir98] an, mit der zwei Ziele verfolgt werden:

1. Multimediale Entwicklungen sind auf jedem Windows-PC unabhängig von der spezifischen Hardwareausstattung lauffähig. Die Vorteile der vorhandenen Hardware werden dabei bestmöglich genutzt (z.B. verfügt eine Audiokarte über On-Board-Memory (RAM), werden Teile der Audiosignalverarbeitung auf die Audiokarte ausgelagert, was den Hauptprozessor des PCs (CPU) entlastet und die Ausführgeschwindigkeit erhöht). Ermöglicht wird dies durch den „low- level" Dienst von DirectX, den sog. „DirectX Foundation Layer".

2. Unterstützung der Entwicklung multimedialer Anwendungen durch „high-level" Werkzeuge. Diese ermöglichen die Integration und Synchronisation multimedialer Elemente (Audio, Video, Graphik). Dieser Dienst ist durch den „DirectX Media Layer" verfügbar.

[22] Windows verfügt über einen 32-Bit-Adreßbereich und 32-Bit-Ganzzahlen[Pet96]

[23] tatsächlich wird die Prozessorzeit in „time slices" (Zeitscheiben) aufgeteilt; bei geeignet dimensionierten Zeitscheiben entsteht der Eindruck der Parallelverarbeitung

*Comp*X setzt DirectX bei der Verarbeitung von Audiosignalen und zur Reaktionszeitmessung ein. Für die Audiowiedergabe enthält der DirectX Foundation Layer die Komponente *DirectSound*, die neben weiteren Eigenschaften für *Comp*X folgende Vorteile besitzt:

- Geringe Zeitverzögerung der Audiowiedergabe (ca. 20 ms)
- Nutzung vorhandener Hardwareressourcen
- Mischung von Audioströmen in Echtzeit

Erfolgt die Wiedergabe einer Audiodatei unter Verwendung des Standard-MCI Befehls „PlaySound()", treten abhängig von der momentanen Auslastung des Prozessors und von der Größe der Audiodatei Verzögerungen von 70 - 150 ms zwischen dem Funktionsaufruf und der physikalischen Erzeugung des Schalls am Lautsprecher oder Kopfhörer auf.

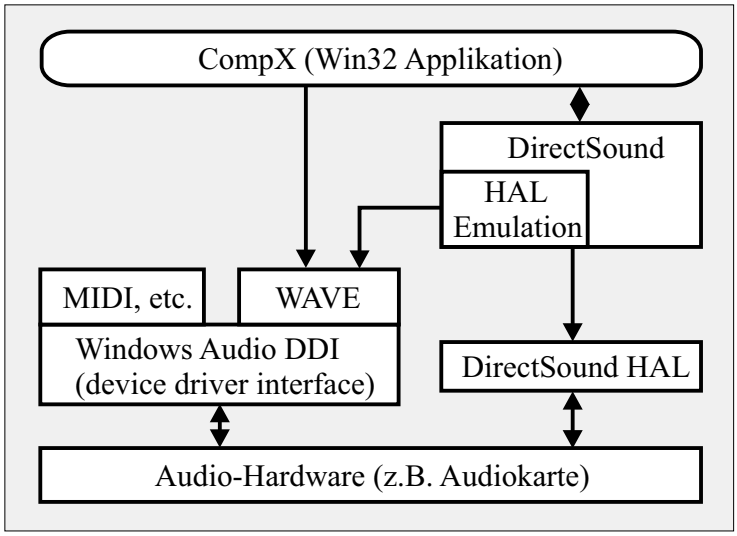


Abbildung 5.11: Architektur von DirectSound am Beispiel von *Comp*X

Die Verzögerung liegt damit in der Größenordnung der zu messenden Reaktionszeit. DirectSound reduziert diese Verzögerung auf ca. 20 ms[24].

Bevor auf die weiteren Vorteile eingegangen wird, soll die prinzipielle Architektur von DirectSound erläutert werden (s. Abbildung 5.11). DirectSound bietet einen alternativen Pfad zu den konventionellen Audiofunktionen (MCI), die links gezeigt sind. Mittels des „Hardware-Abstraction Layers" (HAL) greift DirectSound auf die Audiohardware (z.B. Audiokarte) zu, der eine einheitliche hardwareunabhängige Schnittstelle zum Funktionsaufruf darstellt. Dadurch wird sichergestellt, daß alle Funktionsaufrufe ohne

[24] Audiodaten werden durch DirectSound im PCM-Format zunächst gepuffert (primäre und sekundäre Puffer) und anschließend als Datenströme verarbeitet

Rücksicht auf die vorhandene Hardwareausstattung ausgeführt werden. Dies gelingt durch folgenden Mechanismus: Wird eine aufgerufene Funktion durch die Hardware unterstützt, erfolgt die Ausführung hardwareseitig. Ist dies durch z.B. eine sehr einfache Ausstattung der Audiokarte nicht möglich, werden nicht vorhandene Fähigkeiten durch DirectSound softwareseitig *emuliert* („Hardware-Emulation-Layer", HEL). Dadurch kann zwar die Ausführungszeit verlängert werden, es tritt jedoch keine Systemverletzung auf. Die Voraussetzung für dieses Funktionspinzip ist ein DirectSound-kompatibler Treiber des Hardwareherstellers, was allerdings aufgrund der weiten Verbreitung des Konzepts[25] für viele marktgängige Hardwarekomponenten sichergestellt ist.

Ein weiterer, für *Comp*X relevanter Vorteil von DirectSound, ist die datenstromorientierte Audiowiedergabe. Im Gegensatz zum MCI-Befehl PlaySound(), der PCM-Daten direkt an die Audiokarte leitet[26] werden PCM-Daten durch DirectSound zunächst gepuffert. Es existiert immer ein Primärpuffer, durch die Anwendung können jedoch weitere sog. Sekundärpuffer erzeugt werden. Die Audiodaten der Sekundärpuffer werden bei der Audiowiedergabe kontrolliert als Datenstrom in den Primärpuffer geleitet und gemischt. Durch dieses Prinzip können mehrere Audiosignale gleichzeitig mit variablem Aussteuerungspegel wiedergegeben werden, was in *Comp*X für Maskierungseffekte genutzt wird (vgl. Abschnitt 5.3.2).

Entwicklungswerkzeuge

*Comp*X wurde in der *Programmiersprache C++*[27] unter Verwendung einer RAD (Rapid Application Development) Entwicklungsumgebung der Fa. INPRISE (ehemals BORLAND), *C++ Builder*, entwickelt. Die Programmiersprache C++ wurde wegen der umfassenden Unterstützung *objektorientierter* Paradigmen gewählt [Bre97]. Aus der heutigen Sicht des *Software-Engineerings* gilt die Verwendung des Objektmodells, d.h. die objektorientierte Abbildung der Realität in eine Softwareanwendung, als bestes und zuverlässigstes Verfahren zur Entwicklung komplexer Systeme [Boo94]. Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch die Verfügbarkeit umfangreicher C++ Klassenbibliotheken. Der Grundgedanke der Klassenbibliotheken liegt in der Wiederverwendbarkeit von vorhandenem, getestetem Code. So müssen viele Standardroutinen nicht mühsam durch jeden Softwareentwickler erstellt werden, sondern können der Bibliothek entnommen werden, wodurch Fehlfunktionen reduziert werden. Im Rahmen der Entwicklung von *Comp*X wurde die bei C++ Builder mitgelieferte Klassenbibliothek VCL (Visual Component Library) verwendet, welche die Entwicklung gegenüber der traditionellen Windowsprogrammierung auf der Ebene der WIN32-API (Application Programming Interface) substantiell beschleunigt.

Als relationales DBS (Datenbank-System) wurde PARADOX in der Version 7.0 gewählt, da dieses Datenbanksystem einerseits Funktionen zur Einhaltung der referenti-

[25] die DirectX-Technologie wird vor allem durch die Entwicklung von Computerspielen vorangetrieben

[26] dadurch kann immer nur eine Audiodatei abgespielt werden

[27] auf dem Stand des ISO C++ Standardentwurfs 1997

ellen Integrität bietet (vgl. Abschnitt 5.2.2) andererseits kompatibel zur Datenbankschnittstelle der verwendeten Entwicklungsumgebung ist[28].

Die Realisierung der SPATIAL TOOLBOX für die binaurale Simulation des räumlichen Höreindrucks (siehe Abschnitt 6) erfolgte mit Hilfe des mathematischen Interpreters MATLAB (Version 4.2c), der sich in der digitalen Signalverarbeitung als Standard etabliert hat.

5.3 Module der Audiosignalverarbeitung

*Comp*X nutzt die Möglichkeiten der digitalen Signal- bzw. Audiosignalverarbeitung auf viefältige Weise. Der Einsatz erfolgt zum einen für die gezielte Aufbereitung akustischer Reize. Durch die Veränderung zeitlicher und spektraler Signalparameter wird die Inhaltsinformation im Sprachsignal gezielt variiert (Modul „Wortabruf" s. Abschnitt 7). Zum anderen erfordert die Bestimmung räumlich-akustischer Verarbeitungsleistungen ein technisches Verfahren zur Erzeugung des räumlichen Höreindrucks. Dies setzt den Einsatz digitaler Filter voraus (binaurales Simulationsmodul SPATIAL TOOLBOX s. Abschnitt 6).

Obwohl im Bereich der Audiosignalverarbeitung zahlreiche kommerzielle Werkzeuge mit reichhaltigem Funktionsumfang zur Verfügung stehen, werden relevante Forderungen des klinischen Einsatzes nicht unterstützt. Hierzu zählt vor allem die fehlende Integration der Werkzeuge in die experimentelle Umgebung. So werden beispielsweise in *Comp*X die Veränderungen am akustischen Signal parametrisiert, d.h. die benutzerdefinierten Modifikationen im Zeit- und Frequenzbereich werden durch Parameter beschrieben, die in der Systemdatenbank gespeichert und zur Laufzeit des Experiments ausgelesen und verarbeitet werden. Dadurch ergeben sich zahlreiche Vorteile (s. Abschnitt 7.2.3).

Alle Audiowerkzeuge stehen auch als eigenständige Programme zur Verfügung, die für neuropsychologische Untersuchungen in beliebigem Kontext verwendet werden können. Die Werkzeuge tragen damit über das System *Comp*X hinaus zum Technologietransfer bei.

5.3.1 Signalverarbeitung im Zeit- und Frequenzbereich

Veränderungen im Zeit- und Frequenzbereich erfolgen durch zwei Module (Signaleditor, Filtermodul). Im folgenden werden die einzelnen Funktionen anhand von Anwendungsbeispielen erläutert.

[28] BDE Borland Database Engine

Zeitbereich

Abbildung 5.12 zeigt den in *Comp*X integrierten Signaleditor, der Veränderungen des Audiosignals im Zeitbereich ermöglicht. Folgende Funktionen werden unterstützt:

- variable Segmentierung des Signals durch Schranken
- Variation des Hüllkurvenverlaufs (Aussteuerung)
- individuelle Anpassung der Lautstärke

Durch die Wahl von Schranken (A und B) kann ein beliebiges *zeitliches Segment* für die Wiedergabe ausgewählt werden. Im Fall eines Sprachsignals lassen sich so z.B. *Anlautphoneme* erzeugen[29]. Der Vorteil gegenüber synthetischen Anlautphonemen besteht darin, daß natürliche Lautübergänge (Koartikulation) beibehalten werden. Handelt es sich bei dem Sprachsignal um ein Wort, trägt jedes Segment inhaltliche Teilinformation des Wortes. Durch stufenlose Veränderung des Zeitfensters wird eine Abstufung der Inhaltsinformation erzielt. Diese Methode wird z.B. im Modul „Wortabruf" bei phonologischen Therapieverfahren angewendet.

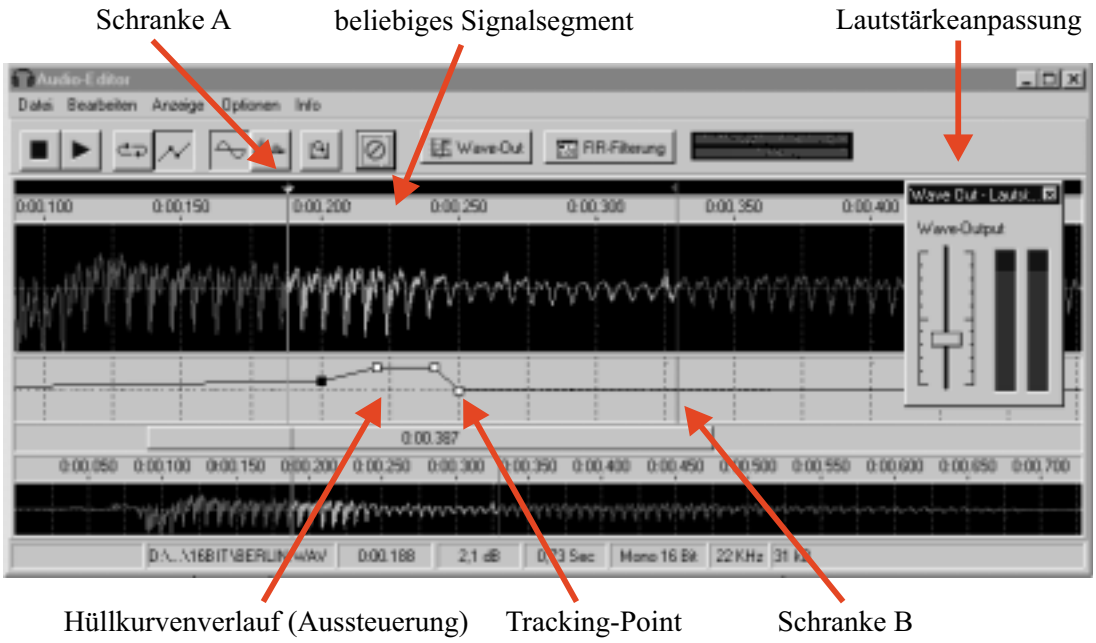


Abbildung 5.12: Benutzerschnittstelle des integrierten Signaleditors

Ferner kann die *Aussteuerung des Audiosignals* variabel verändert werden. Der Aussteuerungspegel des Signals wird durch eine *Aussteuerungshüllkurve* repräsentiert. Der

[29] diese dienen z.B. bei der Benennung eines bildhaften Gegenstandes als akustischer Hilfsreiz (s Abschnitt 7)

Pegel kann entweder für das gesamte Signal mittels einer dB-Skala angehoben bzw. abgesenkt werden oder durch Einfügen von frei plazierbaren „Tracking-Points" auf der Zeitachse benutzerdefiniert verändert werden. Mit der Aussteuerung wird die Intensität des Signals in einem Abschnitt verändert. Die Intensität ist eines von drei bestimmenden Merkmalen der *Sprachmelodie* (Prosodie), d.h. durch Änderung des Intensitätsverlaufs kann gezielt die Betonung z.B. einer Silbe hervorgehoben oder ausgeschlichen werden. Unabhängig von der Aussteuerung des Signals kann die *Lautstärke* bei der Wiedergabe *individuell*[30] für das bearbeitete akustische Signal veränder werden. Diese Funktionalität ist vor allem für gefilterte Signale relevant, da durch frequenzselektive Filterung die Signalenergie im hörbaren Frequenzbereich (16 Hz - 20 kHz) deutlich reduziert sein kann, so daß eine Kompensation durch die Lautstärkeanpassung erforderlich wird.

Frequenzbereich

Spektrale Signaleigenschaften werden durch den Einsatz digitaler Filter modifiziert. Der Signaleditor enthält zu diesem Zweck ein *FIR-Filter („finite-impulse-response")*. Das FIR-Filter zählt zur Klasse der digitalen Filter und ist allgemeiner auch unter dem Begriff des Transversalfilters bekannt [GK93]. Systemtheoretisch handelt es sich um ein ein lineares, zeitinvariantes kausales System (LZI-System) mit speziellen Eigenschaften:

- nichtrekursives System (grundsätzlich stabil)
- begrenzte Impulsantwort (identisch mit der Folge der Filterkoeffizienten)
- linearer Phasengang realisierbar

Abbildung 5.13 zeigt die Benutzerschnittstelle des Filters. Die Filtercharakteristik kann durch die Vorgabe einer gewünschten Hüllkurve frei gewählt werden. Realisierbar sind alle Grundformen frequenzselektiver Filter (Tiefpaß, Hochpaß, Bandpaß, Kammfilter und Kerbfilter[31]) mit unterschiedlicher Filterordnung. Die Filtereinstellungen können für eine spätere Wiederverwendung[32] gespeichert werden. Zur Visualisierung des Audiosignals wurde ein „Visible-Speech-Diagramm" gewählt, das häufig in der Sprachsignalverarbeitung verwendet wird [Fel91] und das Signal abhängig von der Zeit, Frequenz und Energie darstellt. FIR-Filter verwenden zur Begrenzung der Impulsantwort eine Fensterfunktion, deren Eignung vom Anwendungszweck abhängt. Im Filtermodul werden gängige Fensterfunktionen zur Auswahl angeboten (Rechteck, Hamming, Hanning, Blackman, Gauß, Welch, Parzen).

Das Filterdesign wurde zur Erweiterung des Einsatzspektrums bewußt flexibel gehalten. Ein Anwendungsbeispiel aus dem Modul „Wortabruf" verdeutlicht dies. Durch

[30] der Wert für die Wiedergabelautstärke wird isoliert für die bearbeitete Audiodatei ermittelt und gespeichert ohne allgemeine Einstellungen am Betriebssystem zu verändern

[31] „Notch-Filter"

[32] z.B. für systematische Untersuchungen

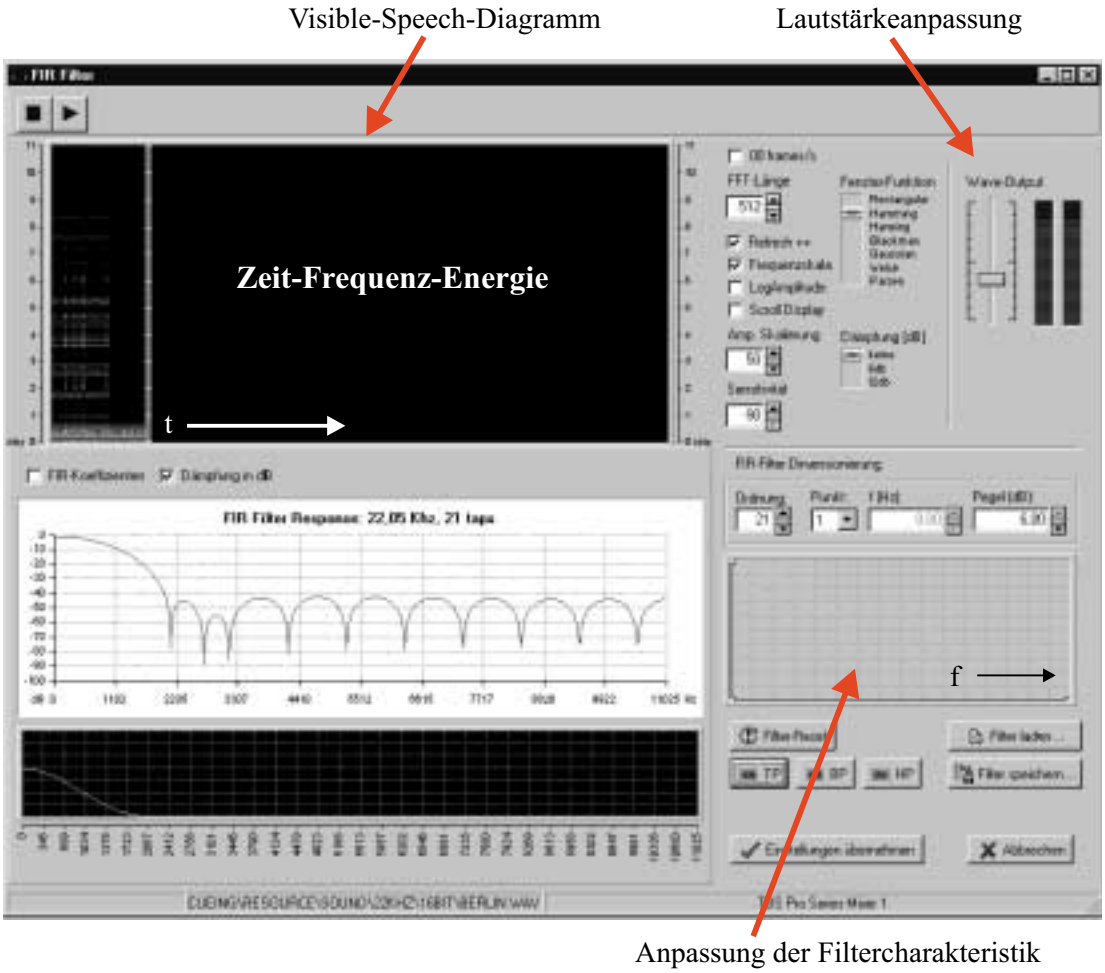


Abbildung 5.13: Benutzerschnittstelle des integrierten Filtermoduls

extreme Tiefpaßfilterung eines Sprachsignals ($f_G \approx$ Sprachgrundfrequenz) kann der Verlauf der Betonung gewonnen werden (Intonationskontur). Diese Information kann ebenso wie zeitliche Segmente des Sprachsignals (s.o.) für phonologische Hilfestellungen zur Erleichterung des Wortabrufs genutzt werden. Die erforderliche Abstufung der Hilfen wird durch die Variation der Filtercharakteristik erzielt, wodurch die Verständlichkeit des Wortes gezielt moduliert wird.

5.3.2 Maskierung akustischer Signale

Die bisherige Betrachtung beschränkte sich auf die Modifikationen *eines* akustischen Signals, respektive eine Audiodatei. In der natürlichen sprachlichen Kommunikation ist dies ein Sonderfall. Der allgemeinere Fall besteht aus Kommunikationssituationen mit mehreren beteiligten Sprechern oder Situationen, in denen Hintergrundgeräusche die Verständlichkeit der Sprache erschweren. Die sprachliche Äußerung wird akustisch verdeckt bzw. maskiert, wobei als Verdeckungs- bzw. Maskierungssignale andere

Sprachsignale oder Geräusche betrachtet werden können[33]. Das neuropsychologische Interesse an der akustischen Maskierungen ergibt sich aus folgenden Gründen:

- Verdeckungen des Sprachsignals mit Störsignalen erschweren die Sprachverarbeitung
- bestimmte Störungsphänomene treten erst unter diesen erschwerten Bedingungen auf

Eine natürliche Kommunikationssituation mit mehreren beteiligten Sprechern stellt erhöhte Anforderungen an die Sprachverarbeitung. Gegenüber der idelaen Gesprächsbedingung (zwei Sprecher in ruhiger Umgebung) werden zusätzlich Prozesse zur Lenkung der Aufmerksamkeit benötigt, um die Konzentration auf den jeweiligen Gesprächspartner zu führen und zu halten[34]. Neuropsychologische Untersuchungsansätze verwenden bislang meist *ideale* Gesprächs- bzw. Kommunikationssituationen. In der klinischen Umgebung werden die Patienten weitgehend von störenden Einflüssen befreit, wobei die erbrachten Leistungen unter erhöhten Anforderungen (z.B. Alltag) beträchtlich abweichen können (z.B. [CLC95, SBL86]). Trotz der klinischen Bedeutung existieren bislang keine anerkannten diagnostischen Verfahren und Konzepte zur Untersuchung dieser Störungen.

Eine Ursache für die geringe methodische Berücksichtigung liegt im technischen Aufwand zur Herstellung geeigneter akustischer Reize, der durch das hier vorgestellte Maskierungsmodul erheblich reduziert wird. Mit Hilfe von Methoden der digitalen Audiosignalverarbeitung können komplexe akustische Szenarien flexibel erstellt werden.

Realisierung des Maskierungsmoduls

Abbildung 5.14 zeigt die Benutzerschnittstelle des Maskierungsmoduls, die zur Visualisierung einer frei konfigurierbaren Anordnungen von Audiosignalen dient. Die Abszisse stellt eine skalierbare Zeitachse dar, während sich auf der Ordinate bis zu 16 virtuelle Audiokanäle befinden können. Jeder Kanal nimmt eine beliebige Anzahl digitaler Samples (Audiodateien) auf, deren zeitliche Abfolge durch die Position definiert ist.

Im Beispiel der Abbildung 5.14 wird eine Störschall/Nutzschall-Situation simuliert, in der drei Audiodateien auf drei virtuelle Kanäle verteilt sind. Von oben nach unten enthält Kanal 1 ein Sprachsignal, das durch ein Störsignal (z.B. weißes Rauschen, Kanal 3) in voller zeitlicher Länge verdeckt wird. Zusätzlich wird im Kanal 2 nach kurzer Verzögerung ein akustischer Ablenker präsentiert. Parameter wie Aussteuerungsgrad und Präsentationsdauer können sowohl für den Audiokanal als auch für jedes Sample individuell gewählt werden. Im Beispiel wurde der Aussteuerungspegel des Störsignals um 3

[33] im englischsprachigem Raum wird dies treffend als „Cocktail-Party-Effekt" bezeichnet

[34] Aufmerksamkeit selbst verarbeitet keine Information, sondern verstärkt die Informationsverarbeitung z.B. im akustischen Sinneskanal [Gol97]

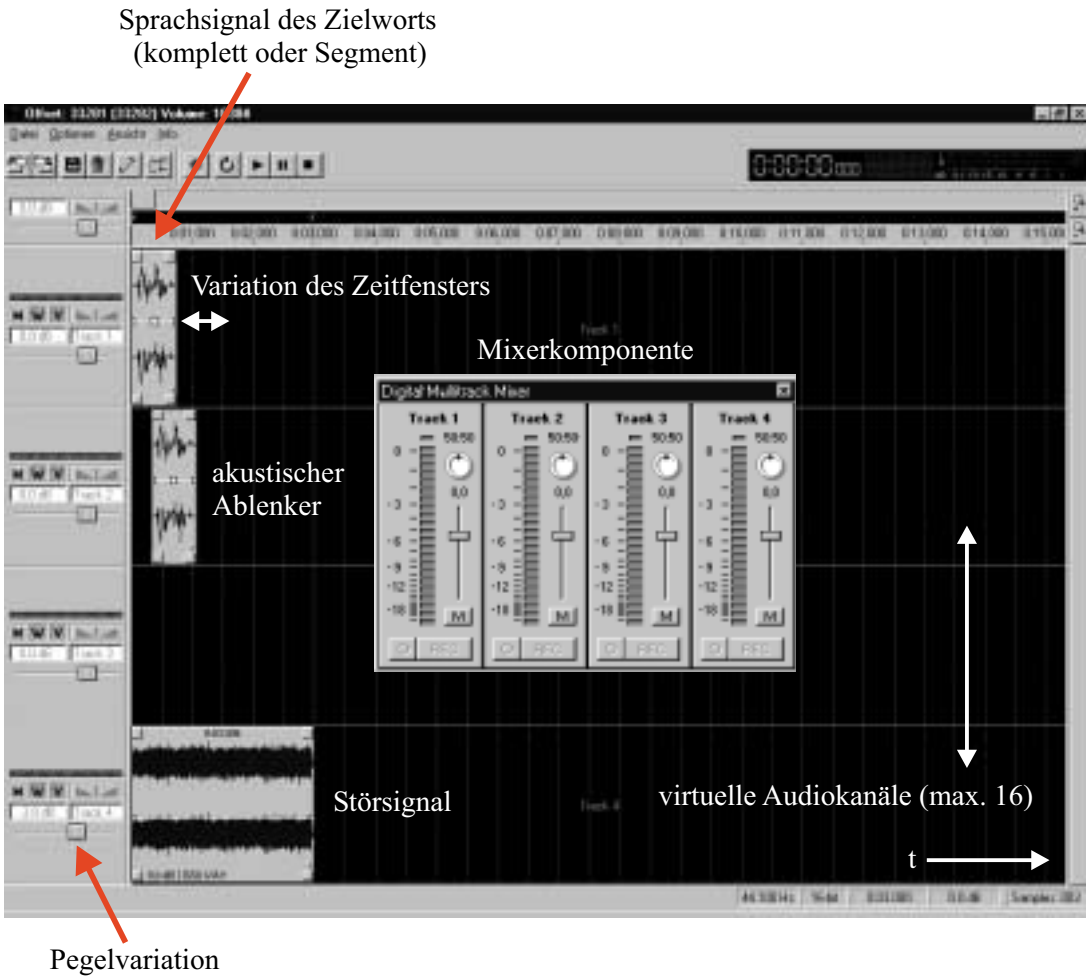


Abbildung 5.14: Benutzerschnittstelle des integrierten Maskierungsmoduls am Beispiel einer simulierten Störschall/Nutzschall-Situation

dB gegenüber dem Zielsignal im Kanal 1 abgesenkt. Das übersichtliche Abmischen der Audiokanäle wird durch die *Mixerkomponente* ermöglicht, in der die Parameter Aussteuerung und Balance gewählt werden können. Kanäle können selektiv auch „stumm" geschaltet werden. Abbildung 5.15 zeigt die Dialogelemente, mit denen Parameter des einzelnen Audiosignals verändert werden können. Neben einer gleichmäßigen Änderung des Aussteuerungsgrades kann eine frei wählbare Hüllkurve konfiguriert werden (vgl. Signaleditor w.o.).

Zur Übersicht über komplexe Anordnungen zeigt die Komponente *Sample-Manager* alle verwendeten Audiodateien in einer knotenorientierten Struktur (s. Abbildung 5.16).

Persistenz der Daten

Das Datenerhaltungskonzept im Maskierungsmodul orientiert sich am bisherigen Verfahren der parametrisierten Speicherung ohne physikalische Veränderungen am digitalen Original vorzunehmen. Aufgrund der höheren Anzahl benötigter Parameter wurde

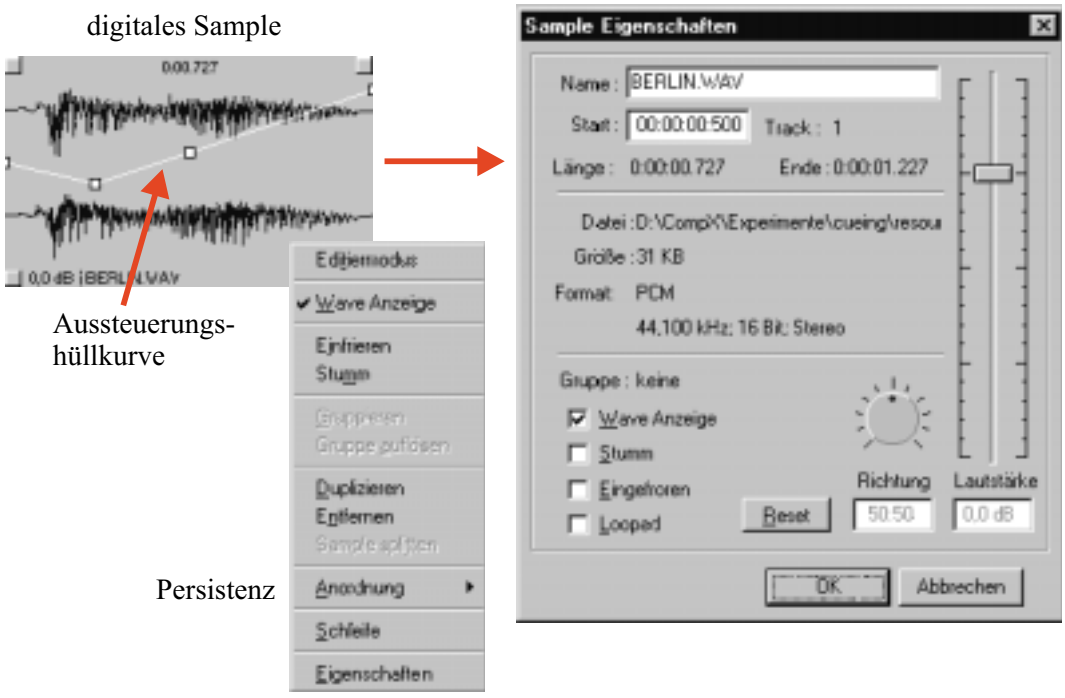


Abbildung 5.15: Dialogelemente zur Variation akustischer Eigenschaften am individuellen Audiosignal

die Entscheidung getroffen, die Parameter nicht unmittelbar in der Systemdatenbank von *Comp*X zu speichern, sondern in eine separate Datei zu schreiben. Eine konfigurierte „Audioszene" kann somit auf zwei Arten gespeichert werden:

- Speicherung der Parameterliste in einer separaten Datei (ASCII-Format)
- Speicherung der „Audioszene" durch Aufzeichnung in eine neue Audiodatei

Im ersten Fall wird die gesamte Konfiguration als Parameterfolge bzw. -liste in eine Textdatei geschrieben. Die verwendeten Audiodateien werden lediglich durch den Dateinamen und die Pfadangabe referenziert. Die auf diese Weise erstellte Datei besitzt die Endung *.apf und steht für „audio project file". In der Konfiguration von Experimenten kann diese Datei als Stimulusressource in *Comp*X aufgenommen werden, so daß in der Systemdatenbank nur die Referenz auf das „audio project file" (Dateiname und Pfadangabe) vorhanden ist (vgl. Abschnitt 7.2.3). Damit ergibt sich eine ressourcenschonende Integration in das experimentelle Umfeld des Systems *Comp*X.

Ferner wurde die Möglichkeit vorgesehen, die „Audioszene" aufzuzeichnen. Dabei wird die Szene innerhalb des Moduls abgespielt, wobei das resultierende Audiosignal simultan dazu aufgezeichnet wird und in *einer* separaten Audiodatei gespeichert wird. Durch diese Möglichkeit erweitert sich der Anwendungsbereich des Maskierungsmoduls erheblich. Da das Maskierungsmodul auch als separates Werkzeug verfügbar ist, können komplexe akustische Szenarien außerhalb des Systems *Comp*X erstellt und

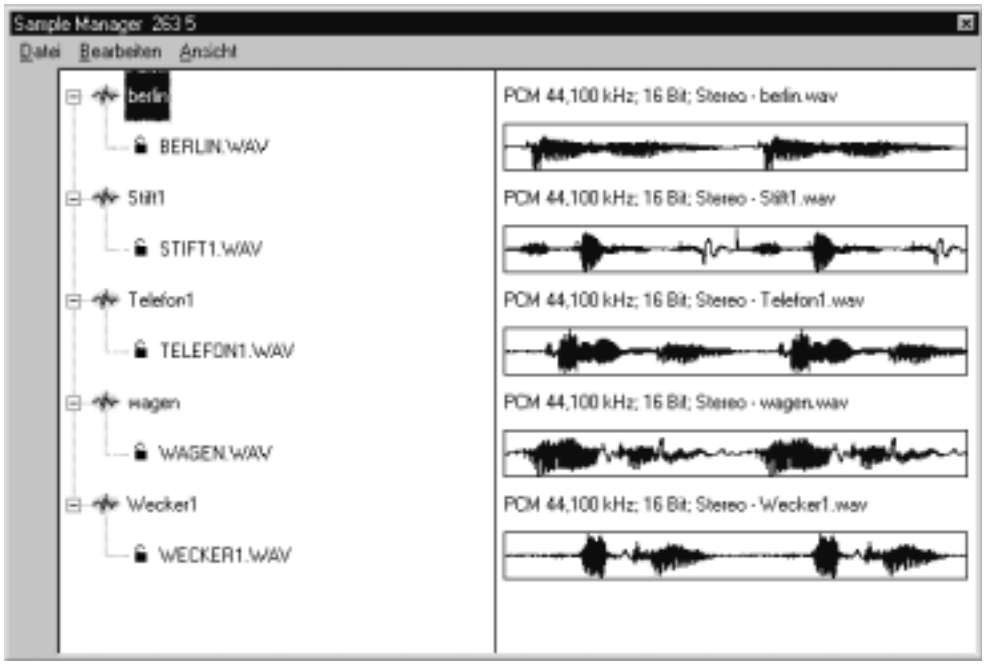


Abbildung 5.16: Benutzerschnittstelle der Komponente Sample-Manager zur Darstellung komplexer akustischer Szenarien

anschließend in einer Audiodatei gespeichert werden. Diese wiederum kann in beliebigen experimentellen Untersuchungen verwendet und eingesetzt werden. Als Minimalvoraussetzung wird lediglich gefordert, daß eine Möglichkeit zum Abspielen von Audiodateien gegeben ist.

Kapitel 6

Binaurales Simulationsmodul SPATIAL TOOLBOX

Das System *Comp*X ermöglicht im Modul „Akustische Raumrepräsentation" (vgl. Abschnitt 8) die systematische Untersuchung räumlich-akustischer Wahrnehmungs- und Gedächtnisleistungen. Zu diesem Zweck ist es erforderlich, akustische Reize aus unterschiedlichen Richtungen zu präsentieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb das Modul SPATIAL TOOLBOX entwickelt. Die Konzeption des Moduls beruht auf dem psychoakustischen Verfahren der binauralen Simulation und ermöglicht die Erzeugung eines räumlichen Höreindrucks mittels Kopfhörerdarbietung. Im folgenden Abschnitt wird der Aufbau, die Struktur und die technische Realisierung des Moduls erläutert.

6.1 Problemstellung und Lösungsansatz

6.1.1 Klinische Rahmenbedingungen und Anforderungen

Die Untersuchung von Störungen der räumlich-akustischen Informationsverarbeitung setzt die Möglichkeit zur Erzeugung eines räumlichen Höreindrucks voraus. Unter Berücksichtigung der klinischen Rahmenbedingungen, können zunächst folgende Anforderungen formuliert werden:

- Bestimmung räumlicher Hörleistungen mit klinisch vertretbarem Aufwand
- Erzielung valider und reliabler Untersuchungsergebnisse
- Flexible Verwendung von unterschiedlichem Stimulusmaterial (Sprache, Geräusche, Musik)
- Variation von Einflußgrößen des räumlichen Hörens (Augen-/Kopf-/Rumpfposition)

Die Anforderungen werden im folgenden näher betrachtet.

Bestimmung räumlicher Hörleistungen mit klinisch vertretbarem Aufwand

Ein wichtiger Parameter zur Beurteilung räumlich-akustischer Verarbeitungsleistungen ist die *Fähigkeit zur Lokalisation*. Unter Lokalisation wird dabei die Zuordnung zwischen dem Ort des Hörereignisses und dem Ort des zugehörigen Schallereignisses verstanden (vgl. Abschnitt 4.1.1). Die Untersuchung räumlicher Hörleistungen an Patienten beschränkt sich bislang auf wenige klinisch-experimentelle Studien. Zur Erzeugung des räumlichen Höreindrucks werden im wesentlichen zwei Verfahren angewandt:

- Hören unter Freifeldbedingungen
- Hören unter Kopfhörerbedingungen

Unter *Freifeldbedingungen* wird der räumliche Höreindruck durch kreisförmig um die Versuchsperson angeordnete Lautsprecher erzeugt (s. Abbildung 6.1).

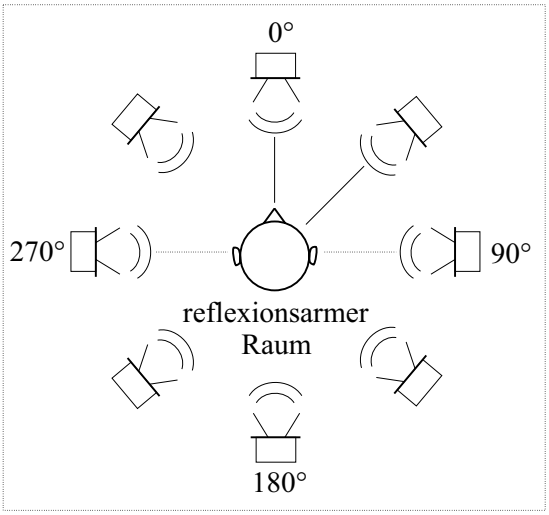


Abbildung 6.1: Lautsprecheranordnung unter Freifeldbedingungen, räumlich-akustische Auflösung $\Delta\varphi$

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt im Erhalt möglichst „natürlicher" Hörereignisse. Einer der Nachteile ist der hohe technische Realisierungsaufwand, der zusätzlich dadurch erhöht wird, daß zur Vermeidung störender Schallreflexionen im Raum eine reflexionsarme Laborumgebung benötigt wird. Mit diesem Verfahren durchgeführte Studien ([VGNB95, ZPV95, SCGM97]) beschränken sich mit Ausnahme von [VGNB95] auf den vorderen Teil der Horizontalebene (vgl. Abbildung 6.1, $[270\,°; 90\,°]$). Eine weitere Einschränkung betrifft die räumlich-akustische Auflösung, die durch die Anzahl der Lautsprecher begrenzt ist. In o.a. Studien betrug die Auflösung $40\,°$ bis minimal $10\,°$ und ist damit deutlich von der minimalen Lokalisationsunschärfe in der Horizontalebene (ca. $2° - 3°$) entfernt [MG91, Bla97, WK89a].

Der technische Aufwand wird durch eine *Kopfhörerdarbietung* wesentlich reduziert. Ähnlich wie bei der Stereophonie wird eine seitliche Auslenkung des Höreindrucks durch interaurale Zeit- und/oder Pegeldifferenzen simuliert (z.B. [BCSV84]). Der resultierende Höreindruck unterscheidet sich jedoch entscheidend von dem unter „natürlichen" Hörbedingungen. Die Kopfhörerdarbietung unterdrückt die akustische Filterwirkung der Außenohren (s. Abschnitt 4.4.2), was u.a. dazu führt, daß die Hörereignisse *im-Kopf* lokalisiert sind, d.h. sie befinden sich auf der Verbindungslinie beider Ohren statt wie beim „natürlichen" räumlichen Hören außerhalb des Körpers (s. Abschnitt 4.5.1). Damit entfällt gleichzeitig die Möglichkeit, zwischen vorne und hinten gelegenen Hörereignissen zu unterscheiden. Mit diesem Ansatz wird anstelle der Lokalisationsleistung die Fähigkeit zur *Lateralisation* geprüft. Die Verallgemeinerung von Untersuchungsergebnissen auf das Hören in „natürlicher" Umgebung ist daher eingeschränkt.

Erzielung valider und reliabler Untersuchungsergebnisse

Eine Voraussetzung für die zuverlässige Bestimmung räumlicher Hörleistungen ist die psychoakustisch valide Erzeugung räumlicher Hörereignisse. Betrachtet man die Ohrsignale (Signalverhältnisse am bzw. in unmittelbarer Nähe zum Trommelfell) als wesentliche Eingangsgröße des räumlichen Hörens, treten unter Freifeldbedingungen Störgrößen auf, die zu Veränderungen des Ohrsignals führen. Beispielhaft sind zu nennen:

- Schallreflexionen im Raum und am Meßaufbau selbst
- bewußte/unbewußte Kopfbewegungen (Drehen, Kippen) der Versuchsperson

Treten diese Effekte zeitgleich zur Lokalisation auf, wird der resultierende Höreindruck unabhängig von der experimentellen Aufgabenstellung beeinträchtigt. Freifelduntersuchungen zum räumlichen Hören erfordern daher die u.U. aufwendige Kontrolle dieser Einflüsse (z.B. reflexionsarme Untersuchungsumgebung, Fixation des Kopfs).

Flexible Verwendung von unterschiedlichem Stimulusmaterial

In psychoakustischen Untersuchungen zum räumlichen Hören werden häufig ideale Testsignale verwendet (z.B. Töne, bandbegrenztes bzw. „weißes" Rauschen) [Bla97, MG91]. Aus neuropsychologischer Sicht ist die Einbeziehung von Sprach-, Umgebungs- und Musiksignalen sinnvoll. Beim Hören dieser Signale werden zunächst gemeinsame Prozesse der akustischen Verarbeitung aktiviert (Reizwahrnehmung durch die periphere Hörsensorik, Weiterleitung der Reizinformation zum zentralen auditorischen System). Im Anschluß daran folgt eine reizspezifische Auswertung, die abhängig von der Art des Signals unterschiedliche Verarbeitungsstufen beinhaltet (z.B. Verarbeitung sprachlicher Information im Sprachzentrum). Obwohl Zusammenhänge zwischen den einzelnen Verarbeitungsstufen bisher nur im Ansatz erkannt sind [K$^+$98], ergeben sich durch das räumliche Hören interessante Erweiterungen. So können z.B. Prozesse

der Sprachverarbeitung *richtungsabhängig* untersucht werden. Ähnliches gilt für die Verarbeitung von tonalem und melodischem Reizmaterial (z.B. zur Ermittlung von Linksohr-/Rechtsohrvorteilen). Für den klinischen Einsatz besteht daher die Forderung, das akustische Signal möglichst flexibel auswählen zu können.

Variation von Einflußgrößen des räumlichen Hörens

Während im vorhergehenden Abschnitt z.B. bewußte/unbewußte Kopfbewegungen als Störgrößen des räumlichen Hörens beschrieben wurden, wird in diesem Abschnitt das neuropsychologische Untersuchungspotential für die gezielte und kontrollierte Variation dieser Einflußgrößen betrachtet.

Die neuronale Verarbeitung räumlicher Information im Gehirn ist ein integrativer Prozeß, an dem eine Vielzahl von Teilinformationen beteiligt ist. Einzelne Teilinformationen werden durch Signale verschiedener peripherer Sinnesorgane (Netzhaut des Auges, Muskelspindeln der Halzmuskulatur, Gleichgewichtsorgan) übertragen. In neuropsychologischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, daß diese Teilinformationen im Gehirn zur Bildung einer neuronalen Repräsentation des Raums verwendet werden. Dieser Prozeß beinhaltet u.a. die *Transformation* netzhautbezogener Koordinaten der visuellen Wahrnehmung in *körperbezogene Koordinaten* (körperzentriertes Referenz- bzw. Raumkoordinatensystem vgl. Abschnitt 3.4.1). Erst dadurch wird die Bestimmung der Körperposition und die Orientierung im Raum ermöglicht. Als Entitäten bzw. Informationsquellen stehen im wesentlichen folgende Größen zur Verfügung:

- Position der Augen
- Kopf-Rumpf-Position
- *Akustische Wahrnehmung*
- Visuelle/taktile Wahrnehmung

Die akustische Wahrnehmung ist demnach *eine* der Eingangsgrößen im Prozeß der räumlichen Informationsverarbeitung. Neuropsychologisch interessante Fragestellungen richten sich auf das Zusammenwirken der einzelnen Größen, wenn der Gesamtprozeß durch eine Hirnschädigung gestört ist. Während Kovarianzen zwischen der Kopf-Rumpf-Position und der visuellen Raumwahrnehmung experimentell nachgewiesen werden konnten (z.B. [KH97]), stehen ähnliche Untersuchungen zur akustischen Wahrnehmung noch weitgehend aus. Durch diese Untersuchungsansätze sollen kompensatorische[1] bzw. die Störung verstärkende Effekte erkannt werden, die gleichzeitig Rückschlüsse über die Funktionsweise des Referenzkoordinatensystems ermöglichen. Methodisch erfordert dies die systematische Variation ausgewählter Eingangsgrößen (z.B. Kopf-Rumpf-Position) bei Konstanz aller anderen. In der Realisierung derartiger Untersuchungen stellt sich das Problem der gegenseitigen Abhängigkeit einzelner

[1] gleichzeitig Anknüpfungspunkt für therapeutische Ansätze

Größen. Betrachtet man unter Freifeldbedingungen die Auswirkungen einer Relativbewegung des Kopfes z.B. durch Kopfdrehung, wird das resultiernde Hörereignis durch zwei Effekte bestimmt, die sich gegenseitig überlagern:

- Veränderung des Hörereignisses, verursacht durch die *Variation einer Eingangsgröße des neuronalen Raumkoordinatensystems*
- *Physikalisch verursachte Veränderung* des Hörereignisses durch Zu- bzw. Abwendung von der Schallquelle

Die getrennte Erfassung dieser Effekte ist unter Freifledbedingungen nur mit großem Aufwand realisierbar.

6.1.2 Lösungsansatz

Aus technischer Sicht können zur Erzeugung eines räumlichen Höreindrucks drei Klassen von Systemen unterschieden werden:

- Zwei-Kanal-Systeme (Stereo)
- Mehr-Kanal-Systeme (Surround Sound)
- Binaurale Simulationssysteme

Zwei-Kanal-Systeme

Ein bekanntes und weit verbreitetes Verfahren ist die Zwei-Kanal-Stereophonie (s. Abbildung 6.2).

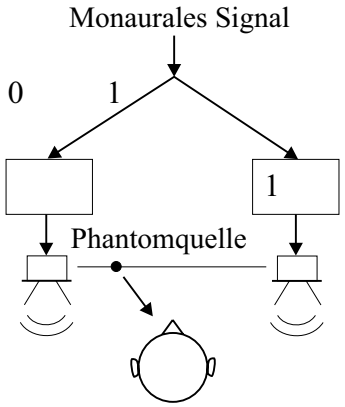


Abbildung 6.2: Prinzip der Zwei-Kanal-Stereophonie, Veränderung der Hörereignisposition durch kanalgetrennte Variation der Dämpfung α

Die Lokalisation der Schallquelle wird durch Pegel- und/oder Zeitdifferenzen zwischen linkem und rechtem Kanal simuliert, wodurch ein Stereoeffekt entsteht. Wird zusätzlich die Phasenbeziehung der Signale verändert, kommt es zur Aufweitung des Hörereignisses (Breitenwirkung von Pseudostereo)[Zan95]. Erfolgt die Wiedergabe des Stereo-Signals über zwei externe Lautsprecher, so befindet sich der Ort des Hörereignisses auf der Verbindungslinie zwischen linkem und rechtem Lautsprecher (Phantomquelle). Bei Kopfhörerdarbietung entstehen Hörereignisse, die sich auf der Verbindungslinie zwischen beiden Ohren befinden, d.h. die Information über die Entfernung der Schallquelle wird nicht reproduziert, was im wesentlichen auf das Fehlen der akustischen Filterwirkung der Außenohren zurückzuführen ist. Die Stereophonie gleicht den bislang in der klinischen Umgebung eingesetzten Kopfhörerverfahren und unterliegt damit den gleichen Beschränkungen (Hörereignis im-Kopf lokalisiert, Lateralisation statt Lokalisation).

Mehr-Kanal-Systeme

Eine weitere Möglichkeit zur wiedergabeseitigen Simulation eines räumlichen Höreindrucks bieten mehrkanalige Surround-Sound Systeme[2], die auf einer Weiterentwicklung des Stereo-Paradigmas basieren. Zur Erzeugung des Höreindrucks wird eine externe Lautsprecheranordnung verwendet. Abbildung 6.3 zeigt das Prinzip anhand eines 5.1 kanaligen Systems. Bei 20 bit Quantisierung (Dynamikbereich 120 dB) wird jeder der 5 Lautsprecher durch eine eigene Audiospur angesteuert[3]. Ein schmalbandiger Baßlautsprecher dient zur Verstärkung von Baßeffekten.

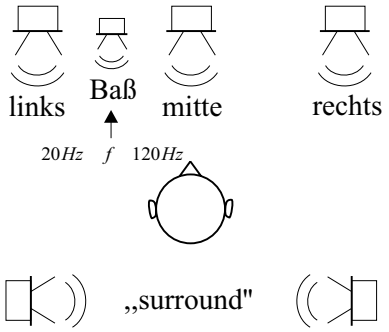


Abbildung 6.3: Lautsprecherkonfiguration eines 5.1 kanaligen Surround-Sound-Systems

Bewertet man die Eignung des Verfahrens für den Einsatz unter klinischen Bedingungen, ergeben sich folgende Problembereiche:

- Surround-Sound Systeme erzeugen einen *diffusen* räumlichen Höreindruck
- Die Reproduktion des räumlichen Höreindrucks über Kopfhörer ist i.allg. nicht möglich

[2] in der Unterhaltungselektronik auch unter dem Begriff „Dolby Surround Digital" bekannt

[3] die Audiodaten werden durch Anwendung eines Audiokoders (AC-3) ca. um den Faktor 10 komprimiert

Der aufgeweitete räumliche Höreindruck von Surround-Sound Systemen ist zur Bestimmung von Lokalisationsleistungen, die eine möglichst exakte Ortsangabe des Hörereignisses erfordern, nur bedingt geeignet. Ferner wird der Höreindruck nur über eine Lautsprecherwiedergabe erzielt, woraus sich identische Nachteile ergeben, wie in der Freifeldanordnung.

Binaurale Simulationssysteme

Die dritte Systemklasse bilden binaurale Systeme. Das Ziel dieser Systeme besteht darin, die Signalverhältnisse am Trommelfell unter Kopfhörerbedingungen so zu simulieren, daß sie denen beim „natürlichen" Hören in freier Umgebung entsprechen. Gelingt diese Simulation, so ist zu erwarten, daß der resultierende Höreindruck im Idealfall identisch mit dem unter Freifeldbedingungen ist. Eine wesentliche Erweiterung zum konventionellen Stereoverfahren besteht darin, daß in der 2-Kanal-Wiedergabe nicht nur interaurale Pegel- und Zeitdifferenzen simuliert werden sondern die komplette Richtungsinformation reproduziert wird, die durch das akustische Signal übertragen wird. Die Grundidee der binauralen Simulationstechnik besteht darin, das räumliche Hören als *lineares System* aufzufassen, bei dem die Schallquelle die Funktion des Senders und das Trommelfell die des Empfängers übernimmt. Wird der Ort von Sender und Empfänger konstant gehalten, ist das System ferner *zeitinvariant* und kann vollständig durch die Impulsantwort im Zeitbereich, respektive durch die Übertragungsfunktion im Frequenzbereich beschrieben werden (vgl. Abschnitt 4.4). Bei gegebener Impulsantwort bzw. Übertragungsfunktion kann durch binaurale Filterung (ohr- bzw. kanalgetrennt) die Richtungsinformation eines beliebigen akustischen Eingangssignals rekonstruiert werden. Das Prinzip der binauralen Simulation, die aus zwei Phasen besteht, ist in Abbildung 6.4 dargestellt (vgl. Abschnitt 4.4).

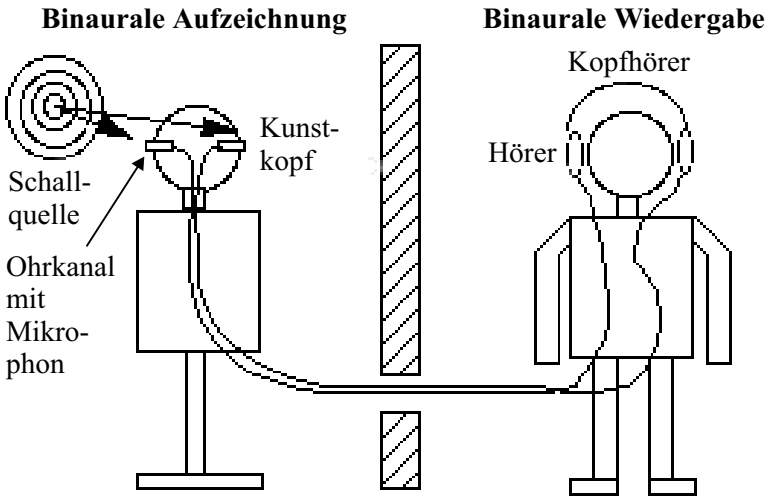


Abbildung 6.4: Prinzip der binauralen Simulation

In der ersten Phase (*binaurale Aufzeichnung*) wird die richtungsabhängige Impulsantwort getrennt für das linke und rechte Ohr bestimmt. Die Aufzeichnung erfolgt

entweder am Individuum oder an einem Kunstkopf, der durchschnittliche physikalische Abmessungen modelliert. Das System wird durch ein Testsignal angeregt, das von einer Schallquelle aus einer bestimmten Raumposition abgestrahlt wird. Durch im Ohrkanal in der Nähe des Trommelfells applizierte Miniaturmikrophone wird das Empfangssignal bestimmt, aus dem abhängig vom Testsignal das Übertragungsverhalten für die gegebene Schallquellenposition berechnet werden kann. Die so gewonnene Impulsantwort wird in der Phase der *binauralen Wiedergabe* zur - ohrgetrennten - Signaltransformation verwendet. Dadurch wird erreicht, daß die Signale am Trommelfell beider Ohren unter Kopfhörerbedingungen theoretisch exakt den Bedingungen in der binauralen Aufzeichnung, also dem Freifeldhören, entsprechen.

Das Verfahren soll unter folgenden Aspekten näher betrachtet werden:

- Psychoakustische Validität des Verfahren
- Realisierungsaufwand
- Beschreibung des Systemverhaltens (binaurale Aufzeichnung)
- binaurale Simulation vs. binaurale Synthese

Die *Validität* des Verfahrens kann bedingt durch die subjektive Wahrnehmung beim räumlichen Hören letztlich nur durch psychoakustische Untersuchungen nachgewiesen werden, die Hörleistungen unter Freifeld- und Simulationsbedingungen vergleichen. Zahlreiche Untersuchungen mit hörgesunden Versuchspersonen bestätigen die Zulässigkeit des Ansatzes mit akzeptablen Einschränkungen (vgl. Abschnitt 4.4.6). Ein besonderer Vorteil des binauralen Systems ergibt sich durch die *systemtheoretische* Beschreibung. In der Realisierung können Methoden der zeitdiskreten bzw. digitalen Signalverarbeitung angewendet werden, die den *Realisierungsaufwand* erheblich reduzieren. Das Systemverhalten kann so durch digitale Filter beschrieben werden, deren Charakteristik den gemessenen Impulsantworten entspricht. Dies ermöglicht eine softwaretechnische Realisierung mit minimalen Anforderungen an die Hardware. Ein kritischer Faktor ist die *Beschreibung des Systemverhaltens*. Hierzu müssen in der binauralen Aufzeichnung die Impulsantworten (HRIR head-related-impulse-response) meßtechnisch bestimmt werden, was i.d.R. nur durch psychoakustische Labors realisiert wird. Die ermittelten Meßdaten variieren abhängig vom Anwendungsfall vor allem in folgenden Aspekten:

- Aufzeichnungsobjekt (Individuum vs. Kunstkopf)
- Anzahl vermessener Schallquellenpositionen
- Meßaufbau und -bedingungen

Die binaurale Aufzeichnung an der *individuellen Versuchsperson* ist eine Idealbedingung, da alle Parameter erfaßt werden, die individuellen Schwankungen unterworfen

sind (z.B. physikalische Abmessungen des Außenohrs). Der Nachteil der individuellen Bestimmung der HRIR liegt im Meßaufwand der binauralen Signalaufzeichnung, die an jeder Versuchsperson erfolgen muß, mit der das binaurale System genutzt werden soll. Obwohl dieser Ansatz die größtmögliche Reliabilität erzielt, ist er, aufwandsbedingt, für den klinischen Einsatz nicht geeignet. Alternativ erfolgen Messungen an *Kunstköpfen*, die auf der Grundlage repräsentativer physikalischer Abmessungen Kopf, Außenohr und Oberkörper modellieren. Unter akzeptablen Einschränkungen (z.B. [WADW93]) eignen sich diese Aufzeichnungen zur räumlich-akustischen Simulation an beliebigen Versuchspersonen.

Im binauralen Simulationssystem können nur Schallquellenpositionen simuliert werden, die zuvor in der binauralen Aufzeichnung vermessen wurden, d.h. die Auflösung des Systems wird durch die *Anzahl vermessener Schallquellenpositionen* bestimmt.

Entscheidend für die Konstruktion des binauralen Systems und damit für die Qualität des resultierenden räumlichen Höreindrucks ist die Kenntnis von Meßaufbau und -bedingungen, unter denen die Aufzeichnung erfolgte. Hierzu zählen folgende Faktoren:

- Raumcharakteristik (reflexionsarm oder ungedämpft)
- aufnahmeseitiger Meßaufbau (Lautsprechertyp, Mikrophontyp etc.)
- Ort der Messung (außerhalb des Ohrkanals, Ohrkanaleingang, Trommelfell)
- Charakteristik des verwe ndeten Eingangssignals

Diese Faktoren bestimmen entscheidend die Wahl des Entzerrungskonzepts, das zur Kompensation aufnahmeseitiger Verzerrungen geeignet ist (s. Abschnitt 6.3.3).

Der letzte Aspekt obiger Aufzählung unterscheidet zwischen *binauraler Simulation* und *binauraler Synthese*. Im ersten Fall werden nur Raumpositionen simuliert, die zuvor vermessen wurden. Abhängig von der Anzahl vermessener Positionen entsteht so eine diskrete Folge simulierbarer Positionen. Im Gegensatz dazu wird in der binauralen Synthese versucht, die Meßdaten einzelner Positionen zur Erzeugung kontinuierlich verteilter Raumpositionen zu nutzen. Dies gelingt durch den Einsatz approximierender Methoden (z.B. Interpolationsverfahren), die allerdings zusätzliche Ungenauigkeiten verursachen und an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden sollen (s. z.B. [KW92]).

6.1.3 Lösungsweg

Aus der bisherigen Betrachtung leitet sich die Zielvorstellung ab, die Vorteile des „natürlichen" räumlichen Höreindrucks beim Freifeldhören mit den Vorteilen des geringen apparativen Aufwands der Kopfhörerdarbietung zu verbinden. Die Kopfhörerdarbietung ermöglicht neben der Kontrolle des akustischen Signals gleichzeitig die gezielte Untersuchung von Einflußgrößen des räumlichen Hörens (z.B. Kopfdrehung *ohne* Änderung des Schallereignisses), wobei die apparativen Anforderungen auch für den klinischen Einsatz geeignet sind. Im Rahmen der Systementwicklung von *Comp*X wurde

daher die Entscheidung getroffen, den räumlichen Höreindruck durch ein binaurales System zu simulieren. Eine Marktsichtung, in der kommerzielle Lösungsansätze verglichen wurden, erbrachte folgendes Ergebnis:

Vorhandene 3-D Audiosysteme verfolgen einen rechenzeitoptimierten Ansatz

Kommerzielle Anwendungen der 3-D Audiotechnik werden vor allem durch den konsumorientierten Sektor der Computerspiele geprägt. Die Simulation „räumlicher" Höreindrücke beschränkt sich fast ausschließlich auf Erweiterungen des Stereo-Paradigmas und ist hinsichtlich der verwendeten Lokalisationsquellen auf interaurale Merkmale beschränkt. Die Ursache liegt in der rechenzeitorientierten Zielsetzung der Systeme, wodurch rechenzeitaufwendige Operationen, als Folge einer zeitdiskreten Faltung bzw. DFT (diskrete Fouriertransformation), häufig nicht realisiert werden. Im Anwendungsziel „multimediale Animation" steht die qualitativ hochwertige Simulation räumlicher Höreindrücke nicht im Zentrum.

Softwaretechnische Schnittstellenproblematik

Demgegenüber stellt sich bei vorhandenen binauralen Systemen das Problem der softwareseitigen Unzugänglichkeit von Programmierschnittstellen. Kommerzielle Applikationen besitzen meist nur ein geringes Interesse an der Offenlegung des Quellcodes oder an der (aufwendigen) Gestaltung eines API (Application Programming Interface), das Drittentwicklern die Möglichkeit zur Einbindung der angebotenen Funktionalitäten in eigene, spezifische Entwicklungen gibt.

Aus diesen Gründen wurde in der Systementwicklung von *Comp*X die Entscheidung zugunsten einer eigenen Implementation des binauralen Systems getroffen. Das Gesamtsystem gewinnt dadurch erheblich an Flexibilität. Das Hauptproblem der Verfügbarkeit geeigneter binauraler Meßdaten konnte durch die Verwendung von Kunstkopfmeßdaten gelöst werden, die durch das Media Lab Perceptual Computing am Massachusetts Institute of Technology (MIT) bestimmt und für wissenschaftliche Zwecke zur Verfügung gestellt wurden [GM95].

6.2 Aufbau und Gestaltung

Der folgende Abschnitt beschreibt den Aufbau, den Funktionsumfang und die Bedienung des entwickelten binauralen Simulationsmoduls SPATIAL TOOLBOX. Die Konzeption des Moduls wurde auf die klinische Anwendung abgestimmt. Daraus ergibt sich beispielsweise die Notwendigkeit, die Bedienung ohne nachrichtentechnische Spezialkenntnisse zu ermöglichen. Hierzu wurde eine graphische Benutzeroberfläche implementiert, über die, möglichst intuitiv, alle Parameter des Systems eingestellt werden können. Ferner besteht an relevanten Stellen des Programms Zugriff auf Hinweise und weitere Hintergrundinformationen, die dem Benutzer als Entscheidungshilfe dienen sollen. Das Modul besitzt folgende Eigenschaften:

- binaurale Simulation von maximal 710 virtuellen Schallquellenpositionen
- minimale Auflösung im Azimuth: 5°
- Anpassung des Entzerrungsnetzwerks
- Filterung beliebiger akustischer Signale
- Protokollierung der Simulation

Zur Realisierung des gesamten Moduls wurde der mathematische Interpreter MATLAB Version 4.2 c genutzt, der aufgrund der Vielzahl implementierter Algorithmen der digitalen Signalverarbeitung ausgewählt wurde. Gleichzeitig unterstützt MATLAB die Erstellung einer graphischen Benutzeroberfläche, wodurch eine konsistente Entwicklung innerhalb einer Umgebung möglich war.

6.2.1 Konfigurationsparameter

Die Konfiguration der SPATIAL TOOLBOX umfaßt im wesentlichen folgende Einzelschritte:

- Wahl des Eingangssignals (Stimulus-Input)
- Wahl der virtuellen Schallquellenposition (Azimuth/Elevation)
- Festlegung des Ausgangssignals (Stimulus-Output)

Alle erforderlichen Einstellungen werden am Bildschirm in Abbildung 6.5 vorgenommen.

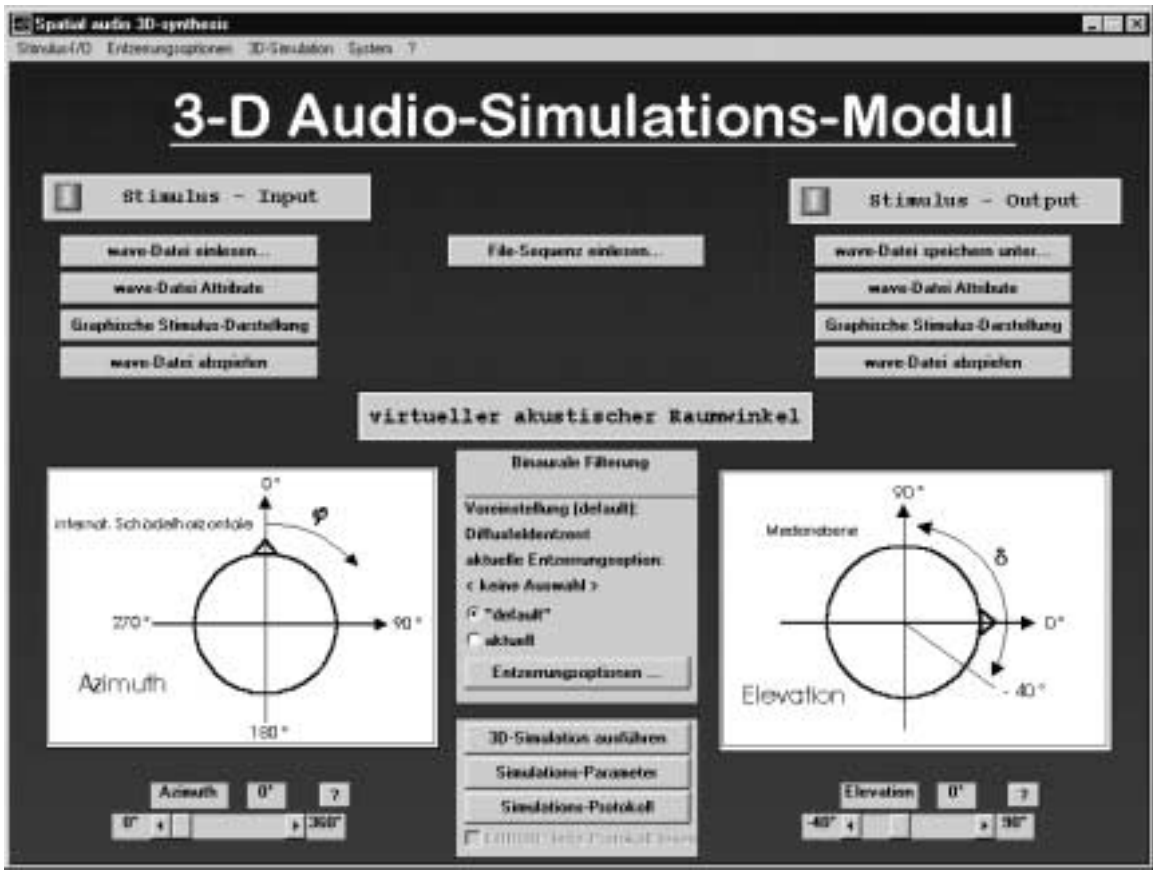


Abbildung 6.5: Konfiguration der binauralen Simulation in der SPATIAL TOOLBOX

Stimulus-Input

Die Eingangsgröße der binauralen Simulation ist ein digitales akustisches Signal (Eingangssignal). Für die SPATIAL TOOLBOX kann jedes Signal verwendet werden, das im unkomprimierten WAVE-Format (PCM) als Datei gespeichert ist. Dieses Format wurde im Rahmen der Multimedia-Erweiterungen von der Fa. Microsoft eingeführt und ist zwischenzeitlich ein gängiges Standardformat [Zan95]. Die Auswahl des Eingangssignals erfolgt durch eine gewohnte Dialogoberfläche (s. Abbildung 6.6). Folgende PCM-Formate werden unterstützt:

- Abtastfrequenz f_a 11.025, 22.050, 44.100 kHz
- 8-bit oder 16-bit Quantisierung
- Mono oder Stereo

Obwohl die binaurale Simulation mit niedrigen Abtastfrequenzen und Quantisierungen möglich ist, ergeben sich bedingt durch das Shannon'sche Abtasttheorem [Lük90] Grenzfrequenzen f_g im hörbaren Bereich (5.5 kHz bzw. 11 kHz bei $f_a = 11.025$ bzw.

Abbildung 6.6: Dialog zur Auswahl des Eingangssignals

22.050 kHz). Dadurch wird insbesondere die Wirksamkeit monauraler Lokalisationsquellen eingeschränkt, die für das räumliche Hören erst in höheren Frequenzbereichen ($f \geq 5\,kHz$) relevante Anteile liefern. Ähnliches gilt für die Auflösung der spektralen Feinstruktur, die von der höheren Dynamik der 16-bit Quantisierung (Dynamikbereich 96 dB) erheblich besser abgebildet wird. Zur Erzielung qualitativ hochwertiger Simulationsergebnisse sollten im praktischen Einsatz Eingangssignale mit der höchstmöglichen Abtastfrequenz und Quantisierung gewählt werden.

Programmintern wird nach der Auswahl des Eingangssignals zunächst die Header-Information der WAVE-Datei ausgewertet. Danach werden die Zahlenwerte des digitalen Signals in eine Vektor-/Matrixstruktur eingelesen, die für die weitere numerische Verarbeitung geeignet ist.

Virtuelle Schallquellenpositionen

Die SPATIAL TOOLBOX ermöglicht die binaurale Simulation von insgesamt 710 virtuellen Schallquellenpositionen. Diese Anzahl entspricht den in der binauralen Aufzeichnungsphase durch das MIT am Kunstkopf vermessenen Schallquellenpositionen. Tabelle 6.1 zeigt die Verteilung der Meßpunkte für jede Elevationsebene[4], wodurch die minimalen Azimuth-Inkremente in der Horizontalebene bestimmt sind. Die Einstellung der gewünschten Schallquellenposition erfolgt durch Schieberegler in diskreten Stufen (s. Abbildung 6.5), die die Gruppe zulässiger Positionen berücksichtigen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird das zugrundgelegte Koordinatensystem in zwei Schnittebenen (Horizontalebene für Azimuthwinkel bzw. Medianebene für Elevationswinkel) graphisch dargestellt.

Binaurale Simulation

Der Benutzer startet die Simulation durch Verwendung des Buttons 3D-SIMULATION AUSFÜHREN. Intern wird das Eingangssignal kanalgetrennt für die Wiedergabe am

[4] vereinbartes Koordinatensystem gem. Abbildung 4.2; positive Elevationswinkel nach oben

Elevation	Anzahl der Positionen	Azimuth-Inkrement
-40	56	6.43
-30	60	6.00
-20	72	5.00
-10	72	5.00
0	72	5.00
10	72	5.00
20	72	5.00
30	60	6.00
40	56	6.43
50	45	8.00
60	36	10.00
70	24	15.00
80	12	30.00
90	1	x

Tabelle 6.1: Verteilung der Schallquellenpositionen nach Elevationsebenen während der binauralen Aufzeichnung durch das MIT [GM95]

linken und rechten Ohr gefiltert. Das Systemverhalten der binauralen Filter entspricht der am Kunstkopf gemessenen Impulsantwort (HRIR) bei der entsprechenden Schallquellenposition (s. Abschnitt 6.3). Die benötigte Zeitdauer für die Filterung ist abhängig von der Länge des Eingangssignals. Ein weiterer Parameter betrifft die Auswahl des Entzerrungsverfahrens, durch das dem Anwender die Möglichkeit gegeben wird, individuelle Anpassungen vorzunehmen. Die Einstellungsoptionen werden in Abschnitt 6.2.2 näher erläutert.

Abbildung 6.7: Dokumentation der Filterung

Stimulus-Output

Nach Durchführung der binauralen Simulation können die gefilterten Daten in einer WAVE-Datei gespeichert werden. Die Dateiauswahl erfolgt vergleichbar zum Stimulus-Input. Im Ergebnis steht eine richtungsgefilterte WAVE-Datei im Stereo-Format zur Verfügung. Diese kann anschließend über jedes Gerät abgespielt werden, das WAVE-

Dateien verarbeiten kann[5].

Graphische Stimulusdastellung

Die SPATIAL TOOLBOX ermöglicht neben der binauralen Filterung die graphische Darstellung von Eingangs- und gefiltertem Ausgangssignal. Kanalgetrennte Darstellungen sind im Zeit- und Frequenzbereich möglich, wobei zusätzlich die spektrale Energieverteilung in einem Spektrogramm angezeigt werden kann. Die Auswahl erfolgt über die Buttons GRAPHISCHE STIMULUS-DARSTELLUNG (vgl. Abbildung 6.5).

6.2.2 Entzerrungsnetzwerk

In der binauralen Simulation kommt der Entwicklung einer Entzerrungsstrategie besondere Bedeutung zu (vgl. Abschnitt 6.3.3). Die Ursache liegt darin, daß Verzerrungen zu Abweichungen der Signalverhältnisse am Trommefell zwischen der simulierten und der „natürlichen" Bedingung des räumlichen Hörens führen, wodurch die Qualität der binauralen Simulation beeinflußt wird. Verzerrungen können bezüglich ihrer Herkunft unterschieden werden:

- binaurale Aufzeichnung
- binaurale Wiedergabe

Aufnahmeseitig werden näherungsweise *lineare Verzerrungen* vor allem durch den verwendeten Lautsprecher (Funktion der Schallquelle) und die im Gehörgang befindlichen Miniaturmikrophone verursacht (Aufzeichnung des Empfangssignals). Diese Verzerrungen sind folglich in der gemessenen Impulsantwort enthalten. Wiedergabeseitig verursacht der Kopfhörer, der i.allg. über keinen konstanten Amplituden- und Phasengang verfügt, zusätzliche Verzerrungen. Durch die Wahl einer geeigneten Entzerrungsstrategie wird versucht, diese störenden Einflüsse zu kompensieren. Die Eignung eines Entzerrungsverfahrens ist allerdings abhängig vom Untersuchungsaufbau (z.B. verwendeter Kopfhörertyp) und den individuellen Gegebenheiten der Versuchsperson, so daß eine pauschale Aussage zugunsten eines „besten" Verfahrens nicht möglich ist. Aus diesem Grund wurde im Modul SPATIAL TOOLBOX ein Entzerrungsnetzwerk implementiert (s. Abbildung 6.8), das psychoakustisch bekannte Entzerrungsverfahren zur Auswahl anbietet [Bla97, G$^+$81].

Es kann zwischen folgenden Verfahren gewählt werden:

- Rohdaten (ohne Entzerrung)

[5] zur Wiedergabe werden Geräte mit möglichst geringen Verzerrungen empfohlen z.B. hochwertige Soundkarte

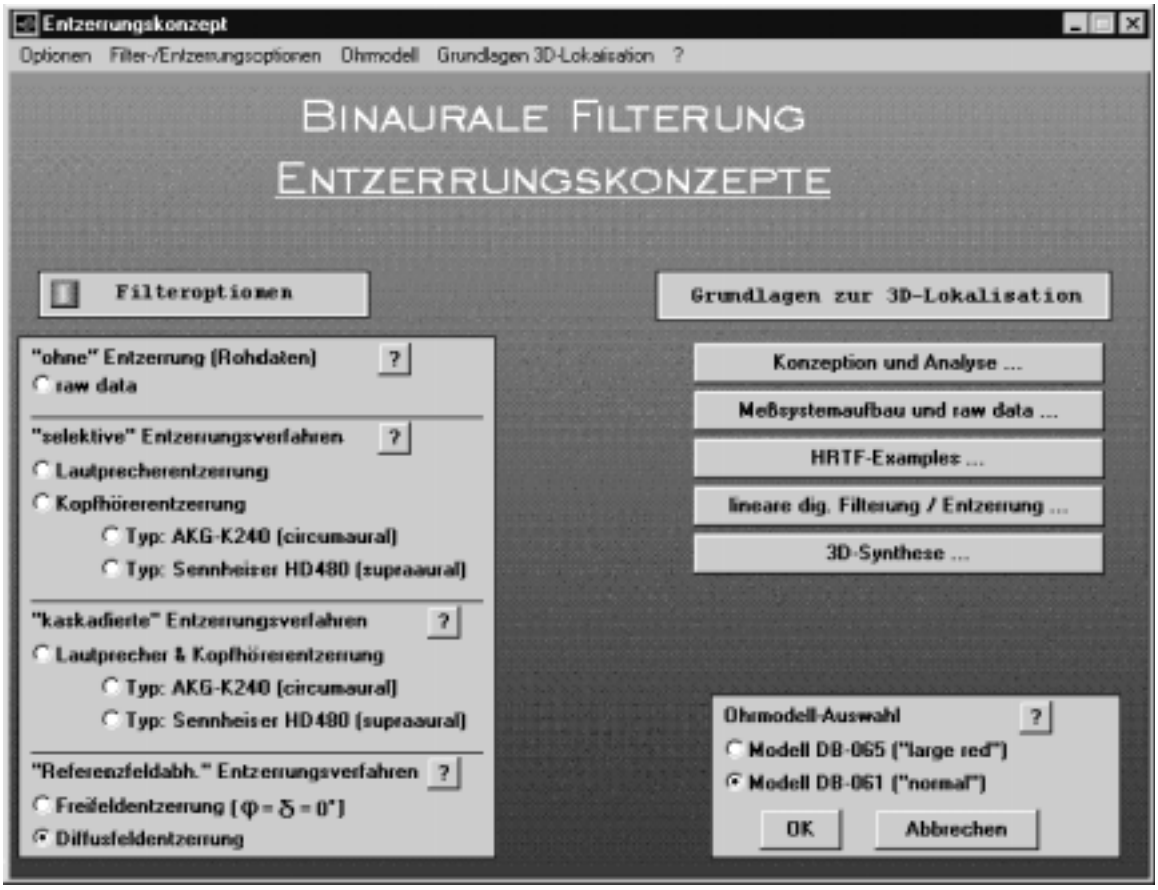


Abbildung 6.8: Entzerrungsoptionen in der SPATIAL TOOLBOX

- Selektive Verfahren
- Kaskadierte Verfahren
- Referenzfeldabhängige Verfahren (Diffusfeld- / Freifeld-Entzerrung)

Selektive und *kaskadierten* Verfahren verwenden zur Kompensation linearer Verzerrungen *inverse Filter* (z.B. Lautsprecher *oder* Kopfhörer). Die Superpositionseigenschaft linearer Systeme ermöglicht durch Reihenschaltung (Kaskadierung) die Kompensation bzw. Normalisierung mehrerer Verzerrungeinflüsse (z.B. Lautsprecher *und* Kopfhörer).

Einen besonderen Stellenwert nehmen *referenzfeldabhängige* Verfahren ein. Hier wird versucht, eine bestmögliche Kompensation des Kunstkopfeinflusses selbst zu erzielen. Der Kunstkopf als physikalische Nachbildung durchschnittlicher menschlicher Abmessungen von Kopf, Außenohr und teilweise auch Oberkörper ist normativ und zeigt notwendigerweise Abweichungen vom Individuum. Eine Kompensationsmöglickeit besteht darin, die Impulsantworten sämtlicher Richtungen durch die Impulsantwort *einer* Richtung (Referenzrichtung) zu normalisieren. Meist wird als Referenzrichtung der Frontaleinfall $\varphi = \delta = 0°$) gewählt (Freifeld-Entzerrung). Alternativ dazu kann

über ein gewichtetes Mittel aller Einfallsrichtungen normalisiert weden (Diffusfeld-Entzerrung).

Durch die Auswahlmöglichkeit stehen einem Expertennutzer zusätzliche Anpassungsmöglichkeiten offen. Bei der Systementwicklung wurde allerdings berücksichtigt, daß sich nicht jeder Anwender mit den Details des Entzerrungskonzepts auseinandersetzen wird, weshalb systemseitig eine Voreinstellung („default") vorgegeben wird (vgl. Abbildung 6.5).

Ohrmodelle

Die lineare akustische Filterfunktion des Außenohrs zeigt starke Abhängigkeiten von der geometrischen Form des Außenohrs, die als Ursache für individuelle Unterschiede in der Fähigkeit zum räumlichen Hören gelten [WADW93]. In der Kunstkopfmessung des MIT wurden deshalb sämtliche Meßdaten für zwei Ohrmodelle mit unterschiedlichen Abmessungen ermittelt (Typ Knowles Electronics DB-061 u. DB-065). In der SPATIAL TOOLBOX kann daher zwischen den beiden Ohrmodellen gewählt werden. Die Auswahl bietet neben den Entzerrungsverfahren eine weitere Möglichkeit zur Anpassung des Systems an die individuellen Untersuchungsbedingungen. Die Entscheidung für ein Ohrmodell kann durch vorbereitende Hörversuche unterstützt werden. Systemseitig wird ein Ohrmodell als Voreinstellung ausgewählt („normales" Ohrmodell DB-061, s. Abbildung 6.8), was dem Benutzer die Entscheidung erleichtert.

6.3 Technische Realisierung

Der folgende Abschnitt zeigt die Systemstruktur des Moduls und analysiert die aufgezeichneten Meßdaten (Impulsantwort HRIR) genauer. Im Anschluß daran werden die realisierten Entzerrungsverfahren erläutert.

6.3.1 Struktur des Systems

Systemschaltbild des binauralen Systems SPATIAL TOOLBOX

Aus systemtheoretischer Sicht besteht die SPATIAL TOOLBOX aus zwei Anteilen (s. Abbildung 6.9):

- 2-kanaliges, binaurales Richtungsfilter
- Entzerrungsnetzwerk

Die folgende Beschreibung legt eine zeitdiskrete Realisierung zugrunde, wobei Impulsantworten des Originalsystems mit dem Buchstaben h, die des zugehörigen inversen Systems mit h^{-1} bezeichnet werden.

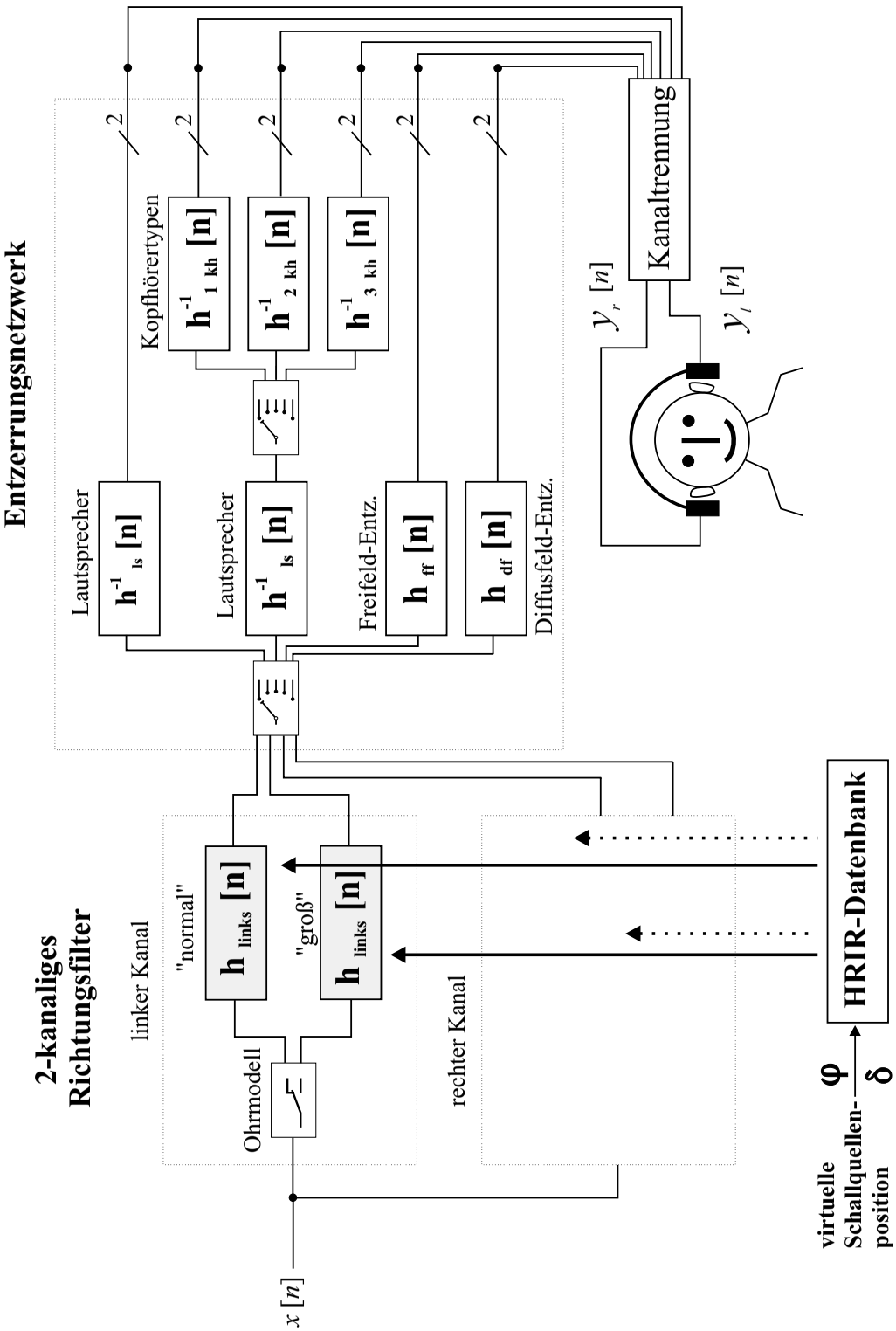


Abbildung 6.9: Systemschaltbild des binauralen Systems SPATIAL TOOLBOX in zeitdiskreter Realisierung, φ: Azimuth-, δ: Elevationswinkel, h^{-1}: Impulsantwort des inversen Systems

Eine digitale Eingangsfolge $x[n]$ durchläuft zur Reproduktion der Richtungsinformation zunächst ein lineares *2-kanaliges (binaurales) Richtungsfilter*. Die Übertragungseigenschaften beider Filter entsprechen den am Kunstkopf gemessenen Impulsantworten ($h_{links}[n]$bzw.$h_{rechts}[n]$). Zur Vereinfachung zeigt Abbildung 6.9 lediglich den Aufbau des Filters für den linken Kanal (linkes Ohr). Die Richtungsabhängigkeit der Impulsantwort erfordert ein separates Paar von Impulsantworten für jede simulierte (virtuelle) Schallquellenposition. Bei insgesamt 710 simulierbaren Schallquellenpositionen werden folglich 1420 Impulsantworten benötigt, deren strukturierte Verwaltung eine HRIR (head-related-impulse-response)-Datenbank übernimmt.

Die binaurale Filterung erfolgt alternativ für eines von zwei Ohrmodellen. Da in der binauralen Aufzeichnungsphase zwei unterschiedliche Außenohrnachbildungen verwendet wurden [GM95], verdoppelt sich dadurch die Anzahl der Impulsantworten.

Am Ausgang des Richtungsfilters enstehen zwei Ausgangssignale (linker bzw. rechter Kanal, abhängig vom gewählten Ohrmodell), die bereits die vollständige Richtungsinformation enthalten. Die Signale beinhalten allerdings Verzerrungen der binauralen Aufzeichnung (Lautsprecher, Miniaturmikrophone, Kunstkopfcharakteristik), die durch das *richtungsunabhängige* Entzerrungsnetzwerk im zweiten Systemanteil kompensiert werden. Die Auswahl der Verfahren wurde bereits in Abschnitt 6.2.2 erläutert. Im Anschluß an die Entzerrung erfolgt eine Kanaltrennung, durch die beide Ausgangssignale in korrekter Orientierung zur Wiedergabe an den Kopfhörer übertragen werden.

6.3.2 Analyse der HRIR-/HRTF-Daten

In der SPATIAL TOOLBOX werden Impulsantworten (HRIR head-related-impulse-response) verwendet, die im Rahmen einer umfangreichen binauralen Kunstkopfaufzeichnung durch das MIT Media Lab Perceptual Computing bestimmt [GM95] und für Forschungszwecke zur Verfügung gestellt wurden. Im folgenden wird zunächst das verwendete Meßverfahren erläutert. Nach einer Systemklassifkation werden allgemeine und spezielle Eigenschaften im Zeit- und Frequenzbereich betrachtet. Im folgenden wird die Übertragungs- bzw. Systemfunktion als HRTF (head-related-transferfunction) bezeichnet.

Impulsantwortverfahren zur Messung der HRIR

Die zur Verfügung gestellten Meßdaten enthalten die 2-kanalige Impulsantwort[6] eines Lautsprechers (Typ Realistic Optimus Pro 7), der sich in 1.4 m Entfernung vom Kunstkopf (Typ KEMAR) in einem reflexionsarmen Raum befand. Die Signalaufzeichnung erfolgte durch Miniaturmikrophone (Typ Etymotic ER-11), die im Gehörgang des Kunstkopfes appliziert wurden.

[6] gemessen am linken u. rechten Ohr des Kunstkopfes

Die Bestimmung der komplexen Übertragungsfunktion HRTF erfolgte durch ein Impulsantwortverfahren im Zeitbereich. Prinzipiell kann ein System zur Messung der Impulsantwort mit einem beliebigen Testsignal angeregt werden, das im intendierten Meßbereich über eine geeignete spektrale Energieverteilung verfügt (z.B. Puls bzw. Pulsfolgen). Insbesondere bei der Ermittlung akustischer Impulsantworten ist zu berücksichtigen, daß die Impulsantwort über einen relativ langen Zeitraum bestimmt werden muß und hohe Energien zur Kompensation akustischer Störungen im Raum (z.B. Hintergrundrauschen) erforderlich sind. Bei diesen Anwendungen werden häufig periodische Pseudorauschfolgen (bipolare, pseudo-randomisierte Folgen) verwendet, die unter der Bezeichnung „Maximal-Längen-Folgen" MLS bekannt sind [MB95, RV89, Van94]. Diese Folgen besitzen vorteilhafte mathematische Eigenschaften und sind mit geringem Aufwand realisierbar (rekursives digitales Schieberegister). Gleichzeitig kann das System im Vergleich zur Einzelimpulsmessung mit höheren Energiemengen angeregt werden, wodurch ein höheres Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) erzielbar ist.

In der Kunstkopfmessung wurde zur Erzeugung der Folgen ein 14-bit Register verwendet. Die Länge der Folgen betrug $L = 2^{14} - 1 = 16383$. Simultan zur Anregung des Systems wurde das in den Miniaturmikrophonen empfangene Signal mit einer Abtastfrequenz von f_a von 44.1 kHz aufgezeichnet. Die Impulsantwort wurde anschließend durch Kreuzkorrelation des gemessenen Signals mit dem Eingangssignal (ML-Sequenz) bestimmt. Dabei wird eine allgemeine Eigenschaft linearer, zeitinvarianter Systeme genutzt[7]. Bezeichnet $\mathcal{E}\{\cdot\}$ den mathematischen Erwartungswert, HRIR (head-related-impulse-response) die gesuchte Impulsantwort und $x[n]$ die Eingangs- bzw. $y[n]$ die Ausgangsfolge, so gilt für die Kreuzkorrelation ϕ_{xy} zwischen Ein- und Ausgangssignal folgende Beziehung:

$$\begin{aligned}\phi_{xy}[m] &= \mathcal{E}\{x[n]\, y[n+m]\} \\ &= \mathcal{E}\{x[n] \sum_{k=-\infty}^{\infty} HRIR[k]\, x[n+m-k]\} \\ &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} HRIR[k]\, \phi_{xx}[m-k] \end{aligned} \tag{6.1}$$

Die Kreuzkorrelation ergibt sich damit aus der Faltung der Impulsantwort mit der Eingangsautokorrelationsfolge ϕ_{xx}. Bedingt durch die verwendete Länge der Pseudorauschfolgen kann das Eingangssignal näherungsweise als mittelwertfreies weißes Rauschen betrachtet werden, d.h. es gilt $\phi_{xx}[m] = \sigma_x^2\, \delta[m]$, wobei σ_x^2 die Varianz und $\delta[m]$ die Einheitsimpuls-Funktion darstellt. Eingesetzt in Gleichung 6.1 erhält man:

$$\phi_{xy}[m] = \sigma_x^2\, HRIR[m] \tag{6.2}$$

D.h. die Kreuzkorrelation zwischen Ein- und Ausgangsfolge des linearen Systems ist für mittelwertfreies Rauschen am Eingang proportional zur Impulsantwort.

Die so ermittelte Impulsantwort enthält Verzögerungen, die durch die zurückgelegte Wegstrecke des Schalls (1.4 m) und die Trägheit des Meßsystems verursacht sind. Diese

[7] Systemklassifikation s.u.

Signalanteile enthalten keine relevante Richtungsinformation und können entfernt werden. Ferner enthält die Impulsantwort Schallreflexionen, die durch im relexionsarmen Raum befindliche Objekte des Meßaufbaus verursacht sind. Diese Anteile liefern ebenfalls keine relevante Richtungsinformation, treten im Gegensatz zu den Verzögerungen aber erst zu späteren Zeitpunkten auf. Die Impulsantwort muß daher auf relevante Anteile beschränkt werden.

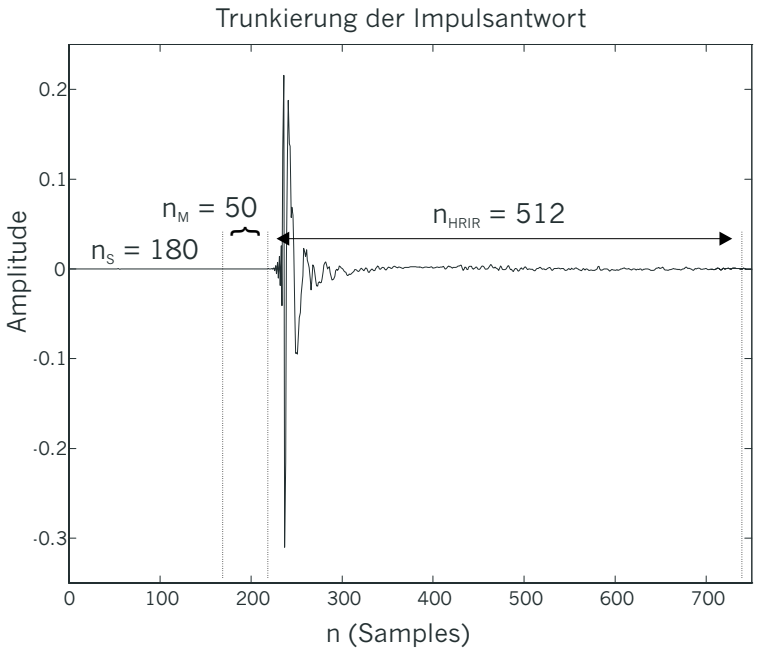


Abbildung 6.10: Gewinnung der HRIR ($n_HRIR = 512$ Samples) durch Trunkierung; n_S: Signalverzögerung durch Luftübertragung; n_M: Signalverzögerung durch Trägheit des Meßsystems

Abbildung 6.10 zeigt das Verfahren, mit dem die Impulsantwort durch Trunkierung der Meßdaten ermittelt wurde. Aufgrund der Verzögerungen n_S und n_M werden die ersten 230 Samples verworfen. Die nächsten 512 Samples ($\approx$ 11.6 ms bei $f_a = 44100$ Hz) werden als Impulsantwort (HRIR) verwendet. Alle nachfolgenden Samples beinhalten Schallreflexionen, die durch Abschneiden ebenfalls unberücksichtigt bleiben.

Bei Frontaleinfall ($\varphi = \delta = 0\,^\circ$) wurde ein SNR-Verhältnis von 65 dB erzielt[8]. Insgesamt wurden 710 Schallquellenpositionen (mittlerer Positionsfehler $\pm 0.5\,^\circ$) vermessen, deren Auflösung in Tabelle 6.1 dargestellt ist. Neben der Impulsantwort des Kunstkopfes wurde die Impulsantwort des verwendeten Lautsprechers (Typ Realistic Optimus Pro 7), sowie mehrerer Kopfhörertypen (AKG K 240, Sennheiser HD480, Radio Shack Nova 38, Sony Twin Turbo) bestimmt. Diese Daten dienen der Konstruktion eines Entzerrungsnetzwerks (s. Abschnitt 6.3.3). Die Daten stehen in einem binären, UNIX-

[8]der Dynamikbereich der Quantisierung mit einer Wortlänge von 16 Bit ($\approx$ 96 dB) übersteigt damit das maximal erzielte SNR-Verhältnis

kompatiblem Format zur Verfügung. Im folgenden werden allgemeine und spezielle Eigenschaften der HRTF betrachtet.

Systemklassifikation

Die Übertragungsfunktion HRTF beschreibt die Amplituden- und Phasenverzerrungen der Signalübertragung von der Schallquelle (Lautsprecher) bis zum Empfang an den Miniaturmikrophonen im Gehörgang des Kunstkopfes. Das System besitzt die Eigenschaft der *Linearität*, die aus der Linearität der Schallwellengleichungen (vgl. Abschnitt 4.4.2) folgt[9].

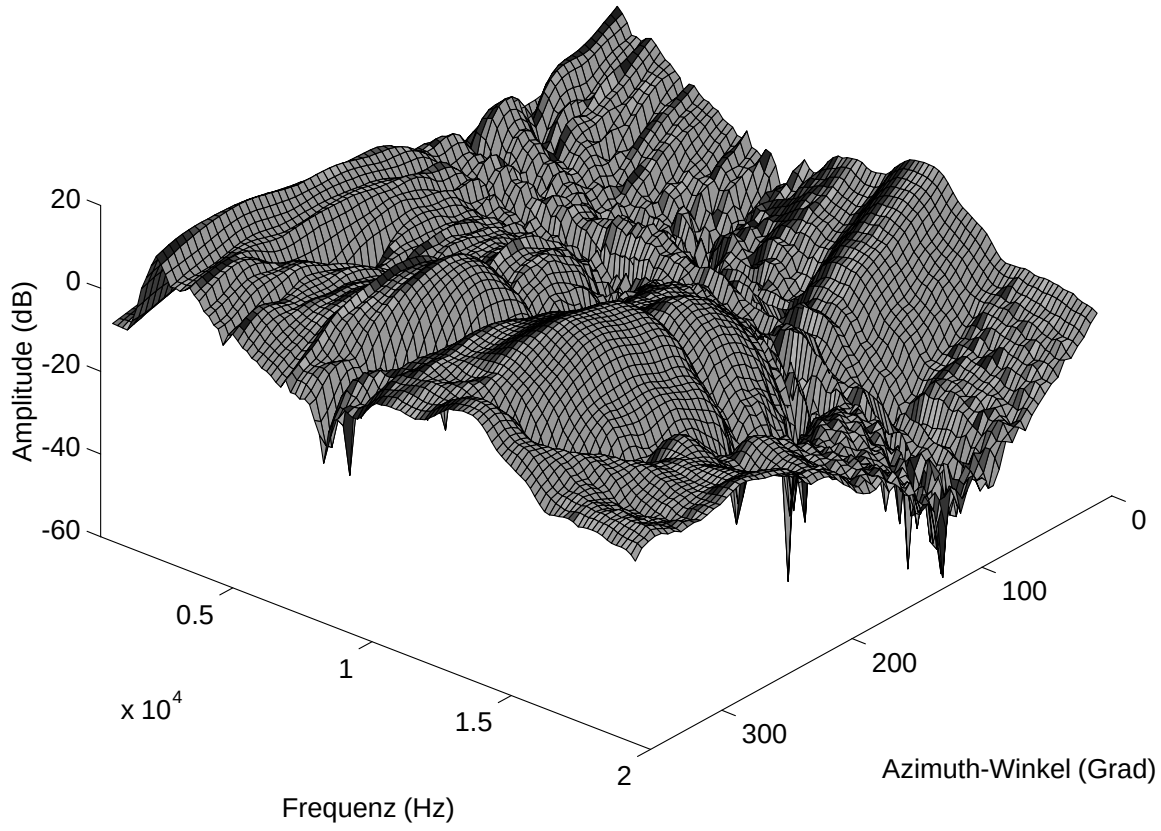


Abbildung 6.11: Amplitudengang der HRTF bei variabler Schallquellenposition entlang der Horizontalebene (0° Elevation), linkes Ohr, Rohdaten *ohne* Entzerrung, Abtastfrequenz $f_a = 44.1$ kHz

Unter der Voraussetzung einer physikalisch statischen Anordnung (keine Relativbewegung von Schallquelle und Hörer) ist das System ferner *zeitinvariant*. Die HRTF gehört damit der Klasse der LZI-Systeme[10] an. Weitere Eigenschaften ergeben sich aus der Beschränkung der Impulsantwort $HRIR[n]$, die nur für einige Werte von Null

[9] Nicht-Linearitäten des Meßsystems werden vernachlässigt
[10] Linear-Zeitinvariantes System

verschieden ist und damit zur Klasse der FIR-Systeme (finite-impulse-response) zählt. Für die Impulsantwort $HRIR[n]$ gilt:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |HRIR[n]| < \infty \text{ bzw. } HRIR[n<0] = 0 \tag{6.3}$$

Damit erfüllt das System die Eigenschaften der Stabilität und Kausalität.

Abbildung 6.11 zeigt den Amplitudengang der HRTF für variable Schallquellenpositionen entlang der Horizontalebene am linken Ohr. Trotz starker Unregelmäßigkeiten ist die sinusförmige Abhängigkeit des Signalverlaufs vom Azimuth-Winkel erkennbar. Wie erwartet, zeigt der Amplitudengang bei der Einfallsrichtung 90° ein Minimum durch die Abschattungswirkung des Kopfes, während bei der Position 270°, an der das linke Ohr der Schallquelle direkt zugewandt ist, ein Maximum auftritt. Gleichzeitig sind die spektralen Feinstrukturen bei Frequenzen $f \geq 5$ kHz erkennbar, die im wesentlichen Träger der monauralen Richtungsinformation sind (vgl. Abschnitt 4.3.2).

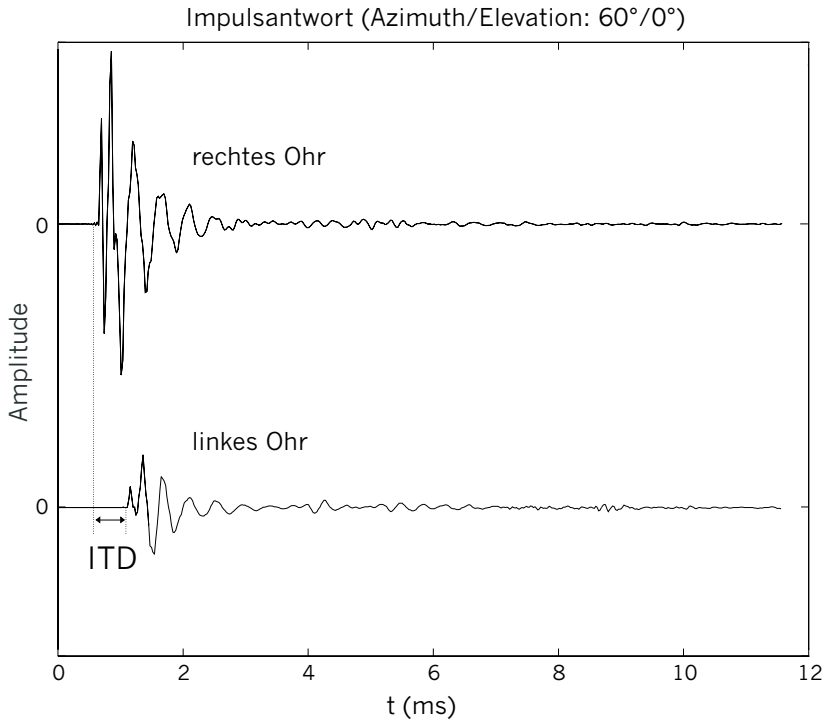


Abbildung 6.12: Impulsantwort linkes vs. rechtes Ohr bei seitlicher Schallquellenposition (Horizontalebene, 0° Elevation, 60° Azimuth), ITD: „interaural time difference" (interauraler Laufzeitunterschied), deutlich sichtbare interaurale Pegelunterschiede (ILD „interaural level difference")

Zur Beobachtung der interauralen Merkmale wird die Impulsantwort am linken und rechten Ohr bei seitlicher Auslenkung der Schallquelle betrachtet (s. Abbildung 6.12).

Eigenschaften der Übertragungs-/Systemfunktion HRTF

Eine bedeutende Unterklasse von LZI-Systemen sind Systeme, die eine lineare Differenzengleichungen N-ter Ordnung mit konstanten Koeffizienten erfüllen [OS99]:

$$\sum_{k=0}^{N} a_k \, y[n-k] \; = \sum_{k=0}^{M} b_k \, x[n-k] \tag{6.4}$$

Speziell für FIR-Systeme (Nullstellensysteme) gilt, daß zur Berechnung des Ausgangssignals keine Rekursion erforderlich ist, d.h. in diesem Fall wird $N = 0$ gesetzt. Damit reduziert sich Gleichung 6.4 zu:

$$\begin{aligned} y[n] &= \frac{1}{a_0} \left(b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + b_2 x[n-2] + ... + b_M x[n-M] \right) \\ &= \sum_{k=0}^{M} \left(\frac{b_k}{a_0} \right) \, x[n-k] \end{aligned} \tag{6.5}$$

Nun soll die dazugehörige Systemfunktion $H(z)$ betrachtet werden, die durch Transformation in die z-Ebene mit $z = e^{j\omega}$ eine adäquate Darstellung liefert. In algebraischer Form läßt sich schreiben:

$$H(Z) \; = \frac{Y(z)}{X(z)} \; = \left(\frac{1}{a_0} \right) \sum_{k=0}^{M} b_k \, z^{-k} \tag{6.6}$$

In a) wird zunächst eine allgemeine Eigenschaft dieser Systemfunktion betrachtet, während b) eine spezifische Eigenschaft der HRTF aufzeigt.

a) Die Systemfunktion kann in ein *minimalphasiges* System und ein *Allpaß-System* zerlegt werden[11]:

$$H(Z) \; = H_{min}(z) \, H_{ap}(z) \; = |H(z)| \, e^{j \, \varphi(f)} \; e^{j \, \Phi(f)} \tag{6.7}$$

Der Amplitudengang des minimalphasigen Systems ist identisch mit dem des Ursprungssystems $H(z)$. Von allen Systemen, die den gleichen Amplitudengang besitzen, erreicht $H_{min}(z)$ diesen mit der geringsten Phasenverzögerung $\varphi(f)$. Der Allpaß $H_{ap}(z)$ selbst besitzt einen konstanten Amplitudengang $|H_{ap}(z)| = 1$ und dient dazu, die verbleibende Differenz zum Phasengang des Ursprungssystems zu realisieren.

b) Der Phasengang der HRTF (s. Abbildung 6.13) ist für $f \leq 15$ kHz näherungsweise linear. Daher kann der Phasengang des Allpasses durch eine reine Verzögerung approximiert werden.

[11] genaugenommen trifft diese Aussage auf jede rationale, lineare Systemfunktion eines Pol-Nullstellenfilters zu

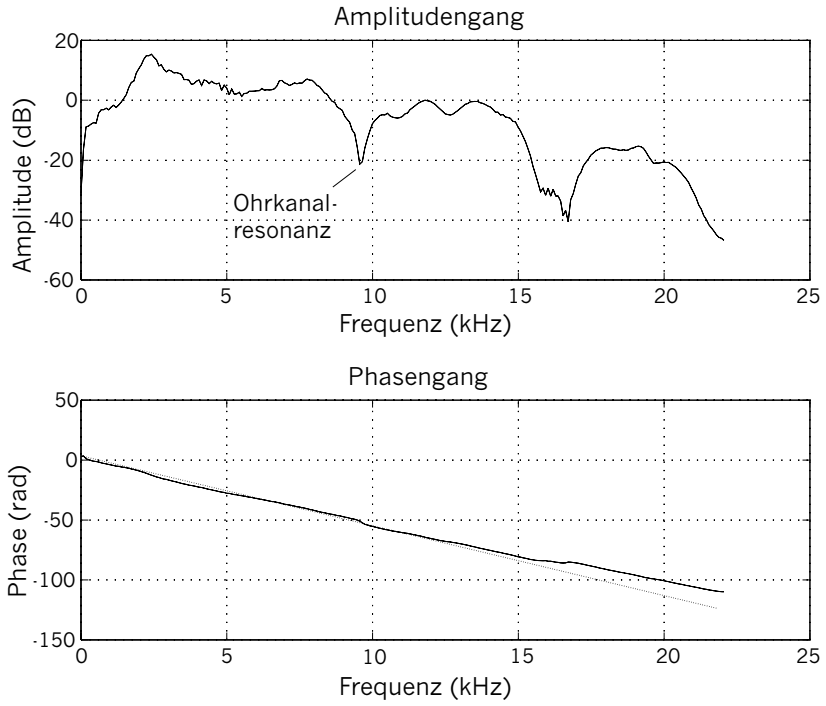


Abbildung 6.13: Amplituden- und Phasengang der HRTF bei seitlicher Schallquellenposition (Horizontalebene, 0° Elevation, 60° Azimuth), gestrichelt: lineare Approximation des Phasengangs

6.3.3 Entzerrungsstrategie und Filterdesign

Die größten Herausforderungen der binauralen Simulation liegen in der Vermeidung einer Im-Kopf-Lokalisiertheit (IKL) des Höreindrucks (vgl. Abschnitt 4.5.1) und in der Minimierung von „front-/back confusions", also Richtungsinvertierungen, die durch Mehrdeutigkeiten des Höreindrucks verursacht werden. Die Qualität der binauralen Simulation wird durch eine Reihe von Einflußfaktoren bestimmt, z.B.:

- verwendete Technik bei der Aufzeichnung der HRIR
- Wahl des Entzerrungsverfahrens
- interindividuelle Variationen in der HRIR
- Hörerfahrung der Versuchsperson
- kognitive Interferenzen mit nicht akustischen Reizen (z.B. visuelle Wahrnehmung)

Obwohl eine eindeutige Gewichtung der Faktoren nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich ist, kommt den *Entzerrungsverfahren* besondere Bedeutung zu. Die gemessene Impulsantwort enthält aufnahmeseitige Verzerrungen, die durch den verwendeten Lautsprecher und die im Kunstkopf befindlichen Miniaturmikrophone verursacht

sind. Insbesondere durch die Verwendung des Lautsprechers weicht die Schallquellencharakteristik des reproduzierten Signals von den Gegebenheiten einer natürlichen Schallquelle ab. Wiedergabeseitig treten zusätzlich Verzerrungen durch den verwendeten Kopfhörer auf.

Neben o.a. Einflußfaktoren tritt speziell bei den in dieser Arbeit verwendeten Impulsantworten ein weiterer Effekt auf. Bei genauer Betrachtung des Amplitudenganges in Abbildung 6.13 fällt die Einkerbung bei $f \approx 9$ kHz auf, die auf eine *Ohrkanalresonanz* des Kunstkopfes zurückzuführen ist. Werden die Daten ohne weitere Verarbeitung zur binauralen Simulation verwendet, kann abhängig von den physikalischen Gegebenheiten beim Hörer neben der eigenen Ohrkanalresonanz eine zweite Resonanz auftreten, die störend wirkt.

Theoretisch existieren mehrere Möglichkeiten zur Entzerrung bzw. Normalisierung der Impulsantwort. Ein gängiges Verfahren besteht darin, lineare Verzerrungen durch ein zugehöriges *inverses* System bzw. Filter zu kompensieren. Als Beispiel sei $G(z)$ die effektive Gesamtübertragungsfunktion einer Reihenschaltung, bestehend aus dem verzerrenden System mit der Übertragungsfunktion $H(z)$ und dem zugehörigen inversen System $H_i(z)$. Für $G(z)$ gilt:

$$\begin{aligned} G(z) &= H(z)\,H_i(z) = 1 \quad \text{wobei} \\ H_i(z) &= \frac{1}{H(z)} \end{aligned} \tag{6.8}$$

D.h. aus der Reihenschaltung mit dem inversen System ergibt sich die Identität, was einer idealen Entzerrung entspricht. Eine Voraussetzung zur Konstruktion inverser Filter ist die Verfügbarkeit der Impulsantwort des verzerrenden Systems (im konkreten Fall also die Lautsprecher-, Kopfhörer- und Mikrophonimpulsantwort). Das inverse System ist allerdings nur unter bestimmten Voraussetzungen realisierbar. Ein System besitzt genau dann ein stabiles, kausales inverses System, wenn die Forderung der *Minimalphasigkeit* erfüllt wird [OS99].

Am Beispiel der Übertragungsfunktion des Lautsprechers kann gezeigt werden, daß diese Forderung näherungsweise erfüllt wird. Abbildung 6.14 zeigt den Amplituden- und Phasengang des Lautsprechers sowohl im Original als auch in der minimalphasigen Realisierung. Ähnlich wie bei der HRIR (vgl. Abbildung 6.13) ist der Phasengang nahezu linear. Die Differenz beider Phasengänge entspricht dem Phasengang eines Allpasses (Glg. 6.7), der wiederum als reines Verzögerungsglied approximiert werden kann. Mittels Invertierung der minimalphasigen Realisierung können im Fall der Lautsprecherübertragungsfunktion aufnahmeseitige Verzerrungen, im Fall der Kopfhörerübertragungsfunktion wiedergabeseitige Verzerrungen kompensiert werden. Der Nachteil dieses Verfahrens ist der störende Verbleib einer invertierten Mikrophonübertragungsfunktion nach Durchführung der Normalisierung (vgl. Abschnitt 4.4.4). Diesen Nachteil umgehen u.a. Entzerrungsverfahren, die ein Referenzfeld zur Normalisierung verwenden.

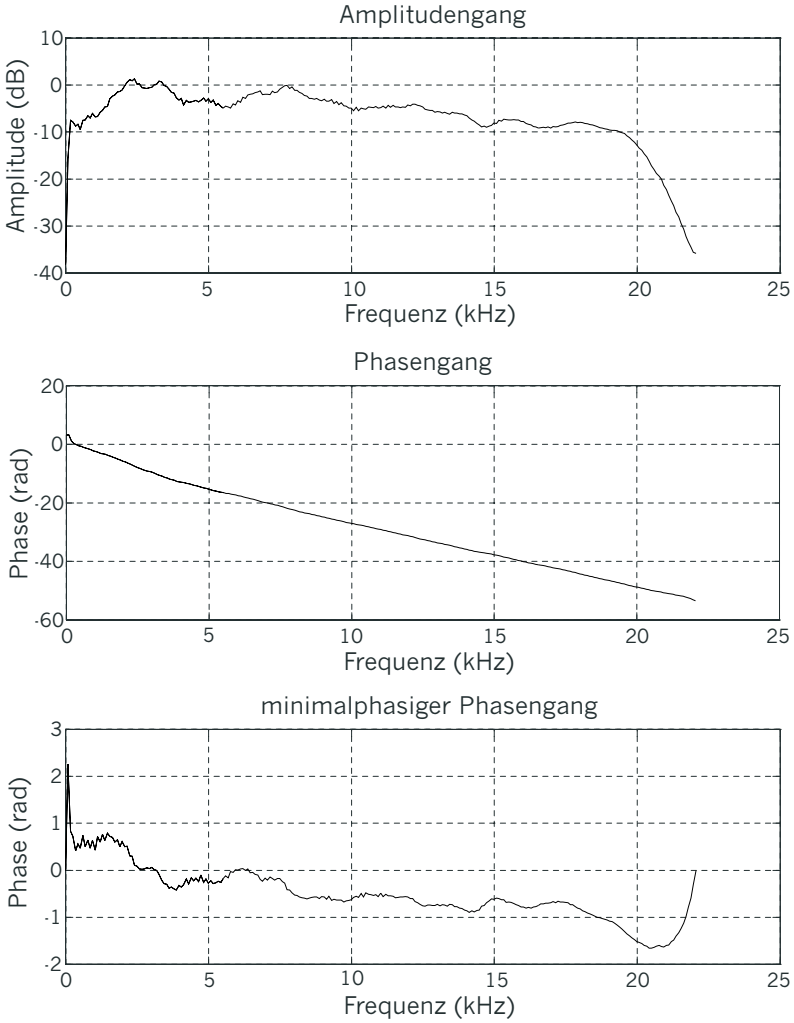


Abbildung 6.14: Übertragungsfunktion des verwendeten Lautsprechers (Typ: Optimus Pro 7), Phasengang im Original (mitte) und als minimalphasige Realisierung (unten)

Freifeld-Entzerrung

Der Ansatz der Freifeld-Entzerrung geht davon aus, daß man sich bei der Simulation eines räumlichen Höreindrucks vor allem für die Signalmerkmale interessiert, die mit der Richtung bzw. Position der Schallquelle variieren. Etwas anders ausgedrückt sind dies die spezifischen „Abweichungen" im Übertragungsverhalten zwischen unterschiedlichen Schallquellenpositionen. Formal wird ein Maß für diese „Abweichungen" gewonnen, wenn die HRTF einer beliebigen Richtung mit der HRTF einer bestimmten Schalleinfallsrichtung (Referenzrichtung bzw. -feld) normalisiert wird, die als Freifeld-Entzerrungsfunktion $H_{FF}(z)$ bezeichnet wird.

$$H_{FF}(z) = HRTF(z, \varphi, \delta) \tag{6.9}$$

Aufgrund der Symmetrie eignet sich als Referenzrichtung besonders der Frontaleinfall, d.h. der Schalleinfall einer vorne gelegenen Schallquelle ($\varphi = \delta = 0\,^\circ$). Schall aus dieser Richtung wird quasi verzerrungsfrei empfangen. Angewendet auf sämtliche HRTFs ergeben sich durch die Normalisierung folgende Vorteile:

- Kompensation aller richtungsunabhängigen (linearen) Verzerrungen
- Vermeidung doppelter Ohrkanalresonanzen
- Kompensation evtl. Asymmetrien in der Mikrophonpositionierung

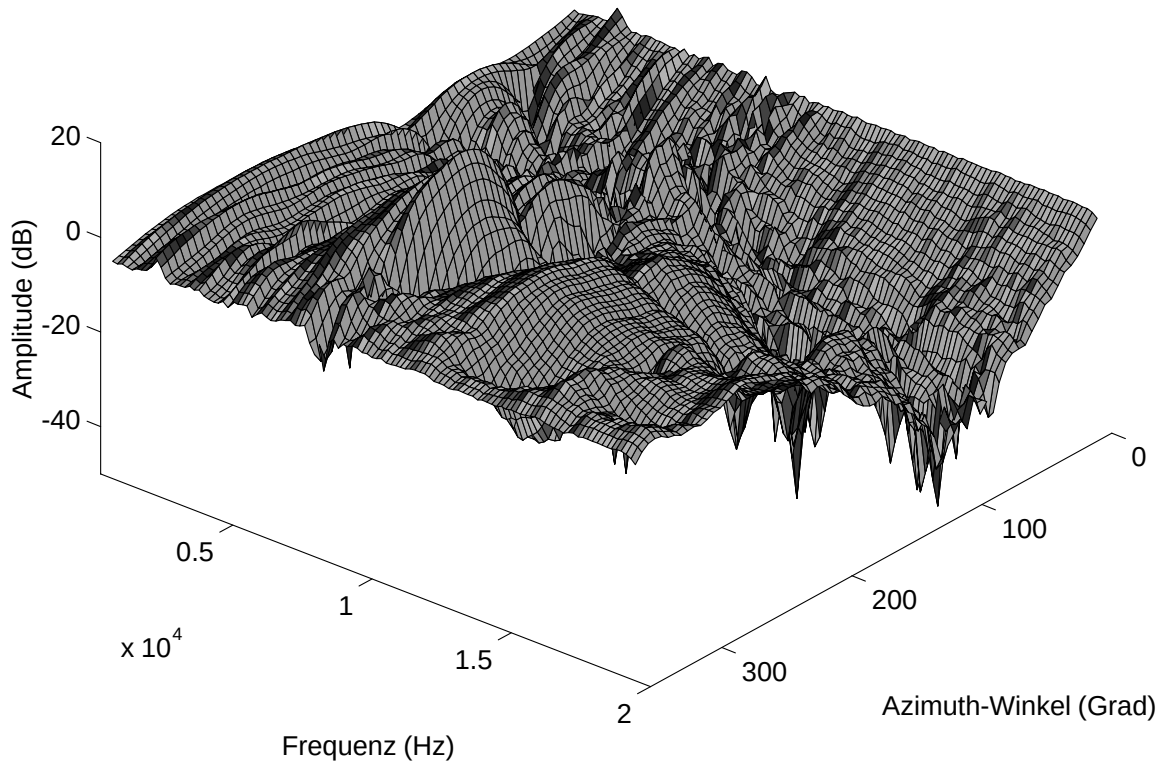


Abbildung 6.15: Amplitudengang der HRTF bei variabler Schallquellenposition entlang der Horizontalebene (0 ° Elevation), linkes Ohr, Daten nach erfolgter Freifeldentzerrung ($\varphi = \delta = 0\,^\circ$), Abtastfrequenz $f_a = 44.1$ kHz

Abbildung 6.15 zeigt den Amplitudengang der HRTFs bei variabler Schallquellenposition entlang der Horizontalebene. Bei Frontaleinfall (0 ° Azimuth) ist der Amplitudengang näherungsweise konstant. Im direkten Vergleich zu den Rohdaten in Abbildung 6.11 zeigt sich deutlich die durch die Normalisierung bedingte spektrale Glättung.

Diffusfeld-Entzerrung

Die Diffusfeld-Entzerrung ist eine Erweiterung der Freifeld-Entzerrung. Während die Freifeld-Entzerrung eine Schalleinfallsrichtung (Referenzrichtung) bevorzugt entzerrt,

wird dies durch die Diffusfeld-Entzerrung vermieden. Als Referenzfeld wird ein diffuses Schallfeld verwendet, das physikalisch dann auftritt, wenn Schall zufällig aus allen Richtungen einfällt. Bedingt durch die Schwierigkeiten in der Realisierung eines solchen Wellenfeldes kann als Näherung der Mittelwert aus allen HRTFs gebildet werden[12].

Prinzipiell kann der Durchschnitt sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich gebildet werden. Eine einfache Mittelung im Zeitbereich ist allerdings aufgrund der vom Azimuth-Winkel abhängigen Signallaufzeiten wenig sinnvoll. Gleiches gilt bedingt durch die variablen Phasenlaufzeiten für den Frequenzbereich. Geeignet ist daher lediglich ein gemitteltes Amplitudenspektrum. Der Amplitudengang der Diffusfeld-Übertragungsfunktion $H_{DF}(z)$ bestimmt sich dann aus der gemittelten Summe der Leistungsspektren über alle Schalleinfallsrichtungen:

$$|H_{DF}(z)|^2 = \frac{1}{NM} \sum_{i=0}^{N} \sum_{k=0}^{M} |HRTF(z, \varphi_i, \delta_k)|^2 \tag{6.10}$$

$H_{DF}(z)$ besitzt damit *keine* Phaseninformation. In der Realisierung werden sämtliche HRTFs durch ein minimalphasiges Filter mit dem Amplitudengang $1/|H_{DF}(z)|$ normalisiert. Dadurch wird ein flaches Spektrum bei diffuser Schalleinstrahlung erzielt.

Die Diffusfeld-Entzerrung verfügt über die gleichen Vorteile wie die Freifeld-Entzerrung. Ein zusätzlicher Vorteil ergibt sich aus der Kompatibilität des Entzerrungsverfahrens zu marktüblichen Kopfhörern, die vielfach ebenfalls diffusfeldentzerrt sind. In der binauralen Wiedergabe multipliziert sich die Übertragungsfunktion des Kopfhörers mit der diffusfeldentzerrten HRTF, was zum Entstehen eines natürlichen Klangbildes führt [G$^+$81, Spi88]. Ein Nachteil gegenüber der Freifeldentzerrung besteht darin, daß Phasenverzerrung in der HRTF (z.B. durch Asymmetrien der Mikrophonpositionierung) durch das Fehlen der Phaseninformation in der Diffusfeld-Übertragungsfunktion nicht kompensiert werden. In der Anwendung im Rahmen dieser Arbeit wirkt sich dieser Nachteil jedoch nicht aus, da die Kunstkopfmessung unter Annahme vollständiger Symmetrie jeweils nur mit einem Mikrophon erfolgte[13].

Abbildung 6.16 zeigt die spektrale Auswirkung der Entzerrung, die im Vergleich zu den Rohdaten (s.Abbildung 6.11) zu einer Glättung führt. Die Information im Spektrum wird dabei im wesentlichen auf richtungsabhängige Merkmale beschränkt.

Filterdesign

Zur Implementierung werden FIR-Filter mit zwei unterschiedlichen Längen verwendet. Im ersten Fall beträgt die Länge 11.6 ms (512 Samples bei $f_a = 44.1$ kHz), im zweiten Fall 5.6 ms (256 Samples bei $f_a = 44.1$ kHz). Die Filterlänge reicht aus, um die

[12] Voraussetzung: Gleichverteilung der Schallquellenpositionen, Abweichungen davon können durch zusätzliche Gewichtungsfaktoren korrigiert werden

[13] dadurch konnten Aufzeichnungen an unterschiedlichen Ohrmodellen in einer Messung erfolgen, nähere Informationen s. [GM95]

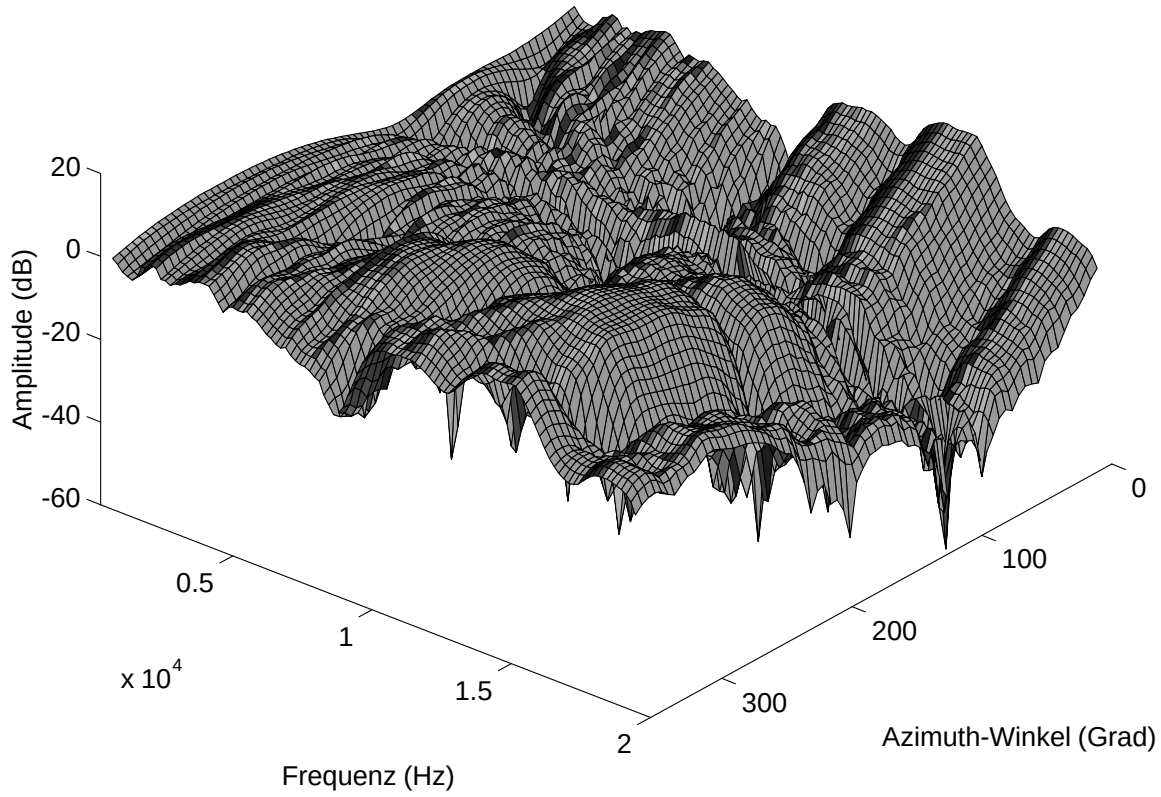


Abbildung 6.16: Amplitudengang der HRTF bei variabler Schallquellenposition entlang der Horizontalebene (0° Elevation), linkes Ohr, Daten nach erfolgter Diffusfeldentzerrung, Abtastfrequenz $f_a = 44.1$ kHz

interaurale Zeit- bzw. Phasenverschiebung zu erfassen, die bei extremer seitlicher Auslenkung (z.B. $\varphi = 90°$) etwa 0.7 ms (ca. 30 Samples) beträgt. Beim Abwägen zwischen der erforderlichen Rechenleistung einerseits und der Qualität der binauralen Simulation andererseits wurde der Schwerpunkt auf die Qualtität der Simulation gerichtet. Da keine Echtzeitverarbeitung erforderlich ist, wurden keine weiteren Maßnahmen zur Approximation der HRTF unternommen. Die Realisierung erfolgt in direkter Form im Zeitbereich durch zeitdiskrete Faltung (s. Abbildung 6.9). Ein wesentlicher Vorteil der FIR-Implementierung im Gegensatz zu rekursiven IIR-Filtern (infinite-impulse-response) ergibt sich durch die grundsätzlich vorhandene Stabilität.

Kapitel 7

Systemmodul „Wortabruf"

Im folgenden Abschnitt wird das Modul „Wortabruf" des Systems *Comp*X vorgestellt. Das Modul dient der Behandlung von Störungen des Wortabrufs bzw. der Wortfindung, die ein häufiges Symptom von Patienten mit erworbenen Sprachstörungen (Aphasien) sind. Nach einer Beschreibung der Problemstellung und des experimentellen Ansatzes, der auf dem theoretischen Erklärungsmodell der Wortproduktion (vgl. Abschnitt 3.5.3) beruht, wird der Aufbau und die Gestaltung des Moduls erläutert. Im Anschluß daran werden klinische Einsatzmöglichkeiten des Moduls aufgezeigt.

7.1 Problemstellung und Lösungsansatz

Ziel der Behandlung aphasischer Patienten ist es, die sprachliche Kommunikationsfähigkeit zu reaktivieren [Poe89]. Dabei wird versucht, dem Patienten die funktionale Beziehung zwischen den sprachlichen Einheiten (Laute, Wörter, Sätze) wieder verfügbar zu machen. Eine Grundvoraussetzung ist, daß Wörter vom Patienten erzeugt und verstanden werden, weshalb die Diagnose und Therapie von Wortabrufstörungen vielfach im Mittelpunkt sprachtherapeutischer Interventionen steht (vgl. Abschnitt 3.5.5). Eine Wortabrufstörung bedeutet für den Patienten, daß die Benennung von Gegenständen des täglichen Lebens nicht oder nur teilweise gelingt. Oftmals treten zusätzliche Fehler wie Wortentstellungen oder -neubildungen auf, die nicht Bestandteil der Sprache sind.

Aus neuropsychologischer Sicht wird die Beeinträchtigung mit einer gestörten lexikalischen Verarbeitung von Sprache auf der Wortebene erklärt. Die Ursache kann einerseits ein fehlerhafter Zugriffsmechanismus auf Inhalte des sprachlichen Lexikons (Wortschatz) sein, andererseits ein Verlust sprachlicher Einträge (vgl. Abschnitt 3.5.4). Die Entwicklung theoretischer Modelle zur Beschreibung von Wortproduktionsprozessen ist Gegenstand der Psycholinguistik. Viele dieser Modelle unterscheiden zwischen *semantischen* und *phonologischen* Prozessen (2-Stufen-Modelle vgl. Abschnitt 3.5.3). Diese Trennung wird von vielen Therapieansätzen aufgegriffen, die versuchen, in Benennexperimenten das Benennen von Objekten (z.B. abbildbare Gegenstände) durch

semantische[1] und phonologische[2] Hilfen zu bahnen. In der Literatur liegen Ergebnisse durch Einzelfallstudien und wenige Gruppenstudien über den bahnenden Effekt einzelner Übungen vor (zusammenfassend in [NB96]). Insgesamt besteht allerdings eine große Vielfalt in der Art der durchgeführten Therapie. Unterschiede bestehen vor allem hinsichtlich folgender Parameter:

- Aufgaben mit und ohne Produktion des gesuchten Wortes
- Modalität der Hilfestellungen (bildhaft, akustisch, schriftsprachlich)
- Dauer und Intensität der Therapie

Die Folge ist eine eingeschränkte Vergleichbarkeit der Behandlungsergebnisse, wodurch Rückschlüsse, die der Entwicklung verbesserter therapeutischer Strategien dienen, erschwert werden.

In der Gesamtbetrachtung fällt ein Ungleichgewicht zugunsten der Verwendung semantischer Hilfen auf. Der semantische Ansatz ist daher wesentlich weiter entwickelt. Demgegenüber beschränken sich phonologische Hilfen fast ausschließlich auf Anlauthilfen, bei denen die Anfangsphoneme des gesuchten Wortes - meist ohne technische Hilfe - durch den Therapeuten erzeugt werden. Diese Methode erlaubt aufgrund ihres subjektiven Charakters (Abhängigkeit vom Untersuchungspersonal) nur bedingt vergleichende Aussagen über die therapeutische Wirksamkeit.

Aus den beiden dargestellten Problembereichen leiten sich folgende forschungsleitende Zielvorstellungen für die Entwicklung des Moduls „Wortabruf" ab:

1. Unterstützung systematischer Untersuchungsansätze (diagnostisch und therapeutisch)
2. Erweiterung phonologischer Behandlungsverfahren

Systematische Untersuchungen versuchen, die Wirksamkeit eingesetzter Behandlungstechniken zu überprüfen. Eine Möglichkeit besteht darin, die experimentelle Aufgabe zu modularisieren, d.h. in einzelne Behandlungsabschnitte zu zerlegen und deren Wirksamkeit isoliert zu ermitteln. Dieser Ansatz wurde bei der Entwicklung des Moduls verfolgt. Durch die Kontrolle zahlreicher experimenteller Parameter und eine flexible Anpassung der Aufgabenstruktur können einzelne semantische und phonologische Behandlungsverfahren gezielt überprüft werden. Eine Besonderheit des Moduls liegt in der Weiterentwicklung phonologischer Verfahren. Technisch werden hierzu Instrumente benötigt, die einen flexiblen Umgang mit akustischen Signalen (Sprachmaterial) ermöglichen. Für diesen Zweck eignen sich besonders Methoden der digitalen Signalverarbeitung, durch die phonologische Information gezielt und quantitativ erfaßbar verändert werden kann. In das Modul „Wortverarbeitung" wurden Komponenten der Audiosignalverarbeitung integriert, durch die sowohl bestehende (z.B. Anlauthilfe) als auch weiterführende Verfahren realisierbar sind.

[1] Hilfen, die sich an der *Bedeutung* des Wortes orientieren
[2] Hilfen, die sich an der (lautsprachlichen) *Wortform* orientieren

7.1.1 Zielsetzung des Moduls

Mit dem Modul „Wortabruf" wird ein unter klinischen Bedingungen einsetzbares System zur experimentellen Untersuchung aphasisch bedingter Benennstörungen entwickelt. Die Konzeption berücksichtigt sowohl diagnostische als auch therapeutische Ziele. Therapeutische Anwendungen stehen jedoch im Zentrum des Entwicklungsansatzes und profitieren stärker von den strukturellen Merkmalen (siehe Abschnitt 7.2). Es werden folgende Ziele verfolgt:

- Systematische Erfassung von Therapieeffekten
- Förderung individueller Therapiestrategien
- Weiterentwicklung phonologischer Behandlungsverfahren

Obwohl Störungen der Wortproduktion ein gemeinsames Merkmal nahezu jeder aphasischen Erkrankung sind, bestehen zwischen einzelnen Patienten deutliche Unterschiede in der Art und Ausprägung der Störung[Fri84, SHW99]. Die systematische Gegenüberstellung unterschiedlicher Behandlungsverfahren (semantisch vs.phonologisch) soll zur Aufklärung der Frage beitragen, ob aphasische Patienten anhand ihrer Störungsmuster eindeutig Gruppen zugeordnet werden können, die von einzelnen Therapieansätzen besonders profitieren. Dadurch wird die Entwicklung individueller Therapiestrategien gefördert. Therapieeffekte sollen quantitativ erfaßt werden und in Verlaufsuntersuchungen auf ihre zeitliche Stabilität (langandauernde vs. kurzzeitige Leistungsverbesserungen) überprüft werden. Darüber hinaus soll beobachtet werden, ob sich die erzielten Verbesserungen auf das trainierte Wortmaterial beschränken oder auch nicht trainierte Wörter erfaßt werden (Transfereffekte der Therapie). Dadurch werden Verbesserungen auch außerhalb der Therapie erwartet[3]. Zu diesem Zweck werden einerseits bekannte Behandlungsverfahren aufgegriffen, die für systematische Untersuchungen modularisiert werden. Andererseits soll durch die Weiterentwicklung phonologischer Verfahren eine Ergänzung bestehender Behandlungsverfahren erzielt werden.

7.1.2 Voraussetzungen

Der experimentelle Entwicklungsansatz beruht auf folgenden Annahmen:

- Wörter sind im Gehirn auf mindestens zwei Ebenen repräsentiert[4]
- Wortproduktion beinhaltet die Aktivierung mehrerer Teilprozesse
- Bei Störung nur eines Teilprozesses kann der Gesamtprozeß des Wortabrufs blockiert sein

[3] z.B. in der Spontansprache
[4] z.B. [LRM98, Gar82, Car97]

Ein plausibles Beispiel für die mehrfache lexikalische Repräsentation ist der Gebrauch mehrdeutiger Wörter (Homonyme), die Bestandteil nahezu jeder Sprache sind. Diese Wörter sind phonologisch und orthographisch identisch, besitzen abhängig vom Kontext aber unterschiedliche Bedeutung (Semantik) (z.B. Wirtschaft als Gasthaus/Industriezweig oder Gericht als Mahlzeit/juristische Institution). Daraus folgt, daß neben phonologischen Verarbeitungsprozessen (Abruf/Aktivierung des phonologischen Eintrags) auch die Aktivierung semantischer Prozesse erforderlich ist, die auf einer getrennten (evtl. unabhängigen) Verarbeitungsebene stattfinden.

Die Sprachproduktion eines Wortes ist demnach geteilt und beinhaltet mehrere Teilprozesse, die sequentiell aktiviert werden. Hinweise auf eine *zeitliche Trennung* semantischer und phonologischer Verarbeitung liefern psycholinguistische Experimente zur Einzelwortverarbeitung [SML90, LSV+91]. Danach finden semantische Prozesse *vor* phonologischen Prozessen statt.

Bei einer Wortabrufstörungen kann der Gesamtprozeß des Wortabrufs blockiert sein, wenn nur *ein* Teilprozeß gestört ist, obwohl die Ergebnisse anderer Prozesse verfügbar sein können. Diese Erklärung wird gestützt durch Beobachtungen an sprachgesunden Versuchspersonen, bei denen das Phänomen „ein Wort liegt auf der Zunge" (tip-of-the-tongue) experimentell untersucht wurde (erstmalig in [BM66]). Obwohl das gesuchte Wort nicht erzeugt werden konnte, war es den Probanden möglich, die Bedeutung (semantische Teilinformation), das Geschlecht (grammatische Teilinformation) oder die Anzahl der Silben anzugeben. Nicht verfügbar war die phonologische Teilinformation z.B. des Anlautphonems. Diese Beobachtung ist ein Beispiel für isoliert aktivierbare Teilinformation bei blockiertem Wortabruf.

7.1.3 Experimenteller Ansatz

Das Modul „Wortabruf" verwendet als experimentelle Aufgabe die Objektbenennung. Dabei wird der Proband aufgefordert, ein präsentiertes Objekt (Zielstimulus) mit einem passenden Wort (Zielwort) zu benennen. Die Objektbenennung ist eine Sprachproduktionsaufgabe, die mit der Verwendung der Sprache im Alltag viele Stufen des Wortabrufs teilt. In Erweiterung zu bestehenden Experimenten, die sich meist auf die Benennung von bildhaft dargestellten Objekten beschränken, können im Modul „Wortabruf" folgende Reize verwendet werden:

- Bilder
- geschriebene Worte oder Sätze
- akustische Signale (z.B. Umweltgeräusche)

Ein erstes Ziel des Experiments besteht darin, herauszufinden bei welcher Art von Wörtern Schwierigkeiten auftreten und welche Fehler bei der Benennung auftreten. Im ersten Schritt werden hierzu die Zielstimuli nach linguistischen Kriterien strukturiert.

Im zweiten Schritt erfolgt in *diagnostischen* Sitzungen eine sprachsystematische Berwertung der Patientenäußerung durch den Untersucher, der das Experiment begleitet. Dadurch werden differenzierte Aussagen über intakte bzw. gestörte Verarbeitungsprozesse beim Patienten gewonnen.

Ein zweites Ziel besteht in der Behandlung der Wortabrufstörung. Bei nicht erfolgreichen Benennversuchen erhält der Patient Hilfestellungen durch das System. Im einfachsten Fall wird das gesuchte Wort mittels Audiowiedergabe durch das System „vorgesprochen". Wirksamer und gezielter sind jedoch Verfahren, die versuchen, genau jene Teilinformation anzubieten, deren Fehlen den Patienten an der Produktion des Wortes hindert. Diese Teilinformation wird durch Hilfen bereitgestellt, die zusätzliche semantische oder phonologische Teilinformation des gesuchten Wortes enthalten. Dadurch soll der Wortabruf beim Patienten gebahnt werden. Semantische und phonologische Hilfen können auf unterschiedliche Art angeboten werden (z.B. semantisch verwandtes Bild, schriftliche Beschreibung von Eigenschaften oder Anlauthilfe). Technisch erfordert dieser Ansatz, daß Hilfsreize ebenso wie Zielreize in mehreren Modalitäten implementiert werden müssen (akustisch, bildhaft, schriftsprachlich). Neben der Art der Teilinformation (semantisch/phonologisch) ist die benötigte Informationsmenge eine weitere kritische Variable. Zu diesem Zweck wird eine spezielle Therapietechnik angewandt („Cueing-Technik" s. nachfolgender Abschnitt), durch die das Informationsangebot in den Hilfen systematisch abgestuft werden kann. Dadurch kann bestimmt werden, welche Hilfen individuell beim Patienten den größten Effekt erzielen.

Cueing-Technik

Die Idee der Cueing-Technik bei Wortabrufstörungen besteht darin, zur Erleichterung des Wortabrufs eine *Teilinformation* des gesuchten Wortes als Hinweisreiz („Cue") anzubieten. Aufgrund der Annahme eines blockierten Wortabrufs, wenn nur *eine* Teilinformation nicht oder nicht zum richtigen Zeitpunkt verfügbar ist (vgl. Abschnitt 7.1.2), kann versucht werden, dem Probanden genau die fehlende Teilinformation in Form eines Hinweisreizes anzubieten. Da i.allg. nicht bekannt ist, welche Art von Teilinformation fehlt, werden sowohl semantische als auch phonologische Hinweisreize verwendet. Eine weitere Unbekannte ist die fehlende Informationsmenge. Hinweisreize werden deshalb nach dem Prinzip der Informationsanreicherung systematisch abgestuft (vgl. Abb. 7.1).

Im Experiment wird mit dem Hinweisreiz begonnen, der den geringsten Informationsgehalt besitzt (H_1). Durch schrittweises Anbieten weiterer Hinweisreize wird die angebotene Informationsmenge erhöht und es kann der Punkt bestimmt werden, an dem der Wortabruf gelingt. Es ist dann davon auszugehen, daß alle benötigten Teilinformationen verfügbar sind. Umgekehrt kann ermittelt werden, welche Teilinformation bis zu diesem Punkt gefehlt hat. Im Zusammenhang mit theoretischen Wortverarbeitungsmodellen (s. Abschnitt 3.5.3) kann dadurch analysiert werden, auf welcher Verarbeitungsstufe die Schwierigkeiten beim Wortabruf lokalisiert sind. Neben der therapeutischen Zielsetzung wird folglich die theoretische Diskussion mit bestehenden Modellvorstellungen angeregt.

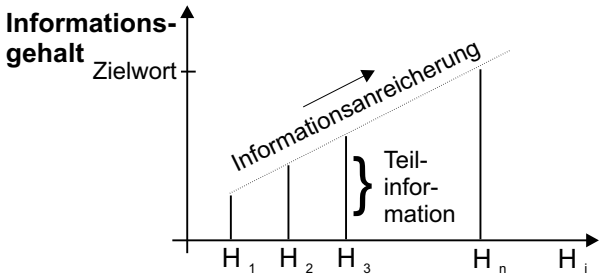


Abbildung 7.1: Abstufung der Hinweisreize („Cues") H_i nach dem Prinzip der Informationsanreicherung

Ein kritisches Problem liegt in der praktischen Anwendung der Cueing-Technik. Die Hinweisreize müssen systematisch abgestuft werden, was im Einzelfall, besonders bei phonologischen Hilfen, mit den bislang klinisch verfügbaren technischen Werkzeugen nicht oder nur sehr zeitaufwendig zu realisieren ist. Speziell für diesen Zweck wurden im Modul „Wortabruf" Komponenten der digitalen Audiosignalverarbeitung implementiert, die eine flexible Herstellung phonologischer Hinweisreize mit abgestuftem Informationsgehalt ermöglichen.

7.2 Aufbau und Gestaltung

Der folgende Abschnitt erläutert die Realisierung des Wortabrufmoduls. Zum Überblick erfolgt in Abschnitt 7.2.1 zunächst eine Darstellung der experimentellen und systemtechnischen Struktur. Daran anknüpfend werden anhand des Untersuchungsablaufs Implementierungsbeispiele aus den Bereichen Experimentkonfiguration, -durchführung und -auswertung vorgestellt, wodurch die systemseitige Unterstützung der experimentellen Vorgehensweise demonstriert wird.

7.2.1 Struktur des Moduls

Experimentelle Struktur

Abbildung 7.2 zeigt die Struktur des Wortabrufexperiments. Der experimentelle Ablauf ist in Phasen unterteilt, die im folgenden erläutert werden. Die Aufgabe beginnt in *Phase 1* mit der Präsentation des Zielstimulus (Objekt), der alternativ ein bildhafter, akustischer oder schriftsprachlicher Reiz sein kann. In der *Phase 2* wird der Proband aufgefordert, das Objekt zu benennen. Die Probandenäußerung wird anschließend durch den Therapeuten nach sprachsystematischen Kriterien (Initialbewertung) bewertet (*Phase 3*). Hierzu wurde ein Bewertungsmuster entwickelt, mit dem auftretende Benennfehler einheitlich kategorisiert werden können (vgl. Abbildung 7.18). Die Bewertung wird als Antwortparameter vom System aufgezeichnet. Die Analyse der

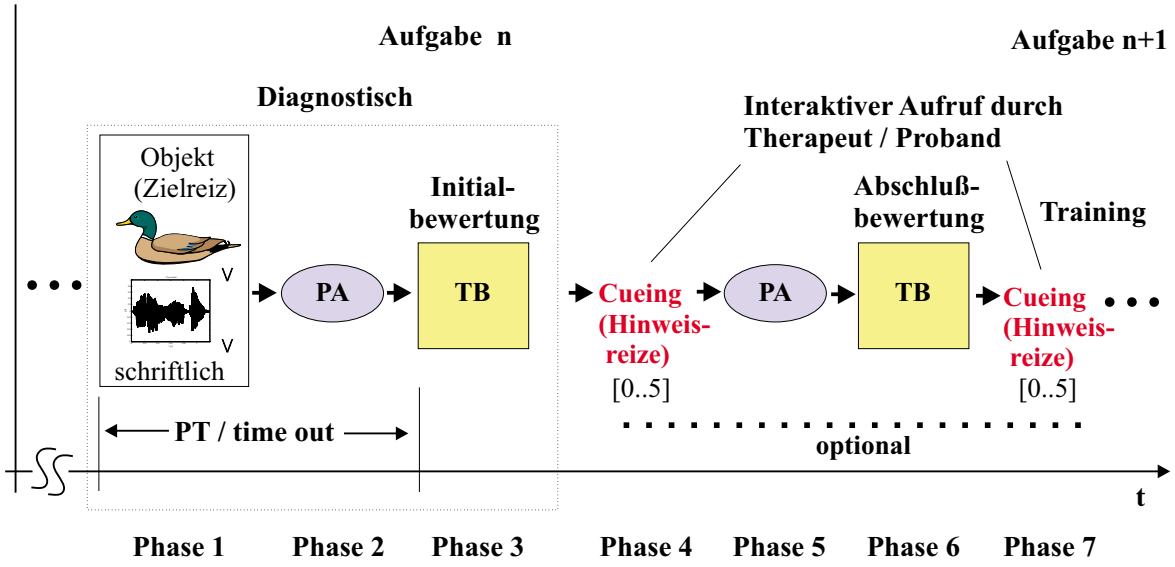


Abbildung 7.2: Struktur des Wortabrufexperiments (Aufgabe Objektbenennung), zeitlich geordnete Abfolge von Phasen
PA: Antwort des Patienten (Patientenäußerung)
TB: sprachsystematische Bewertung (Fehlerklassifikation) durch den Therapeuten
PT: Bearbeitungszeit („processing time")
time out: obere Schranke der Bearbeitungszeit

Benennfehler gibt Aufschluß über die Art und Ausprägung der Wortabrufstörung. Optional wird die Bearbeitungszeit (PT) der Benennung (Phase 1 bis Phase 3) bestimmt und aufgezeichnet (Auflösung in ms). Dadurch wird festgestellt, ob die Störung zeitliche Aspekte der Wortproduktion beeinflußt. Speziell in diagnostischen Untersuchungen ist es sinnvoll, die Bearbeitungszeit für die Benennung zu begrenzen. Deshalb kann im System eine obere Schranke (time out, ms) vorgegeben werden[5]. Eine *diagnostische* Sitzung umfaßt i.d.R. die Phasen 1 bis 3. In der *therapeutischen* Behandlung erhält der Proband im Falle eines gescheiterten Benennversuchs in der Phase 4 („Cueing") Hilfestellungen durch das System nach folgenden Prinzipien:

- Angebot zusätzlicher Bearbeitungszeit
- Angebot von Hinweisreizen („Cues") (bildhaft, akustisch, schriftsprachlich)

Die Verlängerung der Bearbeitungszeit berücksichtigt, daß durch die Wortabrufstörung der gesamte Sprachproduktionsprozeß verlangsamt sein kann. Experimentelle Untersuchungen bestätigen die Wirksamkeit dieses Verfahrens (z.B. [HPF+85a, NB96]). Alternativ dazu werden dem Patienten Hinweisreize angeboten, die diskret abgestufte Teilinformation des gesuchten Worts enthalten. Diese wurden in der Vorbereitung des Experiments erstellt und können wie der Zielstimulus unterschiedliche Ausführungsart

[5] dadurch wird gleichzeitig die Präsentationsdauer des Zielstimulus zeitlich begrenzt

bzw. Modalität (bildhaft, akustisch oder schriftsprachlich) besitzen. Die Aktivierung der Hinweisreize erfolgt entweder durch den Therapeuten, das System oder interaktiv durch den Patienten selbst. Letztere Alternative ist besonders für Trainingssitzungen geeignet und fördert den Probanden in der Suche nach Strategien zur Überwindung seiner Wortproduktionsprobleme.

Die anschließenden *Phasen 5 und 6* sind identisch mit den Phasen 2 und 3. Durch eine zweite Bewertung der Probandenäußerung in *Phase 6* (Abschlußbewertung) soll die spezifische Wirkung der Hilfestellung überprüft werden. Optional folgt eine Trainingsphase (*Phase 7*), in der sämtliche Hinweisreize wiederholt präsentiert werden können. Der Proband kann so den Umgang mit den Hinweisreizen üben.

Die dargestellte Experimentstruktur bietet damit zwei Freiheitsgraden für eine flexible Gestaltung der Objektbennungsaufgabe:

- Strukturelle Variabilität
- Inhaltliche Variabilität der Reize

Die *strukturelle Variabilität* beschreibt die Anpassung der Aufgabenkomplexität an den Untersuchungszweck (Diagnose/Therapie). Dadurch kann die Wirksamkeit einzelner Behandlungsphasen isoliert untersucht werden. Die *inhaltliche Variabilität* beschreibt die Möglichkeit, Reize in beliebiger Ausführungsart (bildhaft, akustisch, schriftsprachlich) einzusetzen.

Systemtechnische Struktur

Aus systemtechnischer Sicht ist das Benennexperiment in die logischen Komponenten KONFIGURATION, DURCHFÜHRUNG und AUSWERTUNG unterteilt (s. Abbildung 7.3).

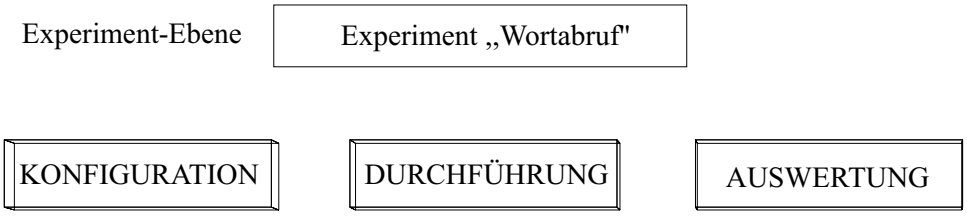


Abbildung 7.3: Logische Komponenten des Wortabrufexperiments

In der KONFIGURATION findet die Vorbereitung der experimentellen Untersuchung statt, die im wesentlichen folgende Aktivitäten umfaßt:

- Erstellung von Aufgaben
- Herstellung/Aufbereitung von Hinweisreizen

- Einstellung aufgabenübergreifender Parameter

Ein Benennexperiment besteht aus einer Folge von Aufgaben, die durch den jeweiligen Zielstimulus und die verwendeten Hinweisreize charakterisiert sind. In der KONFIGURATION werden die Aufgaben durch die Definition der Reize erstellt. Dabei werden digitale Stimulusressourcen (Audio-, Bilddateien, Zeichenfolgen) ausgewählt bzw. eingegeben und in der Systemdatenbank gespeichert. Der Zugriff auf integrierte Komponenten der Audiosignalverarbeitung ermöglicht die gezielte Veränderung akustischer Signale (z.B. das Sprachsignal des Zielwortes), wodurch phonologische Hinweisreize hergestellt und abgestuft werden können (s. Abschnitt 7.1.3). Neben diesen aufgabenspezifischen Parametern beinhaltet die KONFIGURATION die Festlegung aufgabenübergreifender Parameter, die das gesamte Experiment betreffen (z.B. Festlegung der experimentellen Struktur, Bearbeitungszeitparameter, etc.).

In der DURCHFÜHRUNG werden die Konfigurationsdaten mit spezifischen Durchführungsdaten verknüpft (z.B. Angaben zum Patienten bzw. Therapeuten). Eine implementierte Experimentsteuerung ermöglicht dem Anwender, den experimentellen Ablauf zu kontrollieren. Während der Durchführung eines Experiments werden Antwortdaten des Probanden durch das System aufgezeichnet und in der Systemdatenbank gespeichert.

Zur Analyse und Ergebnisbeurteilung verfügt die AUSWERTUNG über eine graphische Datenaufbereitung. Alternativ können die Ergebnisdaten zur Weiterverarbeitung über eine Datenexport-Schnittstelle exportiert werden (binär oder ASCII-Format).

7.2.2 Untersuchungsablauf und Bedienung

Das Modul unterstützt eine strukturierte Vorgehensweise in der experimentellen Untersuchung, deren Ablauf in Abbildung 7.4 dargestellt ist. Unter der Voraussetzung,

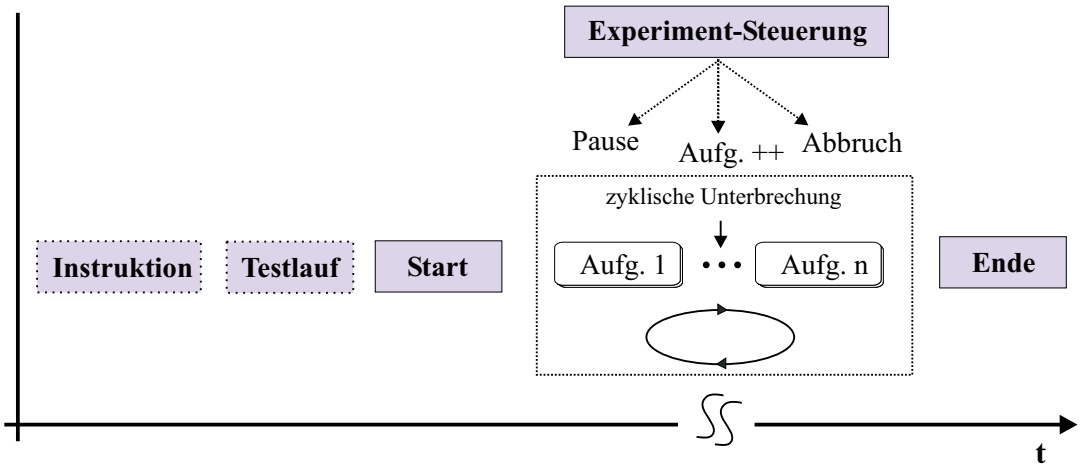


Abbildung 7.4: Untersuchungsablauf des Moduls „Wortabruf" in Teilschritten

daß das Experiment im Vorfeld konfiguriert wurde und typische Angaben zum Patienten (Name, Alter, Krankheitsbeschreibung, etc.) als Datensatz in der Systemdatenbank vorhanden sind, beginnt die Untersuchung optional mit einer *Instruktion*. Diese hat den Zweck, den Probanden mit der Aufgabenstellung vertraut zu machen und die nachfolgenden Schritte zu erklären. Obwohl im praktisch-klinischen Einsatz meist ergänzende Hinweise durch den Therapeuten erfolgen, trägt die Instruktion zur Vereinheitlichung der experimentellen Bedingungen bei (s. Abbildung 7.5).

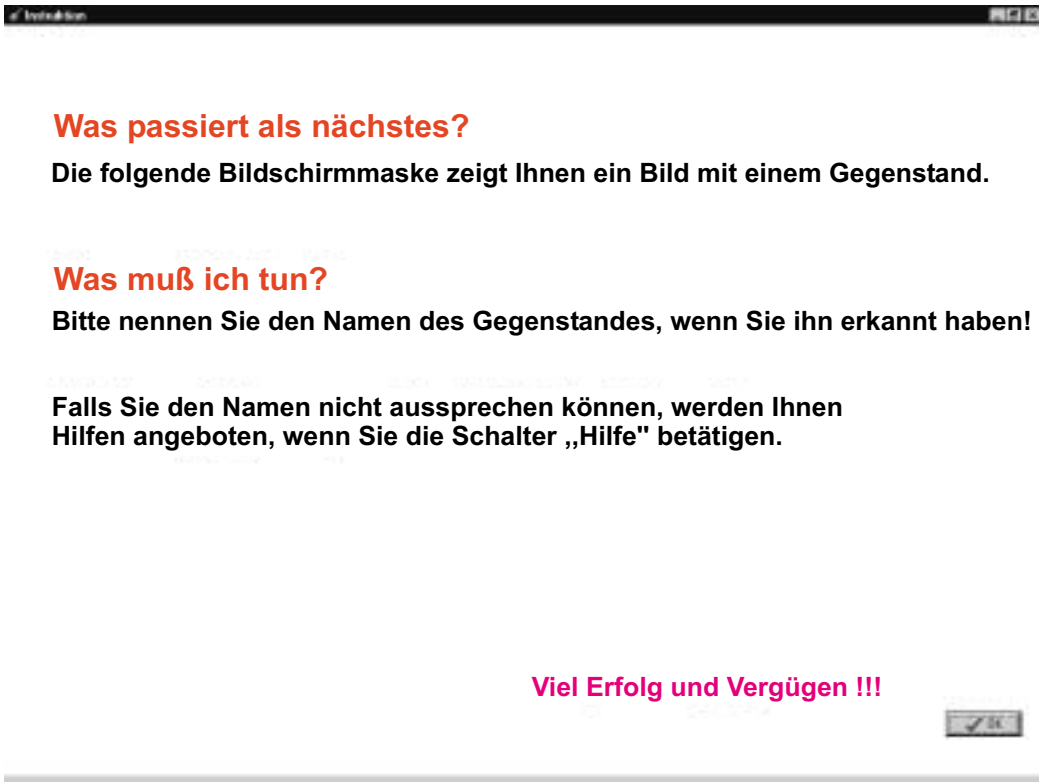


Abbildung 7.5: Instruktion (Beispiel einer Bildbenennungsaufgabe)

Im Anschluß daran kann ein *Testlauf* folgen. Dieser besteht aus konfigurierten Aufgaben, deren Auswahl und Reihenfolge Bestandteil der Durchführungsparameter ist (vgl. Abschnitt 7.2.4). Der Testlauf findet unter identischen Bedingungen wie die nachfolgende Untersuchung statt[6]. Für den Probanden wird damit eine Übungsmöglichkeit geschaffen.

Nach Abschluß des Testlaufs findet die Untersuchung statt (START), die aus der Präsentation der konfigurierten Aufgaben 1 bis n besteht. Die implementierte *Experiment-Steuerung* bietet dem Therapeuten die Möglichkeit zur Kontrolle des experimentellen Ablaufs. Abhängig von der Belastungssituation des Patienten kann das Experiment durch eine PAUSE unterbrochen oder durch einen ABBRUCH vorzeitig beendet werden. Vorbeugend können im Vorfeld der Untersuchung zyklische Unterbrechungen vor-

[6] Ausnahme: keine Antwortaufzeichnung

gesehen werden, die regelmäßig nach einer frei wählbaren Anzahl von Aufgaben durch das System eingefügt werden. Ferner ist ein Überspringen von Aufgaben möglich (AUFGABE ++). Während der Untersuchung werden durch das System relevante Antwortparameter (z.B. Benennfehler, Bearbeitungszeit) aufgezeichnet, die nach Abschluß des Experiments zur Auswertung bereitstehen.

7.2.3 Experimentkonfiguration

Die Konfiguration des Experiments umfaßt alle erforderlichen Schritte der Vorbereitung einer experimentellen Untersuchung. In der nachfolgenden Darstellung wird aus Gründen der Übersichtlichkeit zunächst die Struktur der Konfigurationskomponente erläutert. Anschließend wird deren Realisierung beispielhaft vorgestellt.

Struktur der Systemkomponente Konfiguration

Die Komponente KONFIGURATION dient der Erstellung und Modifikation von Experimenten. Systemseitig wird ein Experiment auf ein PROJEKT abgebildet[7], welches sämtliche benutzerdefinierte Konfigurationsparameter enthält. Die Parameter sind klassifiziert, wobei Einstellungen in vier Subkomponenten vorgenommen werden, die in Abbildung 7.6 dargestellt sind.

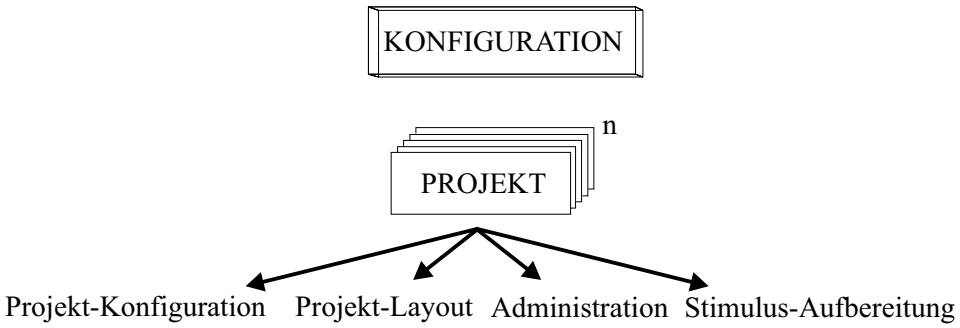


Abbildung 7.6: Struktur der Systemkomponente KONFIGURATION

Ein PROJEKT besteht aus einer Folge von Aufgaben, die durch die Abfolge der verwendeten Reize (Zielstimulus, der benannt werden soll und Hinweisreize als Hilfestellungen) definiert sind. Die Erstellung der Aufgaben findet in der Subkomponente *Projekt-Konfiguration* statt. Neben diesen aufgabenspezifischen Parametern werden Einstellungen vorgenommen, die den gesamten experimentellen Ablauf bestimmen (Wahl der Experimentstruktur vgl. Abb. 7.2, Messung der Bearbeitungszeit, etc.).

Im Mittelpunkt des experimentellen Ansatzes steht die Anwendung der „Cueing-Technik" (vgl. Abschnitt 7.1.3). Dabei wird die Benennung schrittweise durch Hinweisreize erleichtert, die abgestuft Teilinformation des Zielwortes bereitstellen. Die

[7] die Begriffe Experiment und PROJEKT werden im folgenden systembezogen synonym verwendet

Subkomponente *Stimulus-Aufbereitung* dient der Herstellung und Aufbereitung phonologischer (lautsprachlicher) Hinweisreize. Die hierzu erforderlichen Modifikationen am Sprachsignal des Zielwortes können mit Hilfe integrierter Komponenten der digitalen Audiosignalverarbeitung (Signaleditor, Filter- und Maskierungsmodul) realisiert werden.

Die Subkomponente *Projekt-Layout* dient der Bildschirmanpassung. Der Bildschirm besitzt einen elementartigen Aufbau. Einzelne Elemente können benutzerdefiniert ausgewählt werden. Dadurch kann die Patient-System Schnittstelle individuell an die Zielsetzung der Untersuchung angepaßt werden.

Die Subkomponente *Administration* verwaltet die Zugriffsrechte auf PROJEKT-Daten. Der Zugriff kann vor der Benutzung durch andere Anwender des Systems entweder geschützt (Zugriff beschränkt auf den Ersteller des PROJEKTS), an ausgewählte Anwender erteilt oder als „öffentlich" deklariert werden, was einer Freigabe an alle Anwender entspricht.

Realisierung der Systemkomponente Konfiguration

Die Konfiguration des Experiments beginnt entweder mit der Erstellung eines neuen PROJEKTS oder mit dem Öffnen eines bereits vorhandenen PROJEKTS. Bei der Neuerstellung erfolgt neben der Vergabe eines PROJEKT-Namens die Einstufung der PROJEKT-Daten (s.Abbildung 7.7). Die Deklaration „öffentlich" bewirkt, daß jeder Anwender des Systems auf die PROJEKT-Daten zugreifen kann. Zusätzlich wird optional eine Zugriffsprotokollierung angeboten (Log-Datei).

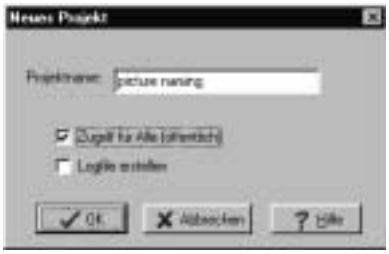


Abbildung 7.7: Anlegen eines neuen PROJEKTS

Projekt-Konfiguration

Der Anwender wird anschließend zur *Projekt-Konfiguration* geleitet, die in Abbildung 7.8 dargestellt ist. Wesentliche Aktivitäten dort sind:

- Erstellung und Sortierung von Aufgaben
- Stimulus-Aufbereitung
- Wahl aufgabenübergreifender Parameter (Experimentstruktur, Bearbeitungszeitmessung, etc.)

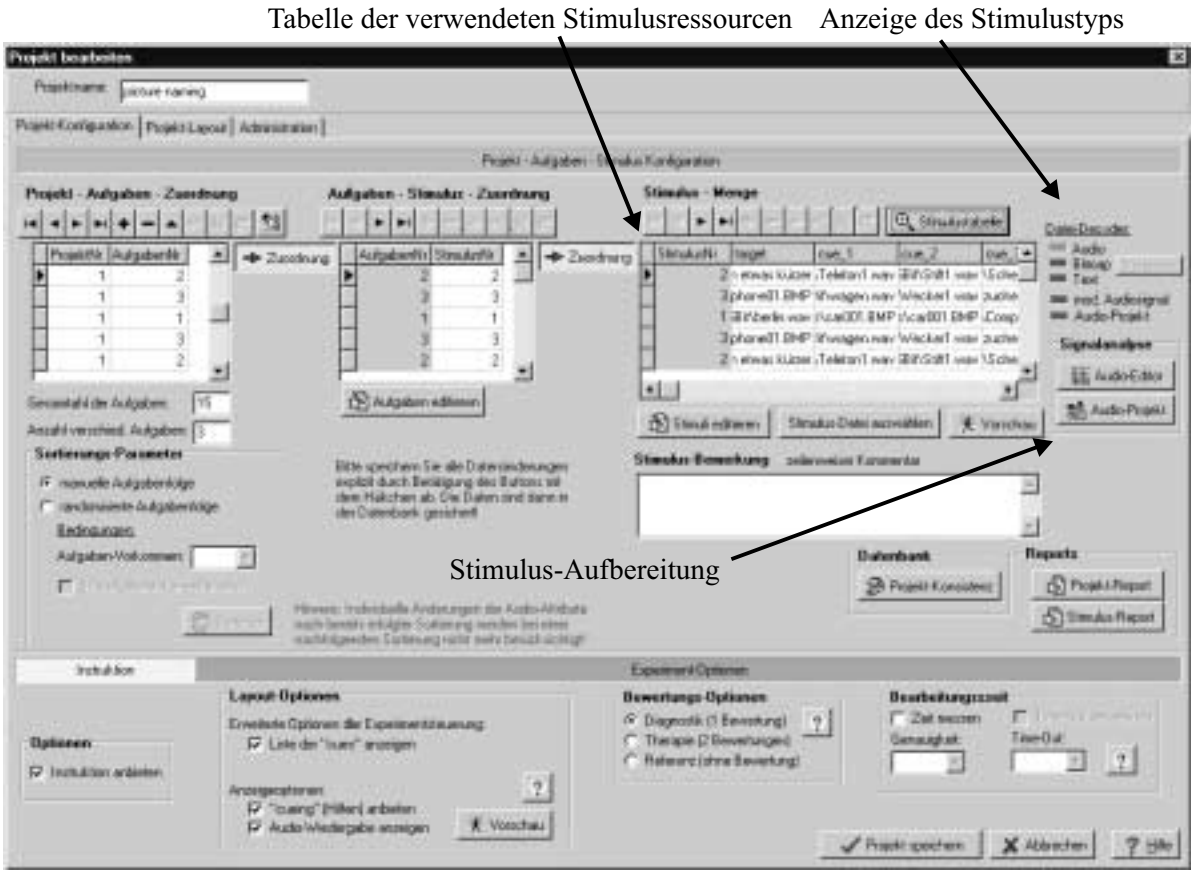


Abbildung 7.8: Realisierung der Projekt-Konfiguration

Die Erstellung von Einzelaufgaben erfolgt tabellarisch im Abschnitt PROJEKT-AUFGABEN-STIMULUS-KONFIGURATION. Jede Aufgabe wird durch einen Zeileneintrag in der Tabelle STIMULUS-MENGE repräsentiert, wobei jeder verwendete Reiz (Zielstimulus, Hinweisreize) in eine separate Spalte eingetragen wird. Zulässige Spalteneinträge sind:

- Dateiname und Pfadangaben einer digitalen Ressource[8]
- Text

Bildhafte und sprachliche Reize sind aus technischer Sicht digitale Ressourcen, deren Inhalt in Dateiform abgelegt ist. Die Verwendung einer Ressource in einer Aufgabe wird dem System mitgeteilt, indem der Dateiname mit Pfadangabe in die Spalte eingetragen wird. Die Ressource selbst kann sich entweder auf der lokalen Festplatte, auf CD oder entfernt auf dem File-Server eines lokalen Netzes befinden. Bedeutsam ist, daß die binären Daten der Datei selbst *nicht* in das System kopiert werden sondern lediglich die Ortsangabe als Referenz in Form eines Strings aufgenommen wird, was

[8]Bild-, Audio- oder Audioprojektdatei s. Erläuterungen im Text

den Datenumfang des Systems erheblich reduziert. Dateiname und Pfadangabe können abhängig vom Ort der Ressource eine lange Zeichenkette darstellen, die vom Anwender exakt eingegeben werden muß. Zur Entlastung wird eine Dialogunterstützung angeboten (s. Abbildung 7.9), die durch Doppelklick auf ein Feld der Tabelle oder durch Druck auf den Button „STIMULUS-DATEI auswählen" aufgerufen wird.

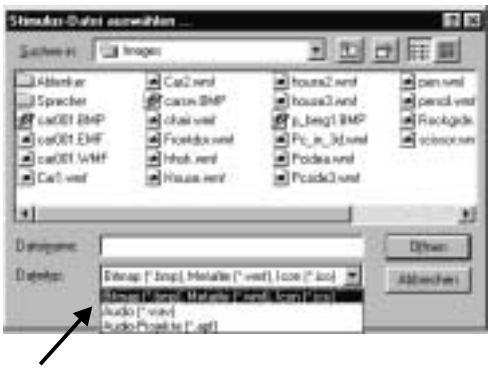


Abbildung 7.9: Dialogunterstützung zur Auswahl von Stimulus-Ressourcen

Dateifilter für Bilder und akustische Ressourcen unterstützen die Auswahl einer Datei, die als Reiz verwendet werden soll. Nach Bestätigung der Auswahl erfolgt automatisch ein Eintrag in das entsprechende Feld. Neben diesen beschriebenen Ressourcen können schriftsprachliche Reize verwendet werden, deren Eingabe zeichenweise als Text im vorgesehenen Feld einer Spalte erfolgt.

Die Aufgabenerstellung erfordert vom Anwender kreatives und planerisches Vorgehen (Auswahl geeigneter Zielstimuli, Erstellung passend abgestufter Hinweisreize). Die oftmals inkrementelle Vorgehensweise wird systemseitig durch die Möglichkeit zur VORSCHAU unterstützt, die sowohl für einzelne Stimuli (Bilder, Texte, akustische Signale) als auch für komplette Aufgaben möglich ist. Auf diese Weise können Aufgaben mit flexibler Reizzusammensetzungen erstellt werden, die in der Tabelle PROJEKT-AUFAGEBEN-ZUORDNUNG dem aktuellen Projekt zugeordnet werden. Zur Vermeidung von Wiederholungseffekten durch eine wiederkehrende Aufgabenreihenfolge ermöglicht die Gruppenbox SORTIERUNGS-PARAMETER die Generierung einer zufälligen Aufgabenfolge. Gleichzeitig kann vorgegeben werden, wie oft eine Aufgabe auftreten soll (Aufgabenhäufigkeit) und der Algorithmus kann aufgefordert werden, die Nachbarschaft zweier identischer Aufgaben zu verhindern.

In der Gruppen-Box BERWERTUNGS-OPTIONEN kann die Experimentstruktur an diagnostische oder therapeutische Fragstellungen angepaßt werden (vgl. Abbildung 7.2). Parameter zur Messung bzw. Vorgabe der Bearbeitungszeit (Auflösung in ms) werden in der Gruppen-Box BEARBEITUNGSZEIT konfiguriert. Die Bearbeitungszeitmessung erfolgt in ms-Auflösung und umfaßt den Abschnitt von der Präsentation des Zielstimulus bis zum Beginn der Probandenäußerung. Daneben kann für diesen

Abschnitt eine obere Schranke („time out") als maximal zulässige Bearbeitungszeit vorgegeben werden. Nach Ablauf dieser Zeit erscheint ein Dialogfenster, das den Anwender darüber informiert. Dadurch läßt sich die Präsentationsdauer bildhafter und schriftsprachlicher Zielstimuli kontrollieren.

Stimulus-Aufbereitung

Die Anwendung der „Cueing-Technik" in der Objektbenennung (vgl. Abschnitt 7.1.3) sieht die Präsentation von Hinweisreizen vor, falls die Benennung durch den Probanden nicht möglich ist. Hinweisreize enthalten abgestuft Teilinformation des gesuchten Wortes (Zielstimulus). Im Mittelpunkt des Moduls „Wortabruf" steht das Angebot phonologischer Teilinformation durch lautsprachliche Hilfen. Aus linguistischer Sicht enthält die phonologische Wortform zwei Arten von Informationen:

- segmentale Information
- metrische Information

Das Sprachsignal einer Wortform besteht aus einer kontinuierlichen Aneinanderreihung von Lautelementen (Phone). Jeder Laut ist ein zeitlich abgrenzbares Segment, das Teilinformation des Sprachsignals trägt. *Segmentale Information* eines Wortes besteht demnach aus der akkumulierten Teilinformation der einzelnen Sprachsegmente. Mit dem Begriff „Metrik" beschreibt die Linguistik Eigenschaften wie Rhythmus und Betonung der Sprache. *Metrische Information* auf Wortebene umfaßt die Silbenzahl und das Akzentmuster des gesprochenen Wortes. Das Akzentmuster beschreibt den Verlauf der Betonung und ist ein wichtiges sprachmelodisches (prosodisches) Element. Die Unterscheidung beider Informationen soll durch das Beispiel in Abbildung 7.10 verdeutlicht werden.

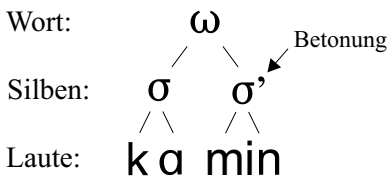


Abbildung 7.10: Phonologische Repräsentation des Wortes /Kamin/

Die Wortform von /Kamin/ besteht aus zwei Silben, von denen letztere betont ist, wodurch das Akzentmuster bestimmt ist. Jede Silbe wiederum besteht aus Lauten, die Segmente des Wortes sind. Sowohl segmentale als auch metrische Information kann durch Methoden der Signalverarbeitung gezielt variiert werden (Fensterung, Filterung oder Maskierung). Die Stimulus-Aufbereitung verfügt zu diesem Zweck über integrierte Komponenten der digitalen Audiosignalverarbeitung, die in Abbildung 7.11 dargestellt sind. Als weiteres Beispiel wird das viersilbige Wort /Pyramide/ betrachtet. Im Signaleditor (Abb. 7.11, oben) kann stufenlos[9] ein Zeitfenster[10] gewählt werden,

[9] diskretisiert lediglich durch die Folge der Abtastwerte
[10] Ausschnitt des Zeitsignals

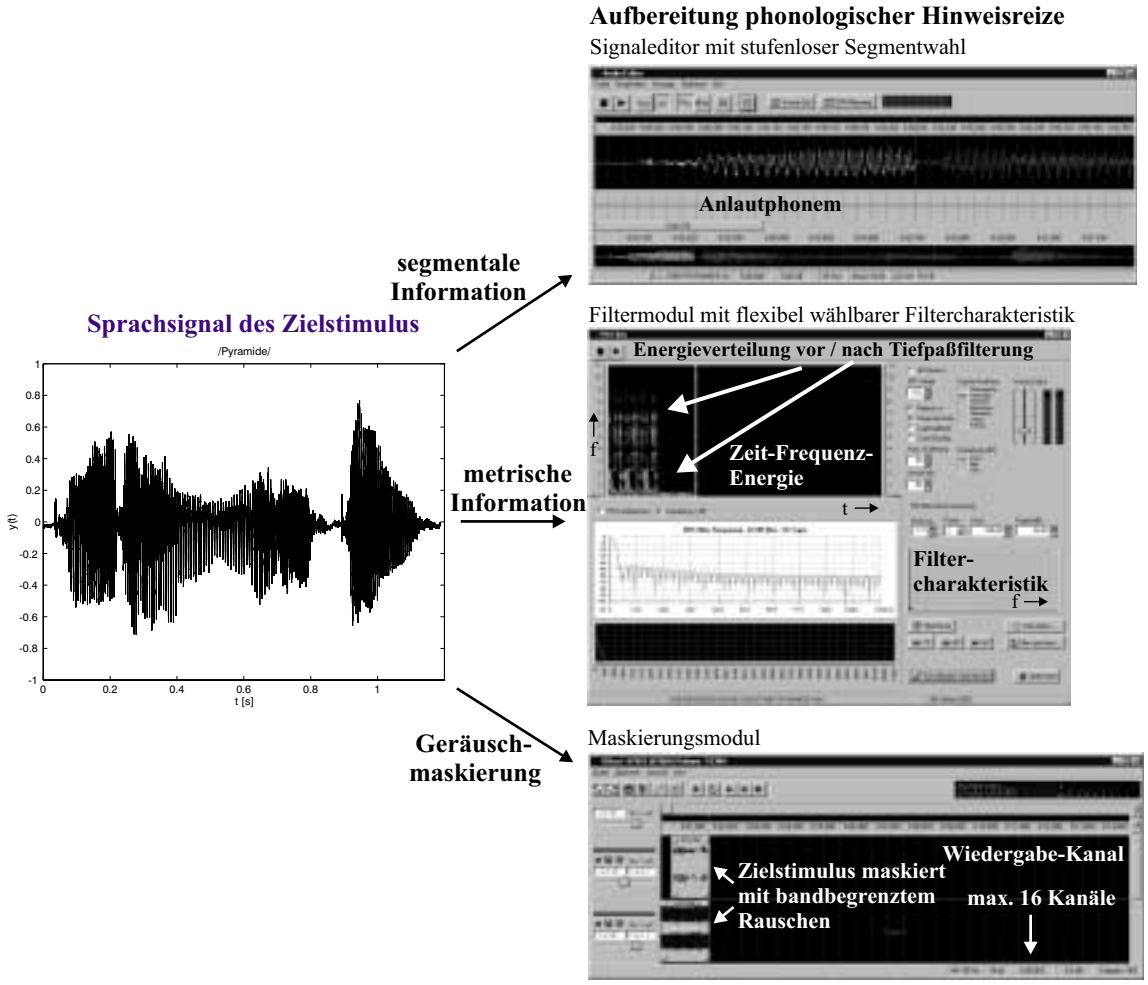


Abbildung 7.11: Gewinnung und Variation phonologischer Information

das *segmentale* Teilinformation des Sprachsignals enthält. Durch geeignete Wahl eines Sprachsegments läßt sich z.B. eine Anlauthilfe realisieren. Da das Sprachsegment dem gesamten Sprachsignal entnommen wird, bleiben „natürliche" Lautübergänge (Koartikulation) zwischen vorausgehenden und nachfolgenden Lauten erhalten.

Die *metrische* Information des Wortes /Pyramide/ ist durch die Akzentuierung der dritten Silbe geprägt. Es stellt sich nun die Frage, welche Parameter im Sprachsignal die Betonung bzw. Akzentuierung beschreiben. Betonte Silben zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus:

- gedehnter Silbenkern
- erhöhte Sprachgrundfrequenz
- erhöhte Intensität

Am Beispiel des Wortes /Pyramide/ äußert sich die Dehnung des Silbenkerns in der Vokaldehnung des Vokals /i/. Die Vokaldehnung ist jedoch kein eindeutiges Merkmal

betonter Silben, wie das Gegenbeispiel des Wortes /Fenster/ belegt. Ein typisches und zuverlässiges Merkmal betonter Silben sind Änderungen im Verlauf der Sprachgrundfrequenz [EH93], der zum vergleichsweise regelmäßigen Verlauf in der Umgebung der betonten Silbe Auffälligkeiten zeigt (vgl. Abbildung 7.12).

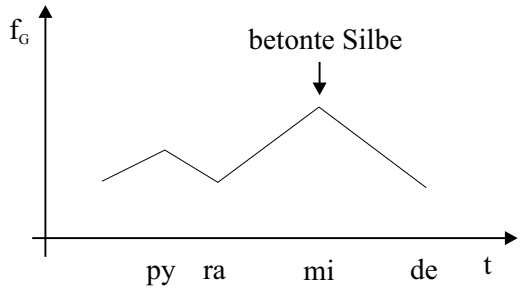


Abbildung 7.12: Prinzipieller Verlauf der Grundfrequenz f_G des Wortes /Pyramide/

Eine Möglichkeit zur Gewinnung des metrischen „Rasters" (Akzentmuster) besteht darin, das Sprachsignal durch einen extremen Tiefpaß zu filtern ($f_G \approx Sprachgrundfrequenz$). Dadurch wird segmentale Information weitgehend ausgeblendet. Aufgrund des sprecherabhängigen Grundfrequenzverlaufs ($50\,Hz \leq f_G \leq 400\,Hz$) ist allerdings eine individuelle Behandlung des Sprachsignals erforderlich. Im Modul „Wortabruf" wurde daher ein Filtermodul mit frei wählbarer Filtercharakteristik implementiert (Abb. 7.11, mitte).

Eine weitere Möglichkeit zur Gewinnung metrischer Information besteht in der Anwendung von *Maskierungstechniken*. Das Sprachsignal wird dabei z.B. durch ein Geräusch mit variablem Pegel verdeckt. Wird als Verdeckungssignal bandbegrenztes Rauschen verwendet, dessen untere Grenzfrequenz oberhalb der Sprachgrundfrequenz liegt, wird (segmentale) Information des oberhalb der Grundfrequenz liegenden Sprachbandes maskiert und es steht vergleichbar zur Tiefpaßfilterung lediglich Teilinformation des Grundfrequenzverlaufs zur Verfügung. Für die Realisierung steht im Modul ein Maskierungsmodul zur Verfügung (Abb. 7.11, unten). Auf maximal 16 Kanälen können Audiodateien (PCM-Format) in beliebiger zeitlicher Abfolge angeordnet werden[11]. Pegelanpassungen sind sowohl für jeden Kanal als auch für jedes Signal möglich. Dadurch wird eine stufenlose Variation phonologischer Teilinformation ermöglicht. Neben der Geräuschmaskierung kann das Maskierungsmodul auch zur Erstellung komplexer akustischer Szenarien verwendet werden. So kann z.B. das Vorhandensein mehrerer Sprecher simuliert werden („Cocktail-Party-Effekt"), wodurch natürliche Bedingungen erschwerter Wortverarbeitung simuliert werden können.

Alle in Abbildung 7.11 dargestellten Komponenten sind in das Modul „Wortabruf" integriert und können von der Oberfläche der Projekt-Konfiguration aufgerufen werden. Eine Besonderheit liegt darin, daß Veränderungen am digitalen Signal *parametrisiert* werden, ohne physikalische Änderungen am digitalen Original vozunehmen. Die Modifikationen im Zeit- und Frequenzbereich werden eindeutig durch Signalparameter

[11] d.h. bis zu 16 unterschiedliche Signale können simultan wiedergegeben werden

Aufgaben	Zielstimulus	Anzahl der Hinweisreize (i)	Summe verwendeter Reize *ohne* Parametrisierung (= Summe der Dateien)	Summe verwendeter Reize *mit* Parametrisierung (= Summe der Dateien)
1	/pyramide/	5	6	1
2	/zigarre/	5	12	2
3	/violine/	5	18	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n			(i+1) n	n
				Datenreduktion um den Faktor i

Abbildung 7.13: Datenreduktion am Beispiel einer Aufgabenerstellung mit phonologischen Hinweisreizen

beschrieben und in der Systemdatenbank gespeichert. Zur Laufzeit des Experiments werden diese Parameter ausgelesen und zur Signalanpassung verwendet. Diese Vorgehensweise reduziert das Datenaufkommen dadurch, daß keine separaten Audiodateien zur Speicherung des veränderten Signals erstellt werden müssen (s. Beispiel in Abbildung 7.13).

Projekt-Layout und Administration

Die Subkomponente *Projekt-Layout* ermöglicht die Anpassung des Aufgabenbildschirms. Der Anwender kann durch Auswahl bestimmen, welche Elemente am Bildschirm angezeigt werden sollen. Inbegriffen ist die Entscheidung, ob Hilfestellungen zur Benennung verwendet werden sollen oder nicht, da der Aufruf von Hilfen durch die Aktivierung von Bildschirmelementen erfolgt. Vollständig konfigurierte Aufgaben (Zielstimulus und Hinweisreize) können somit durch *eine* Option entweder in diagnostischen (ohne Hinweisreize) oder therapeutischen Untersuchungen (mit Hinweisreizen) eingesetzt werden.

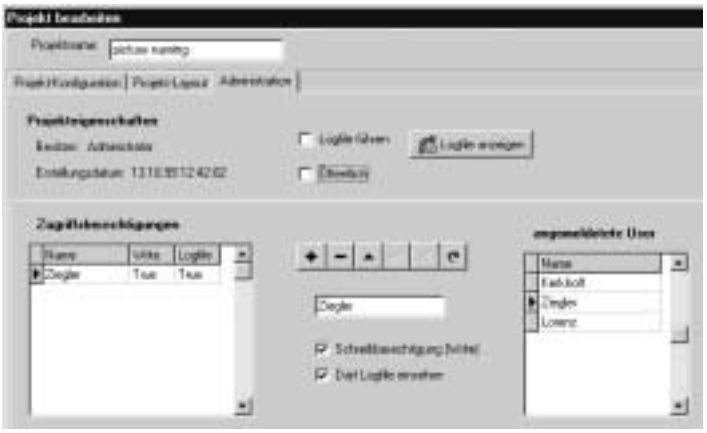


Abbildung 7.14: Verwaltung der Zugriffsrechte auf das Projekt

In der Subkomponente *Administration* erfolgt die projektbezoge Verwaltung der Zugriffsrechte. Das Beispielprojekt (s. Abb. 7.14) wurde bei der Erstellung als „nicht öffentlich" deklariert. Das Zugriffsrecht auf Projektdaten kann nun einzelnen Anwendern (Tabelle ANGEMELDETE USER) erteilt werden.

7.2.4 Experimentdurchführung

Die Durchführung von Experimenten erfolgt auf der Grundlage konfigurierter Projekte und wird i.d.R. durch einen sprachgeschulten Experten begleitet. Während der Durchführung werden Antwortparameter des Patienten durch das System aufgezeichnet, die in der Experimentauswertung analysiert werden können. Im folgenden wird analog zur Experimentkonfiguration (vgl. Abschnitt 7.2.3) zunächst die Struktur der Durchführung dargestellt. Anschließend wird beispielhaft die Realisierung erläutert.

Struktur der Systemkomponente Durchführung

In der DURCHFÜHRUNG werden spezifische Vorbereitungen für die experimentelle Untersuchung getroffen. Während Konfigurationsparameter inhaltliche und strukturelle Einstellungen beinhalten (Aufgabendefinition, Experimentstruktur) sind Durchführungsparameter untersuchungsspezifisch. Durch diese Trennung wird erreicht, daß ein konfiguriertes Projekt die Funktion einer Vorlage erfüllt und für andere Untersuchungen wiederverwendet werden kann (z.B. mit unterschiedlichen Patienten). Dieses Prinzip ist in Abbildung 7.15 dargestellt.

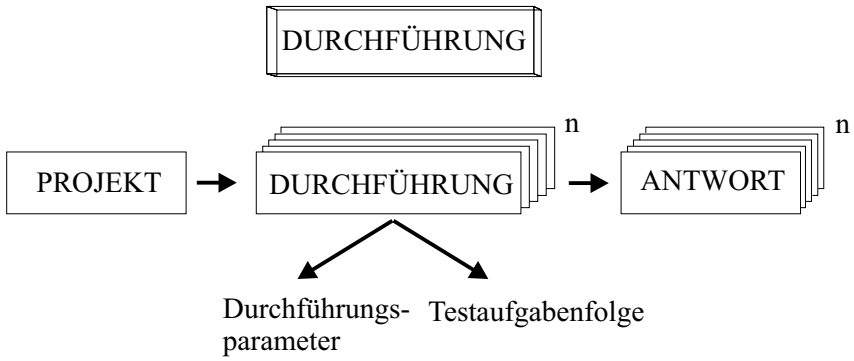


Abbildung 7.15: Struktur der Systemkomponente DURCHFÜHRUNG

Wesentliche Aktivitäten in der DURCHFÜHRUNG sind:

- Wahl von Durchführungsparametern
- Erstellung von Testaufgaben (optional)

Die wichtigsten Durchführungsparameter sind:

- Patienten-/Therapeutenidentität
- Einstellung regelmäßiger Unterbrechungen

Die Zuordnung zwischen DURCHFÜHRUNGEN und Patientendaten ermöglicht eine patientenspezifische Auswertung der Antwortdaten (vgl. Abschnitt 7.2.5). Ebenfalls untersuchungsbezogen ist die Wahl zyklischer Unterbrechungen, die durch das System nach einer vorgegebenen Anzahl von Aufgaben eingefügt werden.

Ein weiterer Bestandteil der DURCHFÜHRUNG betrifft die Festlegung, ob der Untersuchung ein Testlauf vorangehen soll. Falls ja, wird definiert, welche Aufgaben hierfür verwendet werden sollen.

Während der Untersuchung werden relevante Antwortparameter durch das System aufgezeichnet. Diese sind den Durchführungsdaten zugeordnet, wodurch eine vorwärtsgerichtete Struktur (PROJEKT-DURCHFÜHRUNG-ANTWORT) erzielt wird.

Realisierung der Systemkomponente Durchführung

Nach der Auswahl eines konfigurierten Projekts wird der Anwender zum in Abbildung 7.16 dargestellten Bildschirm geleitet. Das Feld PATIENT ist mit den im System zuvor angelegten Patientendatensätzen verbunden und ermöglicht so eine einfache und rasche Auswahl. Nachdem sich der behandelnde Therapeut namentlich im Feld THERAPEUT eingetragen hat, erfolgt im nächsten Schritt die optionale Konfiguration des Testlaufs in der Gruppenbox TESTLAUF-OPTIONEN.

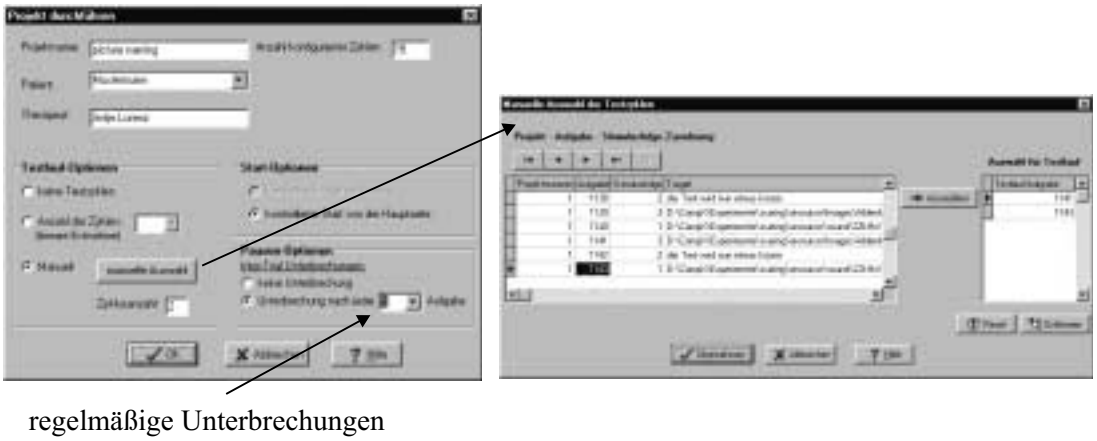


Abbildung 7.16: Durchführungsparameter und Konfiguration des Testlaufs

Die Auswahl der Testaufgaben kann auf zwei Arten vorgenommen werden:

- lineare Aufgabenentnahme
- manuelle Aufgabenentnahme

Bei *linearer Aufgabenentnahme* wird die vom Anwender festgelegte Anzahl von Aufgaben den konfigurierten Aufgaben des Projekts von Beginn an entnommen (z.B. Anzahl 5, d.h. der Testlauf besteht aus den Aufgaben 1 bis 5). Die Untersuchung beginnt zur Vermeidung von Wiederholungen mit der der letzten Testaufgabe folgenden Aufgabe (im Beispiel Aufgabe 6). Bei *manueller Aufgabenentnahme* kann eine individuelle Testaufgabenfolge erstellt werden, was z.B. dann sinnvoll ist, wenn ein Projekt unterschiedliche Aufgabentypen[12] enthält, die dem Patienten separat bekannt gemacht werden sollen (s. Abb. 7.16, rechts).

Bildschirmaufbau

Im folgenden wird die Gestaltung des Aufgabenbildschirms am Beispiel einer Bildbenennungsaufgabe erläutert (s. Abbildung 7.17). Die Aufgabe beginnt mit der Präsentation des bildhaften Zielstimulus (Pyramide). Das Bild wird in zentrierter Position eingeblendet und soll durch den Patienten benannt werden.

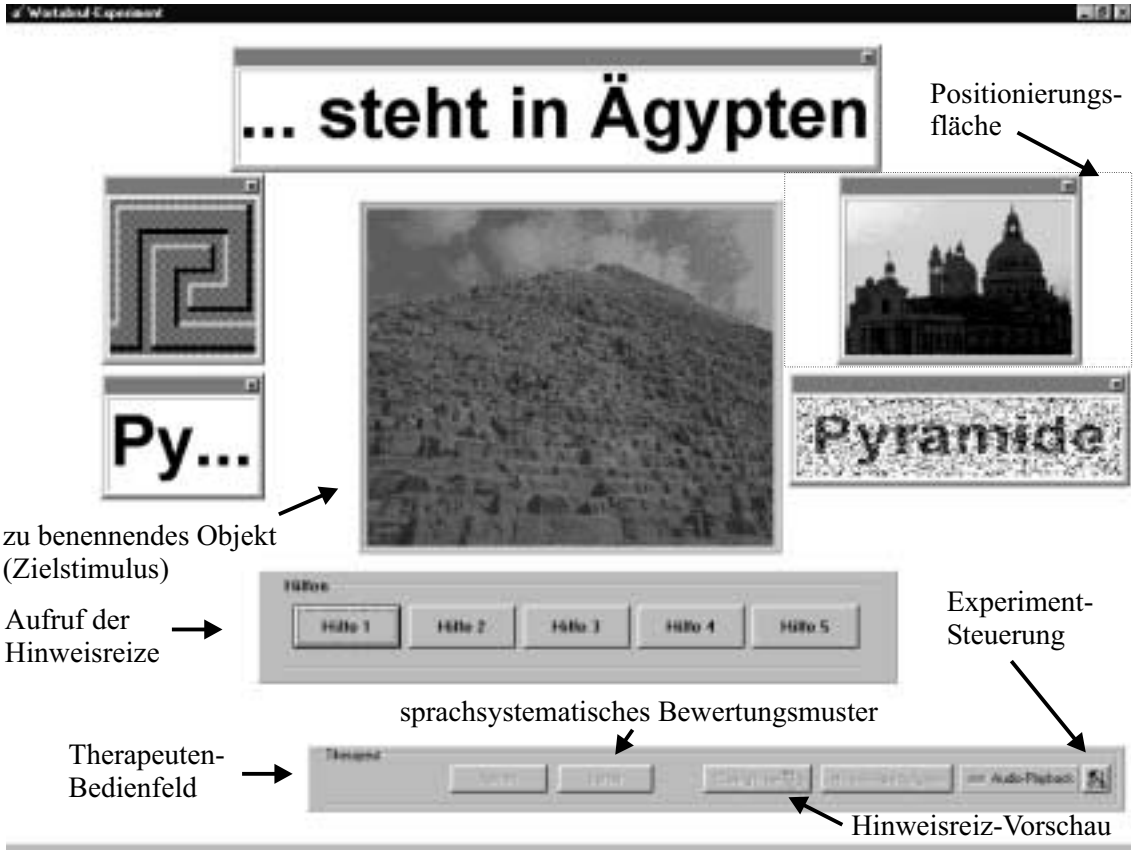


Abbildung 7.17: Bildschirm einer Bildbenennungsaufgabe, zur Demonstration sind die bildhaften und schriftsprachlichen Hinweisreize vollständig aktiviert

Im nächsten Schritt wird die Patientenäußerung durch den sprachgeschulten Therapeuten systematisch bewertet. Hierzu stehen dem Therapeuten zwei Eingabemöglichkeiten

[12] z.B. Zielreiz akustisch, bildhaft und schriftsprachlich

im THERAPEUTEN-BEDIENFELD zur Verfügung. Korrekte Antworten werden unmittelbar durch Klicken auf den Button KORREKT bestätigt, während Benennfehler weiter ausdifferenziert werden (Button FEHLER). Abbildung 7.18 zeigt das Bewertungsmuster, das in Zusammenarbeit mit Sprachexperten des Städtischen Krankenhauses München-Bogenhausen entwickelt wurde.

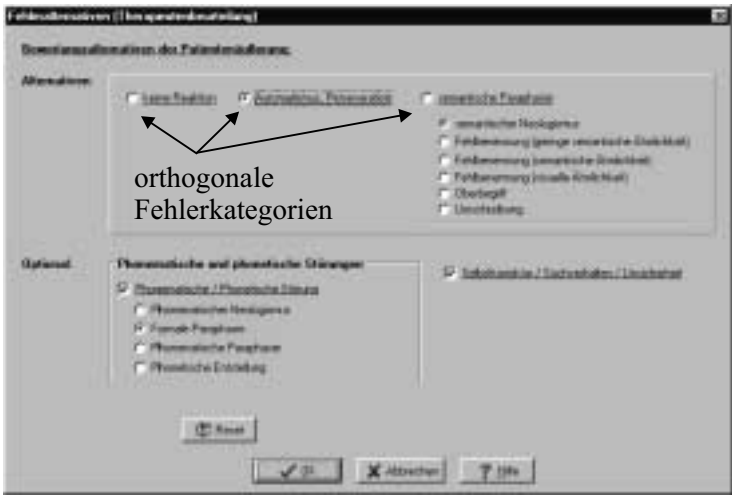


Abbildung 7.18: Bewertungsmuster zur sprachsystematischen Beurteilung von Benennfehlern

Dabei standen Forderungen einer möglichst vollständigen Erfassung von Benennfehlern bei Wörtern einer möglichst einfachen und praktikablen Handhabung gegenüber, die notwendig ist, da die Bewertung zur Laufzeit des Experiments erfolgt. Das Ergebnis ist eine Kategorisierung von Benennfehlern auf mehreren Stufen:

- Korrekt
- Keine Reaktion
- Automatismus/Perseveration[13]
- Semantische Paraphasie[14]

Liegt eine semantische Paraphasie vor, kann diese weiter differenziert werden (z.B. existiert das vertauschte Wort in der Sprache?, falls nein, Einstufung als semantischer Neologismus[15], etc.). Diesen Störungen auf semantischer Ebenen können lautsprachliche (phonetische) Fehler überlagert sein, die in der Gruppe PHONEMATISCHE UND PHONETISCHE PARAPHASIEN weiter untergliedert sind. Zusätzlich werden Fälle

[13] ständige Lautwiederholungen

[14] Fehlerhaftes Auftreten eines Wortes, das zum Zielwort entweder eine bedeutungsmäßige Ähnlichkeit hat oder grob davon abweicht (z.B. Mutter statt Frau, Einbringen statt Einbrechen)

[15] Wortneubildung

berücksichtigt, in denen der Patient Unsicherheiten, ein auffälliges Suchverhalten zeigt oder sich selbst korrigiert.

Nach der Bewertung werden in therpeutischen Sitzungen Hinweisreize zum Zielstimulus präsentiert. Obwohl akustische (lautsprachliche) Hinweisreize systemseitig stärker berücksichtigt werden, wird das Angebot schriftsprachlicher und bildhafter Reize technisch ebenfalls unterstützt. Nach dem Aufruf durch Aktivierung des entsprechenden Buttons in der Gruppenbox HILFEN erscheint der Hinweisreiz in einem eigenen Fenster, das beliebig auf dem Bildschirm verschoben und in der Größe variiert werden kann. Zur Vermeidung einer optischen Verdeckungen des Zielstimulus ist der Bildschirm in Sektoren eingeteilt, die den Hinweisreizen zulässige Flächen zur Positionierung zuweisen. Abbildung 7.17 zeigt im rechten Teil beispielhaft die Abmessung eines Sektors, die systemseitig für den Hinweisreiz reserviert ist. Das System versucht, jeden Reiz innerhalb seines Sektors zu positionieren. Ein implementierter Algorithmus sorgt für die notwendige größenproportionale Skalierung von Bildern und Texten.

Neben dem Aufruf der Hinweisreize wurde für den Therapeuten eine *Hinweisreiz-Vorschau* realisiert. Tabellarisch werden die Ressourcennamen (Dateinamen) der verwendeten Reize aufgelistet, wodurch sich der Therapeut zur Laufzeit des Experiments informieren kann. Ferner wird das steuernde Eingreifen während der experimentellen Sitzung ermöglicht. So können einerseits Aufgaben übersprungen werden (Button NÄCHSTE AUFGABE) oder es können Unterbrechungen bis hin zum vorzeitigen Abbruch des Experiments durch die EXPERIMENT-STEUERUNG vorgenommen werden.

7.2.5 Experimentauswertung

Die Überprüfung der Wirksamkeit systematischer Untersuchungsverfahren erfordert eine auf quantitativen Parametern beruhende Ergebnisanalyse. Zu diesem Zweck verfügt das Modul über eine integrierte *Auswertungskomponente*, die dem Anwender eine graphische Aufbereitung der Daten ermöglicht. Neben implementierten Verfahren können die Ergebnisdaten für die statistische Weiterverarbeitung exportiert werden (ASCII-Format).

Struktur der Systemkomponente Auswertung

In der Komponente AUSWERTUNG können Antwortdatensätze mit elementarstatistischen Methoden untersuchungsspezifisch ausgewertet werden (z.B. Antwortverteilung mit Berechnung der Lageparameter). Zu diesem Zweck stehen dem Anwender vordefinierte Ergebnisverteilungen zur Verfügung. In Erweiterung dazu besteht die Möglichkeit zur Konfiguration individueller Verteilungen, bei denen Einzelmerkmale ausgewählt und kombiniert werden können (vgl. Abbildung 7.19). In der Subkomponente *Administration* werden Anforderungen der Datenverwaltung (z.B. patientenspezifisches Entfernen von Antwortdatensätzen) erfüllt.

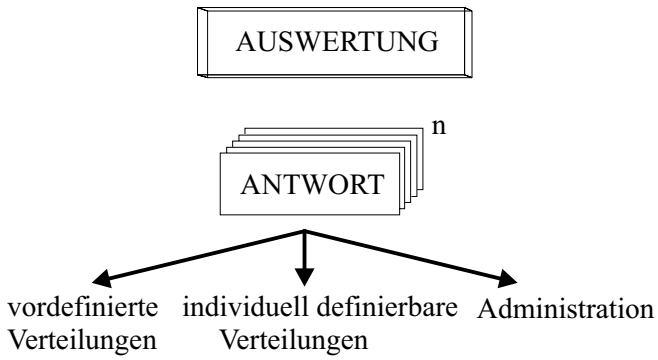


Abbildung 7.19: Struktur der Komponente Auswertung

Realisierung der Systemkomponente Auswertung

Nach der Auswahl eines durchgeführten PROJEKTS erscheint der in Abbildung 7.20 dargestellte Bildschirm. Im oberen Abschnitt sind tabellarisch alle projektbezogenen Durchführungen aufgelistet. Durch Selektion einer Durchführung werden die entsprechenden Antwortdatensätze durch das System zugeordnet. Als wesentliche Antwortparameter stehen pro Aufgabe die sprachsystematische Bewertung der Patientenäußerung sowie die zugehörige Bearbeitungszeit zur Verfügung.

Im unteren Abschnitt von Abbildung 7.20 erfolgt die Auswertung dieser Parameter. Häufigkeitsverteilungen von Benennfehlern können alternativ mit Hilfe vordefinierter Merkmalsmuster oder mit einer individuellen Auswahl von Merkmalen erzeugt und angezeigt werden. Abbildung 7.21 zeigt beispielhaft die Auswertung nach Benennfehlerkategorien. Die Ergebnisse von Initial- und Abschlußbewertung werden dabei in separaten Spalten dargestellt. Der Unterschied zwischen beiden Verteilungen ist im Idealfall auf den Einfluß der Hinweisreize zurückzuführen, die zwischen Initial- und Abschlußbewertung präsentiert wurden. Andererseits können in individuell definierbaren Verteilungen selektiv Einzelmerkmale (Fehlerkategorien) ausgewählt und gegenübergestellt werden. Die Daten jeder Verteilung können mittels implementierter Exportfunktionen (s. Abb. 7.21) im ASCII-Format gespeichert und statistisch weiterverarbeitet werden.

7.3 Klinische Anwendung

Ausgehend vom allgemeinen Ziel der Aphasietherapie, die sprachliche Kommunikationsfähigkeit des Patienten zu reaktivieren [Poe89] besteht das Behandlungsziel aphasischer Benennstörungen in der Erleichterung des Zugriffs auf Wörter. Mit dem Modul „Wortabruf" steht ein Instrument zur Verfügung, mit dem die Wirksamkeit systematischer Therapieverfahren durch Gegenüberstellung phonologischer und semantischer Übungsformen untersucht werden kann. Gleichzeitig werden phonologische Verfahren

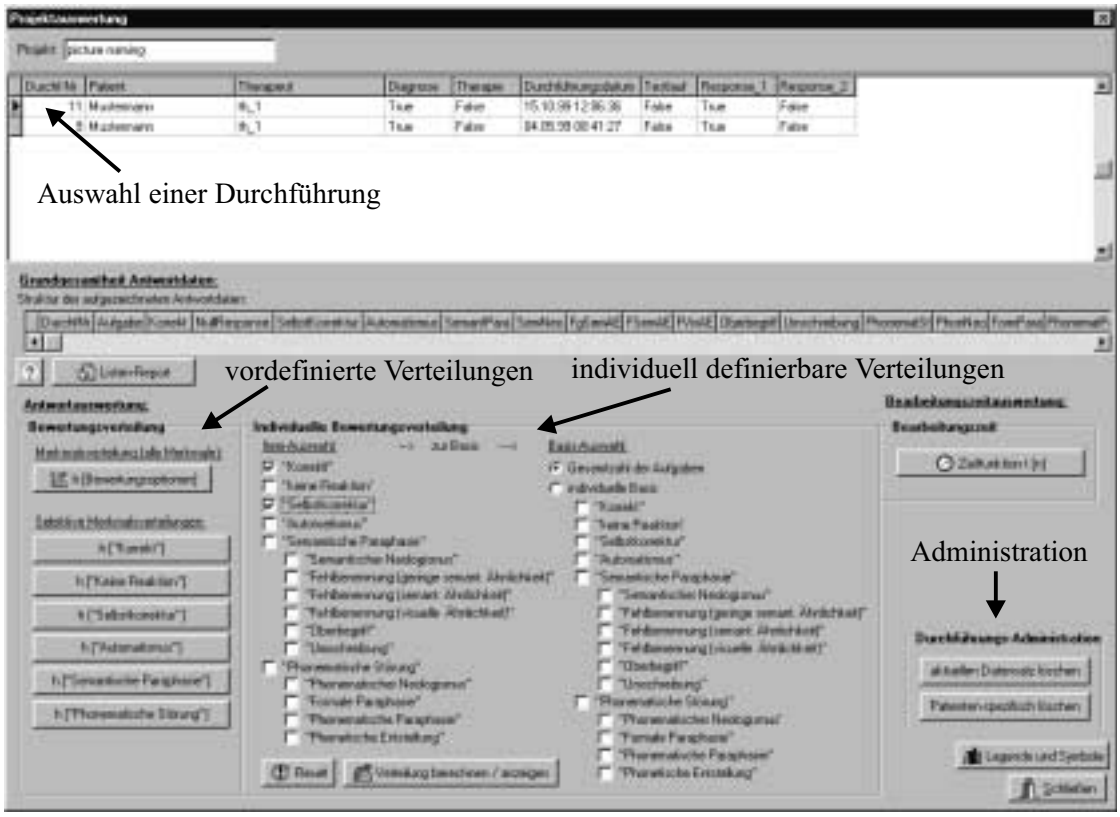


Abbildung 7.20: Realisierung der Auswertung

durch den Einsatz signalverarbeitender Methoden angereichert. Neben der wissenschaftlichen Überprüfung der Wirksamkeit dieser Methoden liegt die Hauptanwendung im klinischen Alltag.

Der klinische Einsatz des Moduls „Wortabruf" wird derzeit in der neuropsychologischen Abteilung des Städtischen Krankenhauses München-Bogenhausen erprobt. In Pilotuntersuchungen werden phonologische Hinweisreize hinsichtlich ihrer spezifischen Wirksamkeit zunächst an sprachgesunden Probanden geprüft. Der nachfolgende Abschnitt beschreibt im ersten Teil das geplante therapeutische Vorgehen, wobei das System zur Erstellung von Objektbennenungsaufgaben genutzt wird. Anschließend werden über diese Anwendung hinaus weitere therapeutische Einsatzfelder aufgezeigt, die aufgrund der flexiblen experimentellen Struktur und Reizkonfiguration realisierbar sind.

7.3.1 Methodisches Vorgehen

Die therapeutische Vorgehensweise beruht auf der theoretischen Unterscheidung zwischen semantischen und phonologischen Lexikonrepräsentationen. Zunächst soll in einzelnen Übungseinheiten geprüft werden, welche Art der lexikalischen Teilinformation der Patient abrufen kann. Diese Aussage wird im Wortabrufexperiment durch die

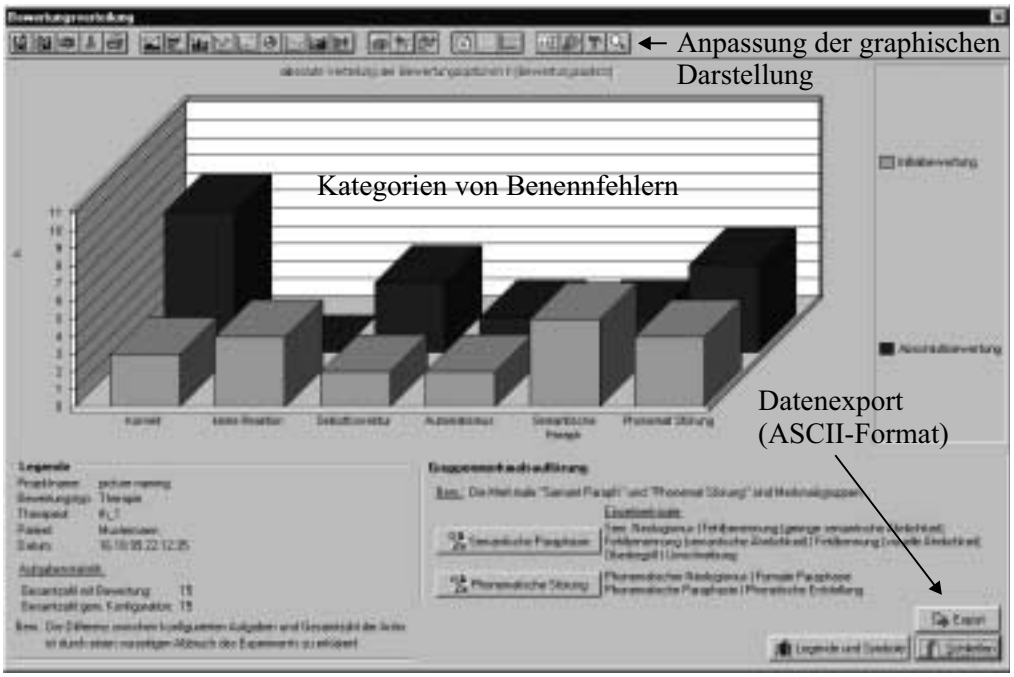


Abbildung 7.21: Verteilung der Benennfehler nach Kategorien

Analyse der Benennfehler in diagnostischen Untersuchungen (vgl. Abb. 7.2) gewonnen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden im nächsten Schritt Hilfsinformationen durch Hinweisreize (Cues) in differenzierter Abstufung angeboten (s. Abschnitt 7.1.3). Dadurch soll der Wortabruf schrittweise erleichtert werden. Die Hinweisreize enthalten einerseits segmentale oder metrische Teilinformation des Zielwortes (*phonologisches* Cueing), andererseits *semantische oder pragmatische* Information[16]. Diesem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, daß der Wortabruf blockiert sein kann, wenn nur *eine* Teilinformation nicht oder nicht zum relevanten Zeitpunkt aktiviert werden kann. Die Vorgabe dieser Teilinformation durch gezielte Hinweisreize soll den Wortabruf in der Therapiesituation erleichtern. Darüber hinaus wird erwartet, daß durch die Vielfalt und systematische Abstufung der Hinweisreize die Fähigkeit des Patienten zur Entwicklung eigener Strategien gefördert wird[17].

Zur Kontrolle der Therapieeffekte wird ein erprobtes Untersuchungsdesign angewandt, das in Abbildung 7.22 dargestellt ist. Die Untersuchung besteht aus einer parallelen Anordnung von drei Behandlungsabschnitten. Die Patienten werden dabei abwechselnd einer der beiden Behandlungssequenzen (A-B-A bzw. B-A-B) zugeordnet. Vor dem Beginn der Untersuchung erfolgt eine ausführliche Eingangsuntersuchung (Baseline), die Effekte der Spontanerholung[18] prüft. Vor und nach jedem Behandlungsabschnitt finden

[16]semantisch assoziierte Objekte bzw. pragmatische Kontextinformation z.B. typische Geräusche, Farben, etc.

[17]Beispiel für eine Umwegstrategie: Patient schreibt das Wort, das er nicht sagen kann und liest es laut

[18]Spontanrückbildung *ohne* Behandlungseinfluß

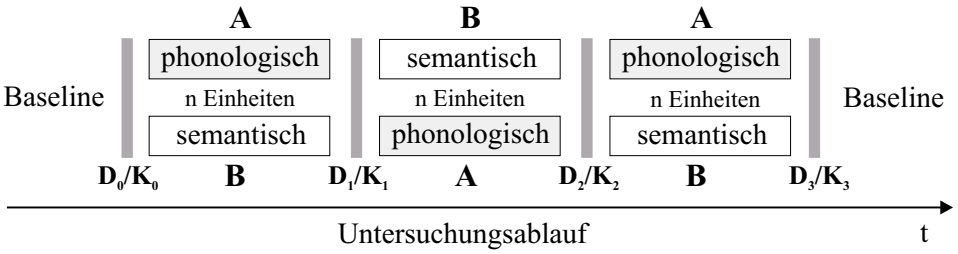


Abbildung 7.22: Aufbau der Untersuchung, Behandlungsabschnitte (A,B) mit jeweils n Übungseinheiten und Diagnostik-/Kontrolluntersuchungen (D/K)

Diagnostik- und Kontrolluntersuchungen (D/K) statt. Die diagnostische Untersuchung beinhaltet sowohl Aufgaben der geübten Einheiten wie auch Aufgaben des ungeübten Parallelabschnitts, während die Kontrolluntersuchung Aufgaben enthält, für die kein Einfluß der Behandlung erwartet wird. Durch diesen Ansatz kann zwischen Therapieeffekten, Effekten der Spontanerholung und reinen Wiederholungseffekten unterschieden werden. Durch das Einbeziehen von nicht geübten Zielwörtern kann gleichzeitig die Generalisierung der Leistungsverbesserung im Wortabruf bestimmt werden.

7.3.2 Phonologisches Therapieverfahren

In diesem Therapieverfahren wird mit Information gearbeitet, dessen Träger die lautsprachliche Form des Wortes ist (phonologische Information). Linguistisch wird zwischen segmentaler und metrischer Information unterschieden (s. Abschnitt 7.2.3 Stimulus-Aufbereitung). Zur Erweiterung der verwendeten Behandlungsmethoden und zur Motivationsförderung beim Patienten werden schriftsprachliche (graphematische) Hinweisreize einbezogen. Eine phonologische Therapie- bzw. Übungseinheit (vgl. Abb. 7.22) setzt sich dann zu annähernd gleichen Anteilen aus metrischen, segmentalen und graphematischen Hinweisreizen zusammen.

Die Abstufung der phonologischen Hinweisreize beruht auf dem Prinzip der zunehmenden Informationsanreicherung. Metrische Information (Silbenanzahl, Akzentmuster) wird technisch durch extreme Tiefpaßfilterung des gesprochenen Zielwortes realisiert, ausschließlich segmentale Information wird durch einen Ausschnitt aus dem Sprachsignal bereitgestellt (linksseitige Fensterung des Zeitsignals). Beide Verfahren ermöglichen eine stufenlose Informationsanreicherung (Erhöhung der Grenzfrequenz des Filters, Vergrößerung des Zeitfensters). Gleichzeitig sollen in diesen Untersuchungen Erfahrungen mit maskierten Hinweisreizen gewonnen werden, die natürliche Bedingungen erschwerter Wortverarbeitung simulieren (z.B. „Cocktail-Party-Effekt"). Durch Variation des Pegelverhältnisses zwischen Nutz- und Störsignal(en) kann der Informationsgehalt auch von maskierten Signalen stufenlos variiert werden. Aufgrund des innovativen Charakters kann bei der Suche nach geeigneten Abstufungen in den einzelnen Bedingungen nicht auf Erfahrungen zurückgegriffen werden. Daher werden Pilotuntersuchungen zur Ermittlung dieser Parameter benötigt, die den experimentellen

Untersuchungen vorangestellt werden.

Schriftsprachliche Information kann durch ähnliche Methoden manipuliert werden. Abbildung 7.17 zeigt einige Beispiele (Silbenanfang, Maskierung des schriftsprachlichen Wortes mit Rauschen). Damit kann das Prinzip der Informationsanreicherung auch bei schriftsprachlichen Reizen angewendet werden.

Die Vorgehensweise wird anhand eines Beispiels erläutert: Nach einem nicht benannten Objekt beginnt die Therapie mit einer Auswahlaufgabe. In dieser soll der Patient das Zielwort unter einer Anzahl geeignet manipulierter Wörter identifizieren. In der metrischen Bedingung werden beispielsweise tiefpaßgefilterte Wörter unterschiedlicher Silbenzahl oder Akzentuierung angeboten (z.B. /Pyramide/, /Gitarre/). Analoges gilt für die segmentale und graphematische Bedingung. Das Auswahlverfahren kann mehrfach durchgeführt werden, wobei zusätzlich durch unterschiedliche Sprecher variiert werden kann. Identifiziert der Patient das Zielwort sicher, kann davon ausgegangen werden, daß diese Teilinformation beim Patienten verfügbar ist. Bereits die Auswahlaufgabe ist ein erster therapeutischer Schritt, da sie eine gezielte Aktivierung phonologischer Information beinhaltet. Im Anschluß an die Auswahlaufgabe werden Hinweisreize angeboten, die in frühen Therapiephasen durch den Therapeuten gesteuert werden, zu einem späteren Zeitpunkt aber auch durch den Patienten selbst abrufbar sind.

7.3.3 Semantisches Therapieverfahren

In diesem Therapieverfahren wird semantische Information verwendet, die im Gegensatz zur phonologischen nicht in der Wortform verankert ist. Diesem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, daß in frühen Phasen des Wortabrufs die Auswahl bzw. Aktivierung eines lexikalischen Konzepts erfolgt, durch das semantische Information des Wortes bestimmt wird (vgl. Abschnitt 3.5.3). Das Konzept beinhaltet unter anderem semantische Eigenschaften des Zielwortes (z.B. Auto „ist ein Fahrzeug", „hat vier Räder" etc.). Von dem Angebot semantischer Information bei Wortabrufschwierigkeiten wird die Reaktivierung dieser Konzepte erwartet. In der praktischen Anwendung können beispielsweise Eigenschaften des Zielobjekts hervorgehoben werden:

- Abbildung des gesuchten Objekts oder Ausschnitten davon aus unterschiedlichen Perspektiven
- Angebot typischer Geräusche und/oder Farben

Eigenschaften können ferner schriftsprachlich beschrieben werden oder durch Fragesätze gezielt angesprochen werden. Eine Anreicherung semantischer Information, die durch Anwendung der „Cueing-Technik" erforderlich ist, kann durch additive Darbietung einzelner Hinweisreize erreicht werden. Die Abstufung der Hinweisreize erfordert analog zum phonologischen Verfahren die empirische Ermittlung durch Pilotuntersuchungen. Neben semantischen Hinweisreizen, die den Wortabruf erleichtern, können auch Hilfen mit *hemmender* Wirkung untersucht werden. Eine solche Wirkung tritt

z.B. dann auf, wenn semantisch verwandte Abbildungen präsentiert werden (z.B. Tiger und Löwe), wodurch der Patient möglicherweise statt des gesuchten das semantisch verwandte Wort produziert.

Die Vorgehensweise in der Untersuchung ist analog zum phonologischen Verfahren (Auswahlaufgaben, abgestufte Hinweisreize). Insgesamt wird durch den semantischen Ansatz erreicht, daß der gesamte Kontext des Zielwortes semantisch aktiviert wird, was den Prozessen bei „natürlicher" Wortproduktion nahe kommt.

7.3.4 Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Der vorangegangene Abschnitt demonstriert die klinische Anwendung des Wortabrufmoduls anhand von Benennexperimenten. Abbildung 7.23 zeigt im oberen Teil zusammenfassend die Variationsmöglichkeiten in der Objektbenennung. Aufgrund der flexiblen Konzeption ergeben sich weitere klinische Anwendungsfelder für das Modul. Diese erschließen sich bei Betrachtung der Vorgehensweise in der Aphasietherapie, die u.a. folgende Phasen umfaßt [Poe89]:

- Aktivierungsphase
- Störungsspezifische Übungsphase

Die *Aktivierungsphase* erstreckt sich über einen Zeitraum von bis zu 6 Monaten nach der Hirnschädigung. In dieser frühen und instabilen Phase findet eine spontane Rückbildung der aphasischen Symptomatik statt. Im Vordergund der therapeutischen Behandlung steht die allgemeine Aktivierung des Patienten. Geeignet sind Behandlungsmethoden, durch die gestörte Sprachfunktionen leichter zugänglich werden und intakte Funktionen ermittelt werden. Oftmals wird versucht, das Sprachverständnis beispielsweise durch auditive Stimulation zu aktivieren.

Die *auditive Stimulation* versucht sprachliche Reaktionen auszulösen. In dieser Phase kann das Modul „Wortabruf" beispielsweise zum Nachsprechen oder lauten Lesen genutzt werden (s. Abbildung 7.23). Ferner sind Aufgaben denkbar, die gezielte Fragen oder Lückensätze beinhalten, die durch den Patienten zu beantworten bzw. zu ersetzen sind. Die Präsentation kann akustisch und/oder schriftsprachlich erfolgen.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit zur Verbesserung von Leistungen des Sprachverständnisses ergibt sich durch Reimaufgaben. Der Patient erhält zunächst ein Zielwort, das alternativ akustisch oder schriftlich präsentiert wird. Anschließend werden anstelle von Hinweisreizen in der Objektbenennung Wörter präsentiert, die entweder eine Reimbeziehung zum Zielwort besitzen oder nicht. Diese können ebenfalls schriftlich oder akustisch präsentiert werden. Die Aufgabe des Patienten besteht darin, die Reimbeziehung zu erkennen und unter Reaktionszeitbedingungen so schnell wie möglich mitzuteilen.

Der Hauptanwendungsbereich des Moduls „Wortabruf" liegt in der *störungsspezifischen Übungsphase*. In dieser Phase sind Spontanerholungseffekte nur noch geringfügig zu

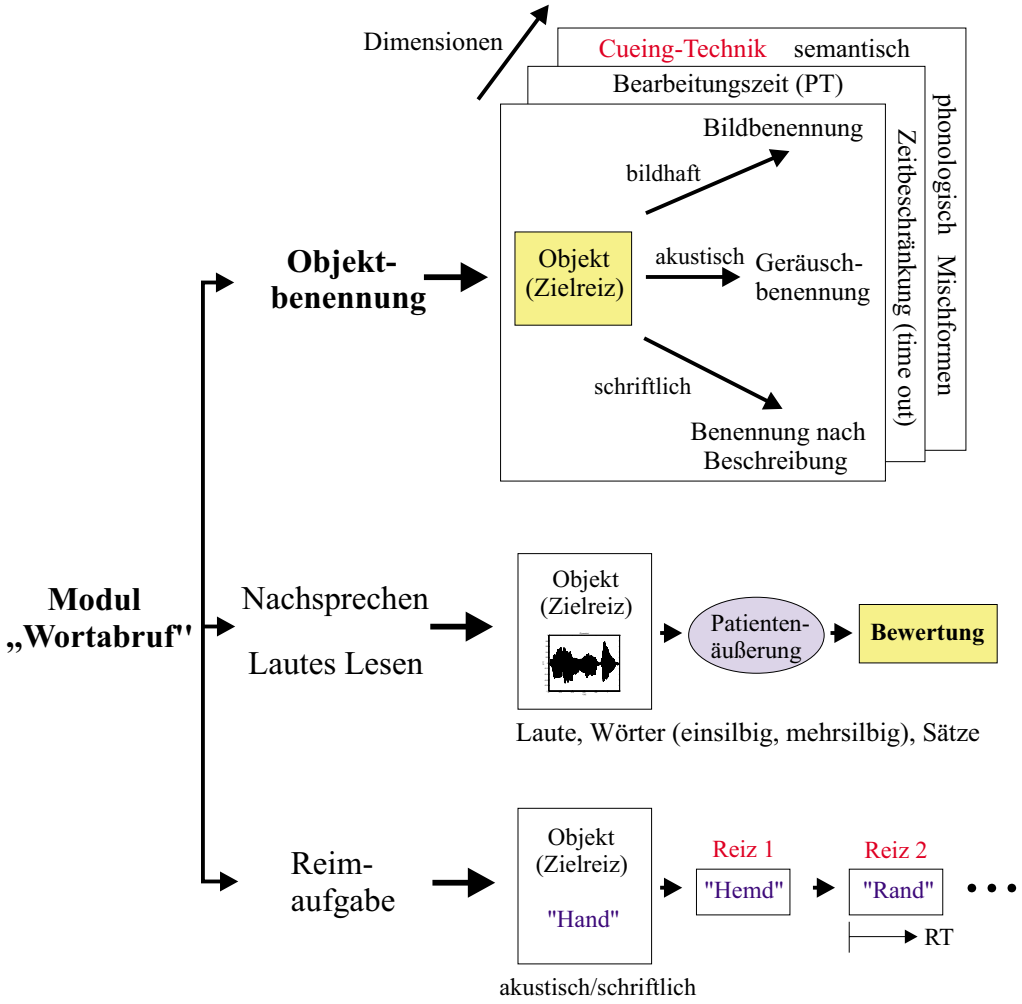


Abbildung 7.23: Anwendungsbeispiele des Moduls „Wortabruf"

beobachten und das Ziel therapeutischer Interventionen liegt im gezielten in Gang setzen sprachlicher Vorgänge. Dabei werden einzelne sprachliche Leistungen systematisch geübt (z.B. Wortabruf durch Objektbenennung, Reimaufgabe).

Kapitel 8

Systemmodul „Akustische Raumrepräsentation”

Der folgende Abschnitt beschreibt den Aufbau und die Realisierung des Systemmoduls „Akustische Raumrepräsentation”. Mit dem Modul können räumliche Wahrnehmungs- und Gedächtnisleistungen unter klinischen Bedingungen bestimmt werden. Die Zielgruppe besteht aus Patienten mit Störungen in der räumlichen Verarbeitung, deren Diagnostik sich bislang auf den visuellen bzw. taktilen Sinneskanal konzentriert. In insgesamt fünf Submodulen werden Experimente entwickelt, mit denen räumliche Hörleistungen systematisch untersucht werden können und die bereits klinisch erprobt wurden. Die experimentelle Vorgehensweise berücksichtigt dabei bestehende Abhängigkeiten zwischen sensorischen Informationen unterschiedlicher Sinneskanäle (z.B. visuell $\leftrightarrow$ akustisch). Neben diagnostischen Fragestellungen wird dadurch die Entwicklung therapeutischer Ansätze gefördert. Nach einer Beschreibung der *Problemstellung* und des *Lösungsansatzes* folgen Erläuterungen zum *Aufbau* und zur *Gestaltung* der Einzelexperimente. Ergebnisse des klinischen Einsatzes werden jeweils am Ende dargestellt, wobei ergänzend Anregungen für den weiterführenden Einsatz gegeben werden.

8.1 Problemstellung und Lösungsansatz

Im Gegensatz zum visuellen Sinneskanal, in dem wesentliche Erkenntnisse über die visuell-räumliche Informationsverarbeitung durch den Einsatz computerbasierter Systeme erzielt werden konnten (z.B. [KM95, WES98]) ist die Analyse räumlich-akustischer Fähigkeiten beim Menschen sowohl bei Gesunden als auch bei Patienten mit peripheren und zentralen Störungen des Nervensystems weit weniger fortgeschritten (vgl. Abschnitt 3.3).

Eine Ursache für diese Entwicklung ist der Mangel an technischen Möglichkeiten zur Darbietung und Registrierung räumlich-akustischer Reize auf einem ähnlich hohen Niveau wie in der visuellen Modalität. Diese sind in der Akustik noch wenig verbreitet oder auf wenige, gut ausgestattete psychoakustische Labors beschränkt, die jedoch

meist *nicht* mit hirngeschädigten Patienten arbeiten. Im klinischen Umfeld stehen diese Laborbedingungen nur in Ausnahmefällen zur Verfügung, weshalb sich Untersuchungen des akustischen Sinneskanals im wesentlichen auf folgende Verfahren beschränken (vgl. Abschnitt 3.4.5):

- dichotische Hörtests
- akustische Diskriminationstests mit sprachlichem und nichtsprachlichem Material

Diese Verfahren werden vorwiegend im Bereich der Hemisphärendominanzforschung[1] an Gesunden eingesetzt, sind aber wegen inkonsistenter Ergebnisse nur bedingt für den Einsatz an Patienten mit räumlichen Störungen geeignet.

Ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der räumlichen Hörleistung ist die *Lokalisationsfähigkeit*, d.h. die Fähigkeit, den Ort eines Schallereignisses möglichst exakt anzugeben. Die experimentelle Bestimmung dieses Parameters erfordert Verfahren zur Erzeugung eines räumlichen Höreindrucks. Bislang durchgeführte Studien beschränken sich fast ausschließlich auf die klinisch-experimentelle Forschung, wobei folgende Verfahren angewendet werden:

- lateralisierter Höreindruck über eine Kopfhörerdarbietung
- räumlicher Höreindruck unter Freifeldbedingungen

Im ersten Verfahren wird eine (virtuelle) Verlagerung des Schallereignisses durch Zeit- und/oder Pegelunterschiede zwischen linkem und rechtem Kanal über Kopfhörer erzielt. Das Prinzip beruht auf dem Stereo-Effekt (vgl. Abschnitt 6.1.2). Der Kopfhörer verhindert allerdings weitgehend die akustische Filterfunktion der Außenohren, wodurch ein *im-Kopf lokalisierter* Höreindruck entsteht, der sich auf der Verbindungsachse beider Ohren befindet (vgl. Abschnitt 4.5.1). Der resultierende, seitlich ausgelenkte (lateralisierte) Höreindruck eignet sich nur eingeschränkt zur Bestimmung der Lokalisationsfähigkeit [Bla97]. Dadurch wird die Verallgemeinerung von Untersuchungsergebnissen auf das „natürliche" räumliche Hören erschwert.

Das zweite Verfahren umgeht diesen Nachteil, indem variierende Schalleinfallsrichtungen durch externe, kreisförmig um die Versuchsperson angeordnete, Lautsprecher erzeugt werden. Das Verfahren erfordert allerdings einen hohen apparativen Aufwand, der dadurch erhöht wird, daß zur Vermeidung störender Schallreflexionen ein reflexionsarmer Untersuchungsraum benötigt wird. Diese Bedingungen stehen im klinischen Umfeld oftmals nicht zur Verfügung. Eine weitere Einschränkung betrifft die akustische Auflösung, die durch die Anzahl und Anordnung der Lautsprecher bestimmt ist. In Lokalisationsstudien mit Patienten werden beispielsweise lediglich zwei ([SCGM97])

[1] Erforschung der funktionellen Spezialisierung der Großhirnhemisphären [Poe89]

oder vier Positionen ([PDCB89]) in der vorderen Hälfte der Horizontalebene untersucht. Die räumliche Auflösung beträgt damit z.T. nur 45° und ist deutlich von der Lokalisationsunschärfe des Menschen (ca. $2-3°$ vgl. Abschnitt 4.2.1) entfernt.

Das Modul „Akustische Raumrepräsentation" verfolgt den Ansatz, die Vorteile der Kopfhörerdarbietung mit den Lokalisationsvorteilen des Freifeldhörens unter Umgehung der spezifischen Nachteile zu verbinden. Als Lösungskonzept wird zur Erzeugung des räumlichen Höreindrucks das psychoakustische Verfahren der *binauralen Simulation* angewendet. Die Realisierung erfolgt in einem separaten Modul (vgl. Abschnitt 6). Für den klinischen Einsatz ergeben sich u.a. folgende Vorteile:

- Simulation eines räumlichen Höreindrucks in 5°-Auflösung (Horizontalebene) über Kopfhörer
- Untersuchung von Einflußgrößen des räumlichen Hörens *ohne* Änderung des Schallereignisses

Die hohe räumliche Auflösung des binauralen Systems ermöglicht eine hohe *Testsensitivität*, wodurch auch geringe Abweichungen der räumlichen Hörleistung experimentell erkannt werden können. Die Kopfhörerdarbietung bietet gegenüber dem Hören in freier Umgebung wesentliche Vorteile:

1. Vermeidung störender Einflüsse (z.B. Schallreflexionen)
2. nahezu ideale Kontrolle des akustischen Signals

Ferner bietet der Kopfhörer eine Idealbedingung für die *Untersuchung von Einflußgrößen des räumlichen Hörens*. Unter den Einflußgrößen werden die Eingangsgrößen in das Transformationsmodell der Raumrepräsentation verstanden, das in Abschnitt 3.4.1 beschrieben wurde. Die Verarbeitung räumlicher Information ist danach ein integrativer Prozeß, an dem mehrere Eingangsgrößen (z.B. visuelle, akustische, sensible Information, Position von Augen, Kopf und Rumpf etc.) beteiligt sind. Die experimentelle Fragestellung richtet sich auf die Erkennung von Abhängigkeiten zwischen einzelnen Größen. Bezogen auf die Behandlung räumlich-akustischer Störungen ist interessant, ob und falls ja, in welchem Umfang sich die Variation bestimmter Eingangsgrößen auf die Störung auswirkt. Dies erfordert kontrollierte Untersuchungen, die bei *gleichbleibendem Höreindruck* einzelne Eingangsgrößen systematisch variieren. Unter Freifeldbedingungen kann diese Bedingung nur sehr aufwendig realisiert werden, da sich z.B. durch eine Kopfdrehung der Höreindruck ändert.

8.1.1 Zielsetzung des Moduls

Das Ziel besteht in der Entwicklung experimenteller Verfahren, die geeignet sind, Veränderungen räumlich-akustischer Wahrnehmungs- und Gedächtnisleistungen bei Patienten mit räumlichen Störungen (z.B. Neglect-Störung) unter klinischen Bedingungen zu erfassen. Zu diesem Zweck wurden Experimente in insgesamt fünf Submodulen realisiert:

- „Einstellen der räumlich-akustischen Mitte"
- „Richtungsidentifikation"
- „Lokalisation"
- „Räumlich-akustisches Arbeitsgedächtnis"
- „Intensitäts-/Zeitdauer-/Frequenzdiskrimination"

Jedes Experiment ist anhand klinisch relevanter Parameter konfigurierbar. Unterschiede bestehen hinsichtlich der diagnostischen Fragestellung und der Sensitivität der Verfahren. Beim Entwurf der Experimente werden speziell Anforderungen berücksichtigt, die aus dem Einsatz an hirngeschädigten Patienten resultieren (z.B. Anpassung von Umfang und Komplexität der experimentellen Aufgabe an die Belastbarkeit des Patienten). Nicht zuletzt eröffnet die Variabilität der Experimente kreativen Benutzern die Möglichkeit, bestehende Experimentstrukturen für weitere, hier nicht erwähnte Anwendungen zu adaptieren.

8.2 Experimentelle Parameter

Vor der detaillierten Betrachtung der Einzelexperimente werden an dieser Stelle die wichtigsten experimentellen Parameter zusammengefaßt. Der Überblick beginnt mit „Basisparametern", die durch den Anwender innerhalb vorgegebener Schranken frei gewählt werden können. Im Anschluß daran folgen Parameter, von denen ein Einfuß auf das räumliche Hören vermutet wird und die daher als „Modulationsparameter" bezeichnet werden.

8.2.1 Experimentelle Basisparameter

Jede experimentelle Aufgabe besteht aus der Präsentation eines oder einer Folge von akustischen Signalen, die nachfolgend als *Basisstimulus* bzw. *Basisstimuli* bezeichnet werden. Die Basisstimuli werden durch die binaurale Simulation „richtungsgefiltert" und sind somit Träger einer spezifischen Richtungsinformation. Folgende Basisparameter stehen zur Verfügung:

- Wahl des akustischen Signals (Basisstimulus)
- Richtung des Schallereignisses (5°-Auflösung in der Horizontalebene)
- Dauer und Intensität des Basisstimulus (Anzahl der Abtastwerte, Aussteuerungsgrad des Signals)
- Bestimmung des ISI (Inter-Stimulus-Intervall, zeitlicher Abstand zwischen zwei Basisstimuli)

- Manuelle oder randomisierte Sortierung der Aufgaben
- Festlegung der Aufgabenanzahl je räumlicher Position
- Einfügen regelmäßiger und/oder unregelmäßiger Pausen
- Anpassung der Bildschirmgestaltung (Patient-System-Schnittstelle)
- Aufzeichnung von Reaktionszeiten (ms-Auflösung)
- Probandenreaktion (Maus, Touchscreen oder verbal)

In Untersuchungen der räumlich-akustischen Wahrnehmung ist es zweckmäßig, neben der Richtung weitere Parameter des präsentierten Audiosignals (Basisstimulus) zu verändern. Das Systemmodul ermöglicht dem Anwender, die zeitliche Länge (ms oder % der Signalgesamtdauer) und/oder die Intensität (dB oder % des Aussteuerungsgrades) des Basistimulus zu variieren.

Neben *Identifikationsaufgaben*, bei denen *ein* Merkmal *eines* Stimulus erkannt bzw. zugeordnet werden soll (z.B. Richtungsidentifikation) sind *Diskriminationsaufgaben* vorgesehen, bei denen der Patient *zwei* akustische Signale hinsichtlich zuvor festgelegter Eigenschaften unterscheiden soll (z.B. Zeitdauer-/Lautstärkediskrimination). Ein Parameter der Diskrimination ist der zeitliche Abstand zwischen dem ersten und zweiten Reiz, der als *ISI (Inter-Stimulus-Intervall)* bezeichnet wird und in ms-Auflösung gewählt werden kann. Das Modul ermöglicht dadurch die *richtungsabhängige* Bestimmung von Diskriminationsleistungen.

Ein weiterer Parameter ist die *Aufgabenreihenfolge* und damit die Reihenfolge der Stimuluspräsentation. Räumliche Störungen werden oft durch Aufmerksamkeitsstörungen begleitet (z.B. [KH97]). In Experimenten können dadurch *Startpositionseffekte* auftreten, d.h. der Ausgang des Experiments ist von der initialen Reizposition[2] abhängig. Zur Kontrolle dieses Effekts und zur Vermeidung von Lerneffekten durch wiederkehrende Aufgabenabfolgen (Wiederholungseffekt) kann die Aufgabenreihenfolge durch den Anwender manuell vorgegeben werden oder mittels eines Randomisierungsalgorithmus[3] zufällig sortiert werden.

Das Experiment kann an beliebigen Stellen unterbrochen werden, etwa wenn Patienten ermüden. Pausen können unregelmäßig (Auslösung durch den Anwender) oder in regelmäßigen Abständen (nach x Aufgaben, ausgelöst durch das System) eingefügt werden. Dadurch werden die Anforderung des Experiments an das Leistungsvermögen des Patienten angepaßt.

Besondere Bedeutung besitzt die *Patient-System-Schnittstelle*, die wesentlich durch den Aufgabenbildschirm definiert ist. Patienten mit räumlichen Störungen besitzen häufig einseitige Vernachlässigungen, die den visuellen Sinneskanal betreffen (vgl. Abschnitt 3.4.2). Die Folge ist, daß relevante Teile des Aufgabenbildschirms visuell nicht

[2] Richtung des ersten Basistimulus

[3] n-maliges Ziehen von n-Elementen ohne Zurücklegen

verarbeitet werden. Dadurch entsteht ein systematischer Meßfehler, der das Ergebnis verzerrt. Das Modul sieht daher Möglichkeiten zur Anpassung des Aufgabenbildschirms vor.

Die Reaktion des Patienten erfolgt abhängig von der individuellen Fähigkeit alternativ durch den Patienten selbst (Maus oder berührungssensitiver Monitor) oder verbal zum Therapeuten. Soweit möglich, ist eine interaktive Einbindung des Patienten vorzuziehen, die meist von positiven psychischen Momenten begleitet wird[4]. Neben den Antworten können Reaktionszeiten (ms) für jede akustische Reizposition bestimmt werden. Die Antwortparameter werden zur Laufzeit des Experiments in der Systemdatenbank abgelegt. Für die elementarstatistische Auswertung stehen Routinen innerhalb des Moduls zur Verfügung. Alternativ können die Ergebnisdaten über eine Datenexport-Schnittstelle exportiert und statistisch weiterverarbeitet werden.

8.2.2 Modulationsparameter

In die experimentelle Untersuchung werden Einflußgrößen des räumlichen Hörens einbezogen, die als *Modulationsparameter* bezeichnet werden. Wie bereits erwähnt ist die räumliche Wahrnehmung ein integrativer Prozeß, in dem

- visuelle, akustische, taktile Information und die
- Relativposition von Augen, Kopf und Rumpf

verarbeitet werden (s. Abschnitt 8.1 bzw. 3.4.1). Ein Erklärungsansatz räumlicher Störungen geht davon aus, daß dieser Prozeß bei Patienten beeinträchtigt ist [KH97]. Ein naheliegender und im visuellen Sinneskanal bereits erprobter Ansatz ist, beobachtete Störungsphänomene (z.B. halbseitige Vernachlässigung von Reizen) durch andere Einflußgrößen zu modulieren (verstärken oder kompensieren).

Als modulierende Parameter des räumlichen Hörens werden im Modul „Akustische Raumrepräsentation" die *Kopf-Rumpf Position* und die *Position der Augen* betrachtet (s. Abbildung 8.1). Zusätzlich wird eine *optokinetische* Untersuchungsbedingung realisiert, in der die räumliche Hörleistung in Abhängigkeit eines bewegten Bildhintergrundes analysiert wird. Dabei ist die Form, Geschwindigkeit und Orientierung der bewegten Objekte variierbar.

Kopf-Rumpf Position

Die Kopf-Rumpf Orientierung kann auf zwei unterschiedliche Arten verändert werden:

a) *Physikalische* Änderung der Relativposition von Kopf und Rumpf. Kombinatorisch entstehen inklusive der Ausgangsposition fünf mögliche Anordnungen, die in Abbildung 8.1 dargestellt sind.

[4] persönliches Erfolgserlebnis im Umgang mit modernen technischen Geräten, trotz bestehender Beeinträchtigungen

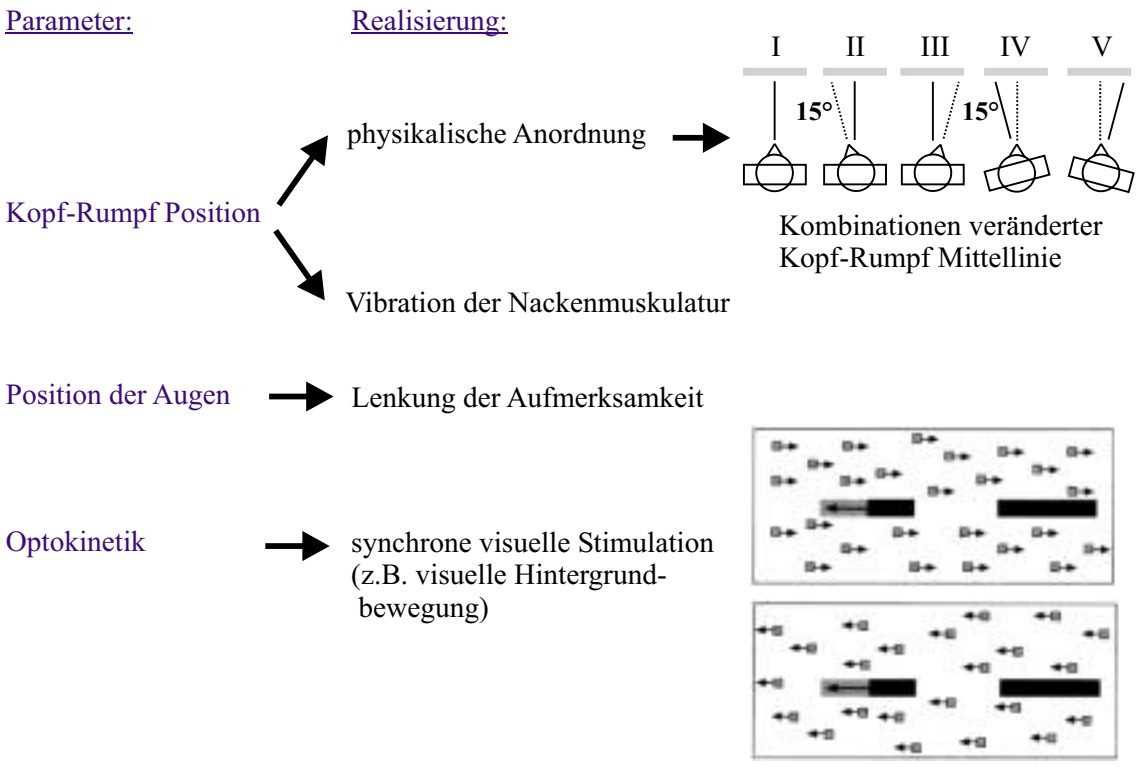


Abbildung 8.1: Modulierende Parameter der räumlich-akustischen Wahrnehmung

b) Änderungen der Kopf-Rumpf Position führen physiologisch zu einseitigen Dehnungen der Nackenmuskulatur. Eine Kopfbewegung kann durch Vibration der posterioren Nackenmuskulatur simuliert werden, wodurch die Illusion einer Längenausdehnung entsteht, die dieser Bewegung entspricht.

Der Einfluß der Kopf-Rumpf Position auf die räumliche Wahrnehmung konnte bislang für Normalpersonen und Patienten mit einseitiger Hirnschädigung (mit und ohne Neglect) im *visuellen* Sinneskanal nachgewiesen werden [KH97]. In der *akustischen* Modalität wurde in Lateralisationsexperimenten bei Normalpersonen ein Einfluß von Kopfbewegungen bei konstanter Rumpfposition beobachtet [LE98b]. Eine Kopfdrehung nach links verlagerte das Hörereignis nach rechts und umgekehrt. Diese Ergebnisse werden durch Studien, in denen die Kopf- oder Rumpfdrehung durch Vibrationen der Nackenmuskulatur simuliert wurde, bestätigt [LKE99]. In beiden Fällen ist eine zur Drehrichtung entgegengesetzte Verlagerung der Hörereignisse zu beobachten.

Augenposition

Wie bereits in Abschnitt 4.3.4 beschrieben, wird die Lokalisation akustischer Signale durch die Stellung der Augen (Blickrichtung) beeinflußt und führt bei Normalpersonen zu einer gegensinnigen Verlagerungen der Hörerignisse. Die Größenordnung der Verlagerung wurde experimentell bestimmt und beträgt $1° - 8°$ bei einer seitlichen

Augenstellung von 45° [LE96]. Mit der Augenposition steht damit ein weiterer Modulationsparameter für die experimentelle Untersuchung zur Verfügung.

Optokinetik

Bei optokinetischer Stimulation wird simultan zum eigentlichen Experiment ein visueller Bewegungsreiz dargeboten. Abbildung 8.1 zeigt ein Beispiel aus der *visuellen* Neglectforschung. Der Patient hat die Aufgabe, die Länge des linken Balkens so zu verändern, daß linker und rechter Balken gleich lang sind. Ohne visuellen Bewegungsreiz unterschätzen die Patienten die Länge des linken Balkens, was generell in zu großen Längenangaben resultiert. Eine rechtsgerichtete Hintergrundbewegung verstärkt diesen Längenfehler, d.h. der linke Balken muß weiter vergrößert werden, während eine linksgerichtete Bewegung zu einer Kompensation führt [Ker99]. Bei Normalpersonen wird allerdings *kein* optokinetischer Einfluß festgestellt. Der optokinetische Ansatz läßt sich auch in Untersuchungen zum räumlichen Hören integrieren. Dadurch werden insbesondere Fragen nach dem funktionalen Zusammenhang visueller und akustischer Informationsverarbeitung angeregt.

Obwohl der modulierende Einfluß dieser Parameter bei hörgesunden Probanden bestätigt wird, sind die Abhängigkeiten bei Patienten mit räumlichen Störungen noch weitgehend unerforscht. An die experimentelle Untersuchung räumlich-akustischer Leistungen können daher folgende forschungsleitende Fragen gerichtet werden:

1. Wie verändert sich der räumliche Höreindruck durch die Variation der Modulationsparameter?
2. Können krankheitsbedingte Verlagerungen des Höreindrucks beeinflußt, evtl. kompensiert werden?
3. Decken sich die Beobachtungen mit Erkenntnissen bei Normalpersonen?
4. Welche Abhängigkeit besteht von der Störungsform des Patienten?
5. Können kompensatorische Einflüsse für therapeutische Ansätze genutzt werden?

8.3 Aufbau und Gestaltung

8.3.1 Struktur des Moduls

Experimentelle Struktur

Abbildung 8.2 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Systemmoduls. Insgesamt wurden fünf experimentelle Submodule entwickelt, die sich in der Struktur und diagnostischen Zielsetzung unterscheiden. Neben Experimenten zur *räumlich-akustischen*

Wahrnehmung, mit denen systematische Lokalisationsfehler erkannt werden können (Richtungsidentifikation, Räumliche Mitte, Lokalisation), ermöglichen Diskriminationsaufgaben die richtungsabhängige Bestimmung von Hörleistungen in Abhängigkeit von weiteren akustischen Parametern (z.B. Schwellenbestimmung bei Intensitäts-/Zeitdauer-/Frequenzdiskrimination). Ferner kann das *räumlich-akustische Arbeitsgedächtnis* überprüft werden. Leistungen des Arbeitsgedächtnisses beinhalten das kurzfristige Behalten, Verarbeiten und spätere Erinnern von Informationen. Während bei den vorangegangenen Experimenten eine enge zeitliche Reiz-Antwort-Relation besteht (Reaktionen des Patienten erfolgen unmittelbar an die Reizdarbietung) wird diese durch das Einfügen einer variablen Pause (*Delay*) zur Prüfung von Funktionen des Arbeitsgedächtnis aufgeweitet.

Für die Erzeugung der räumlich-akustischen Stimuli wird das in Abschnitt 6 beschriebene binaurale Simulationssystem SPATIAL TOOLBOX verwendet, wobei beide Systemanteile aufgrund der spezifischen Anforderungen[5] getrennt und in unterschiedlichen Umgebungen implementiert sind (SPATIAL TOOLBOX im mathematischen Interpreter MATLAB, Experimentelles Modul in einer integrierten Entwicklungsumgebung in der Programmiersprache C++).

Systemtechnische Struktur

Das Modul besitzt eine hierarchische Struktur, die vereinfacht in Abbildung 8.3 dargestellt ist. Jedes der fünf Einzelexperimente (Experimenttypen) gliedert sich in die logischen Komponenten KONFIGURATION, DURCHFÜHRUNG und AUSWERTUNG. Die Komponenten erfüllen experimentübergreifend, abgesehen von spezifischen Parametereinstellungen, identische Funktionen. In der Komponente KONFIGURATION findet die Vorbereitung der experimentellen Untersuchung statt, die im wesentlichen folgende Aktivitäten umfaßt:

- Erstellung und Sortierung von Aufgaben
- Einstellung akustischer Parameter (z.B. akustische Reizposition, Dauer, Intensität)
- Einstellung aufgabenübergreifender Parameter (z.B. Reaktionszeitmessung, Bildschirmgestaltung)

Die einzelnen Aktivitäten werden ausführlicher in Abschnitt 8.3.3 erläutert. In der Komponente DURCHFÜHRUNG werden die Konfigurationsdaten mit spezifischen Durchführungsdaten verknüpft (z.B. Angaben zum Patienten und Therapeuten).

[5] digitale Signalverarbeitung in der SPATIAL TOOLBOX, integrierte Datenbankanwendung mit graphischer Benutzeroberfläche im experimentellen Modul

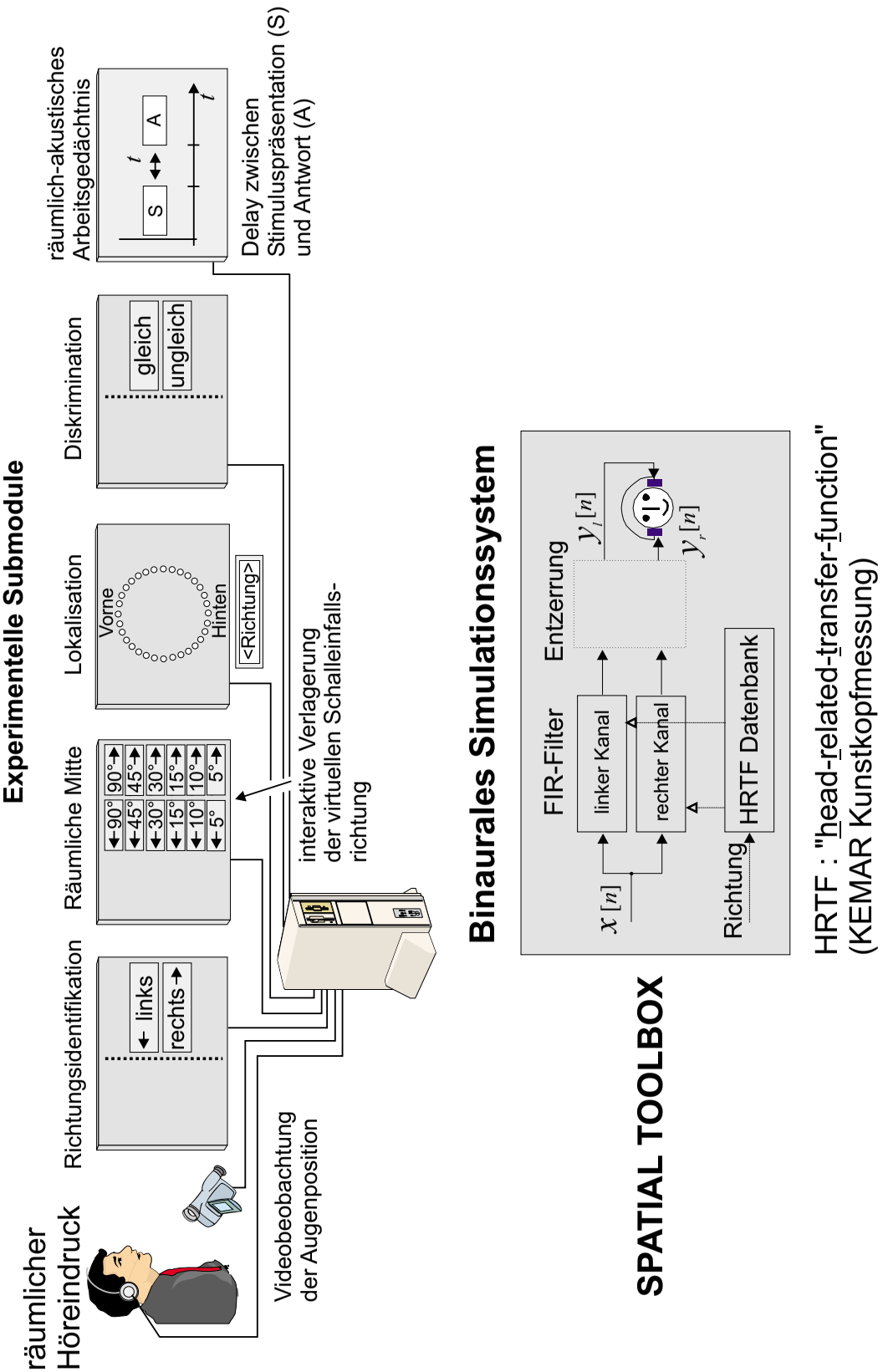


Abbildung 8.2: Prinzipschaubild des Moduls „Akustische Raumrepräsentation"

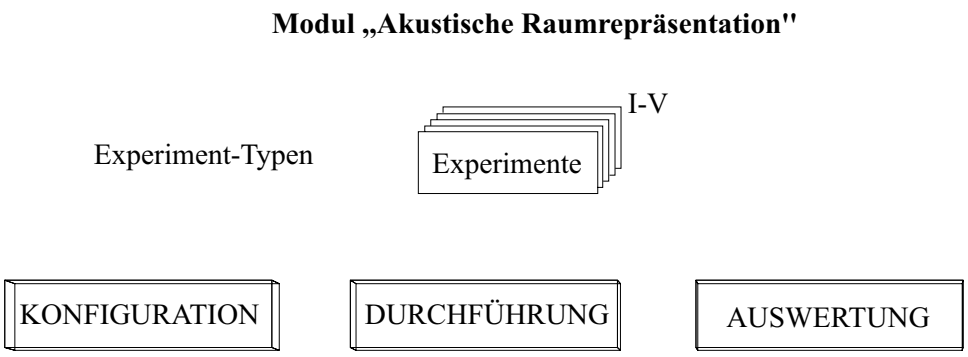


Abbildung 8.3: Logische Komponenten des Moduls „Akustische Raumrepräsentation"

Eine implementierte Experimentsteuerung ermöglicht dem Anwender, den experimentellen Ablauf durch Einfügen von Pausen und Überspringen von Aufgaben zu kontrollieren. Während der Durchführung des Experiments werden die Antwortdaten des Patienten aufgezeichnet und in der Systemdatenbank gespeichert. Zur Analyse und Ergebnisbewertung verfügt die Komponente AUSWERTUNG über eine graphische Datenaufbereitung. Die Ergebnisdaten können alternativ für die statistische Weiterverarbeitung exportiert werden (binär oder ASCII-Format). Nähere Erläuterungen hierzu finden sich in den Abschnitten 8.3.4 und 8.3.5.

8.3.2 Untersuchungsablauf und Bedienung

Das Systemmodul unterstützt eine strukturierte Vorgehensweise in der experimentellen Untersuchung. Abbildung 8.4 verdeutlicht den Untersuchungsablauf in Teilschritten.

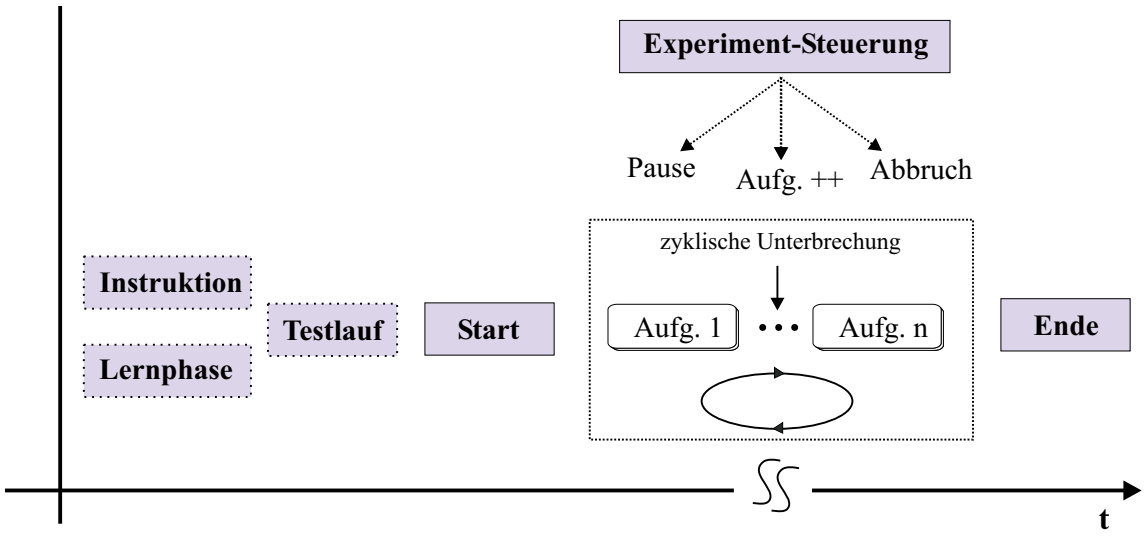


Abbildung 8.4: Untersuchungsablauf im Modul „Akustische Raumrepräsentation" in Teilschritten

Unter der Voraussetzung, daß das Experiment im Vorfeld konfiguriert wurde und typische Angaben zum Patienten (Name, Alter, Krankheitsbeschreibung, etc.) als Datensatz in der Systemdatenbank vorhanden sind, beginnt die Untersuchung optional mit einer *Instruktion*. Diese hat den Zweck, den Patienten mit der Aufgabenstellung vertraut zu machen und ihm die weiteren Schritte zu erklären. Obwohl im klinischen Einsatz meist ergänzende Hinweise durch den Therapeuten erfolgen, trägt die Instruktion zur Vereinheitlichung der experimentellen Bedingungen bei. Abbildung 8.5 zeigt beispielhaft den Bildschirm der Instruktion des Experiments „Richtungsidentifikation". Die Instruktion ist abhängig vom Typ des Experiments und steht in modifizierter Form für jedes weitere Experiment zur Verfügung.

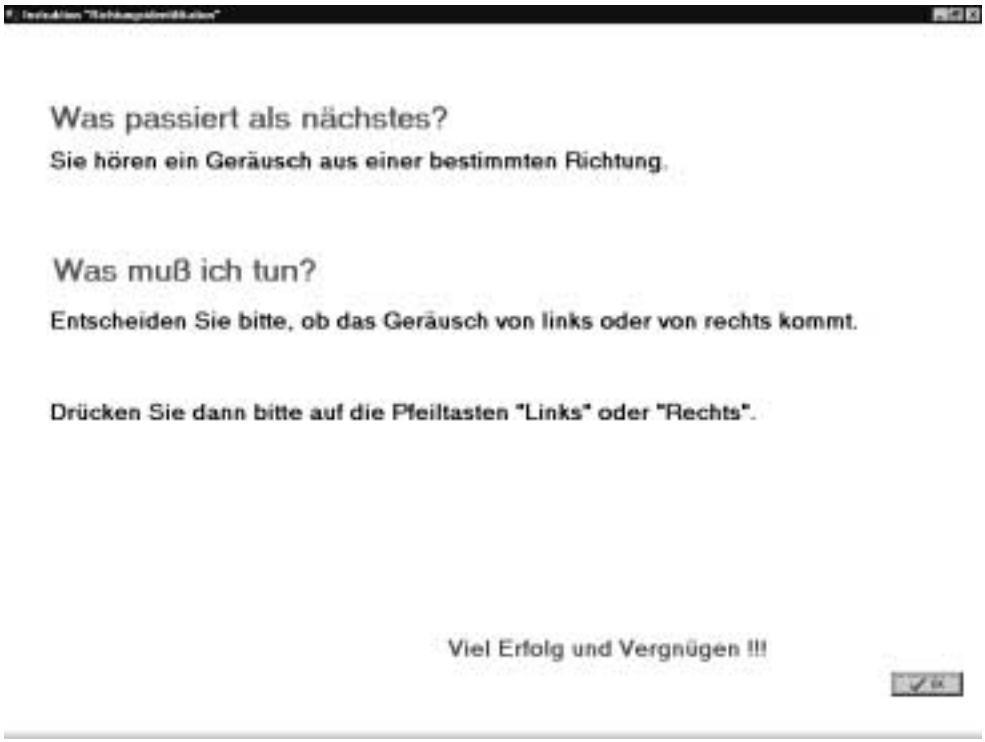


Abbildung 8.5: Instruktion am Beispiel des Experiments „Richtungsidentifikation"

Im nächsten Schritt kann mit dem Patienten eine *Lernphase* durchgeführt werden. Das Ziel der Lernphase besteht darin, dem Patienten *a priori* Information über das akustische Signal zu geben. Zu diesem Zweck wird das in der Untersuchung verwendete Signal (Basisstimulus) aus unterschiedlichen Richtungen präsentiert. Der Patienten erhält einen Eindruck über die Signalcharakteristik (z.B. bandbegrenztes Rauschen) und erfährt, wie sich das Signal aus unterschiedlichen Richtungen anhört, wodurch ein Bekanntheitsgrad entsteht. Der Einfluß des Bekanntheitsgrads auf das Ergebnis des Experiments kann durch die optionale Auswahl der Lernphase systematisch untersucht werden. Mit Bezug auf das vereinbarte Raumkoordinatensystem in Abbildung 4.2 stehen zwei unterschiedliche Vorlagen zur Verfügung:

- Horizontale Vollebene ($0° - 360°$)

- Horizontale Halbebene ($270° - 90°$)

Die Unterscheidung zwischen Voll- und Halbebene berücksichtigt die aus psychoakustischer Sicht zweckmäßige Unterscheidung zwischen räumlichen Hören in der vorderen („front space") und hinteren Halbebene („backspace"). Während die Lokalisation in der vorderen Halbebene vor allem auf der Auswertung interauraler Merkmale beruht, müssen für das Hören im hinteren Halbraum zusätzlich monaurale (spektrale) Merkmale berechnet werden, die für die Unterscheidung vorne/hinten relevant sind (vgl. Abschnitt 4.3).

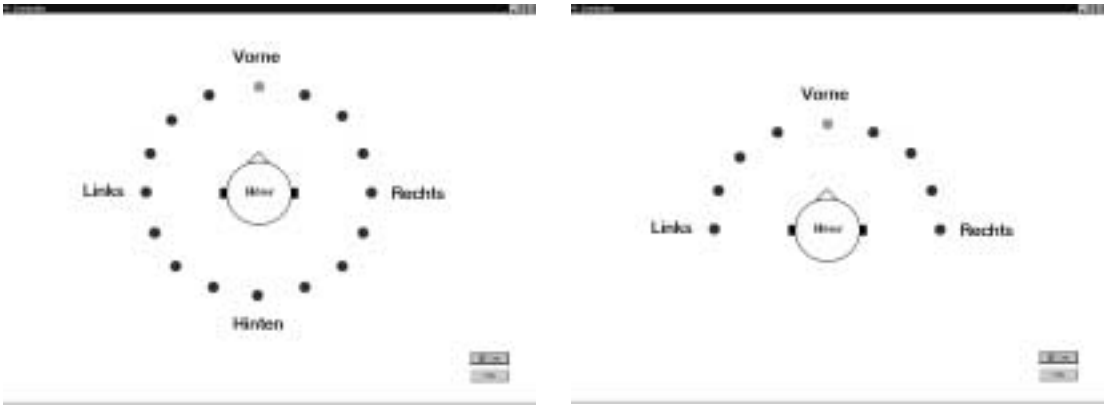


Abbildung 8.6: Lernvorlagen im Modul „Akustische Raumrepräsentation"; links: horizontale Vollebene, rechts: vordere horizontale Halbebene; systemgesteuerte Reizwiedergabe aus den mit Punkten markierten Positionen

Im Anschluß daran beginnt das Experiment optional mit einem *Testlauf*, der aus einer Folge konfigurierter Aufgaben besteht (vgl. Abschnitt 8.3.4). Der Testlauf findet unter identischen Bedingungen wie die nachfolgende Untersuchung statt[6] und bietet dem Patienten die Möglichkeit, mit dem Experiment vertraut zu werden. Schwierigkeiten werden somit frühzeitig erkannt und können z.B. durch eine geänderte Konfiguration des Experiments umgangen werden.

Die Untersuchung startet nach Abschluß des Testlaufs (*Start*) und besteht aus der Präsentation der konfigurierten Aufgaben 1 bis n. Die *Experiment-Steuerung* bietet dem Anwender Eingriffsmöglichkeiten während der Untersuchung (s. Abbildung 8.7). Der Zugriff erfolgt über die Therapeuten-Konsole, die Bestandteil des Aufgabenbildschirms ist und das Überspringen von Aufgaben (AUFGABEN++) ermöglicht. Die Experiment-Steuerung selbst ist als frei bewegliche Konsole implementiert und bietet Funktionen zur Steuerung des Experiments (START, PAUSE, ABBRUCH) an. Über Statusanzeigen wird der Anwender z.B. über die Anzahl noch durchzuführender Aufgaben informiert. Durch die *Konsistenzprüfung* wird sichergestellt, daß alle benötigten Ressourcen des Experiments (Audiodateien, Steuerelemente des Programms, etc.) verfügbar sind und die Untersuchung nicht systemseitig unterbrochen werden muß.

[6] Ausnahme: keine Aufzeichnung der Patientenreaktion

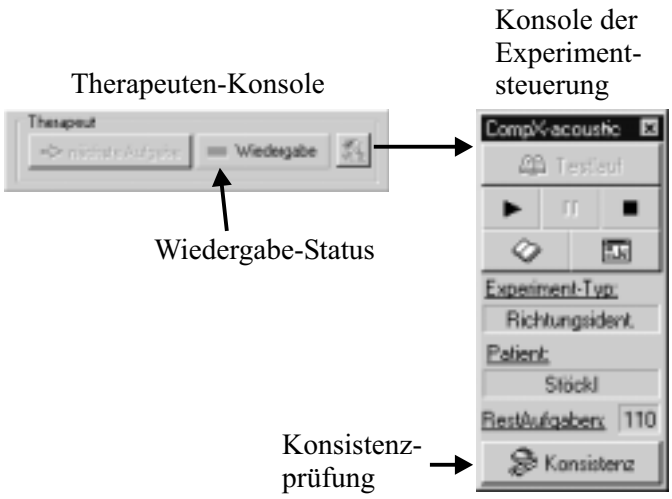


Abbildung 8.7: Realisierung der Experimentsteuerung für die Kontrolle des Untersuchungsablaufs

Zur Laufzeit der Untersuchung werden relevante Antwortdaten des Patienten durch das System aufgezeichnet. Nach Beendigung der letzten Aufgabe (Ankündigung durch ein Dialogfenster) kehrt das System automatisch in den Standardmodus zurück. Von hier aus kann die Analyse der Ergebnisdaten vorgenommen werden.

8.3.3 Experimentkonfiguration

Die Konfiguration des Experiments umfaßt alle erforderlichen Schritte zur Vorbereitung der experimentellen Untersuchung. In der nachfolgenden Darstellung wird zur Übersicht zunächst die Struktur der Komponente Konfiguration erläutert. Die Betrachtung beschränkt sich an dieser Stelle auf Funktionen, die unabhängig vom jeweiligen Experimenttyp sind. Experimentspezifische Eigenschaften, sowie die Realisierung der Konfiguration sind Bestandteil der Abschnitte 8.4 bis 8.7.

Struktur der Systemkomponente Konfiguration

Die Komponente KONFIGURATION dient der Erstellung und Modifikation von Experimenten. Abbildung 8.8 zeigt den Aufbau der Komponente. Systemseitig werden sämtliche benutzerdefinierte Konfigurationsparameter in einem PROJEKT gebündelt[7]. Die Parameter sind klassifiziert, wobei Einstellungen in vier Subkomponenten vorgenommen werden.

Projekt-Konfiguration

Ein PROJEKT besteht aus einer Folge von Aufgaben, die durch eine experimentabhängige Reiz-Antwort-Relation definiert sind.

[7] die Begriffe Experiment und PROJEKT werden im folgenden systembezogen synonym verwendet

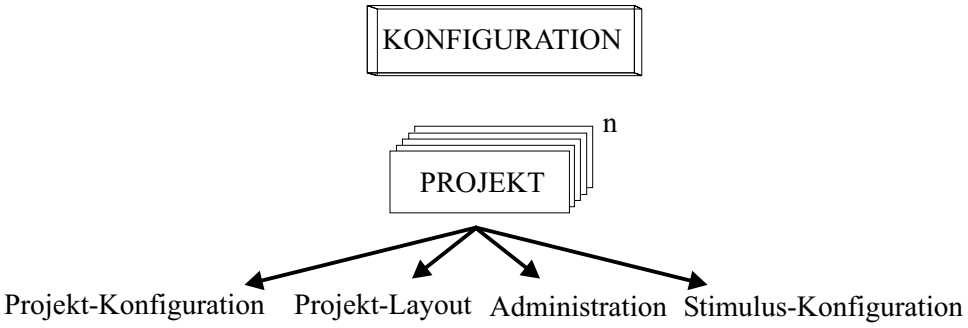


Abbildung 8.8: Struktur der Systemkomponente KONFIGURATION

In der *Projekt-Konfiguration* werden zum einen Einzelaufgaben konfiguriert. Diese Aktivität beinhaltet die Auswahl des akustischen Reizmaterials (Basisstimuli) und die Festlegung akustischer Signalparameter (Richtung, Signaldauer und -intensität). Zum anderen wird die Aufgabenreihenfolge in der Untersuchung festgelegt. Hierzu stehen zwei Alternativen zur Verfügung:

- manuelle Festlegung der Reihenfolge
- zufällige Sortierung der Aufgaben

Im ersten Fall legt der Anwender die Aufgabenreihenfolge fest. Im zweiten Fall wird eine pseudorandomisierte Aufgabenfolge durch das System erstellt. Neben diesen aufgabenspezifischen Parametern werden Einstellungen vorgenommen, die für das gesamte Experiment gültig sind (z.B. Messung der Reaktionszeit, Verwendung von Instruktion und/oder Lernvorlage(n), etc.).

Projekt-Layout

Die Grundidee der Subkomponente *Projekt-Layout* besteht darin, den Untersuchungsablauf als Sequenz einzelner Bildschirme aufzufassen. Die Verwendung des Bildschirms als Beschreibungselement ist aus zwei Gründen attraktiv:

1. Der Bildschirm ermöglicht eine intuitive, graphische Beschreibung
2. Der Bildschirm ist ein zentrales Element der Patient-System-Schnittstelle

Der erste Grund führte zur Implementierung einer übersichtlichen Darstellung aller im Experiment verwendeten Bildschirme (s. Abbildung 8.9). Die angezeigten Bildschirme sind interaktiv, d.h. durch einen Mausklick erhält der Anwender eine vergrößerte, funktionsfähige Darstellung.

Der zweite Grund beruht auf der klinischen Erprobung des Systems. Die untersuchten Patienten mit räumlichen Störungen wiesen Beeinträchtigungen auf, von denen nur

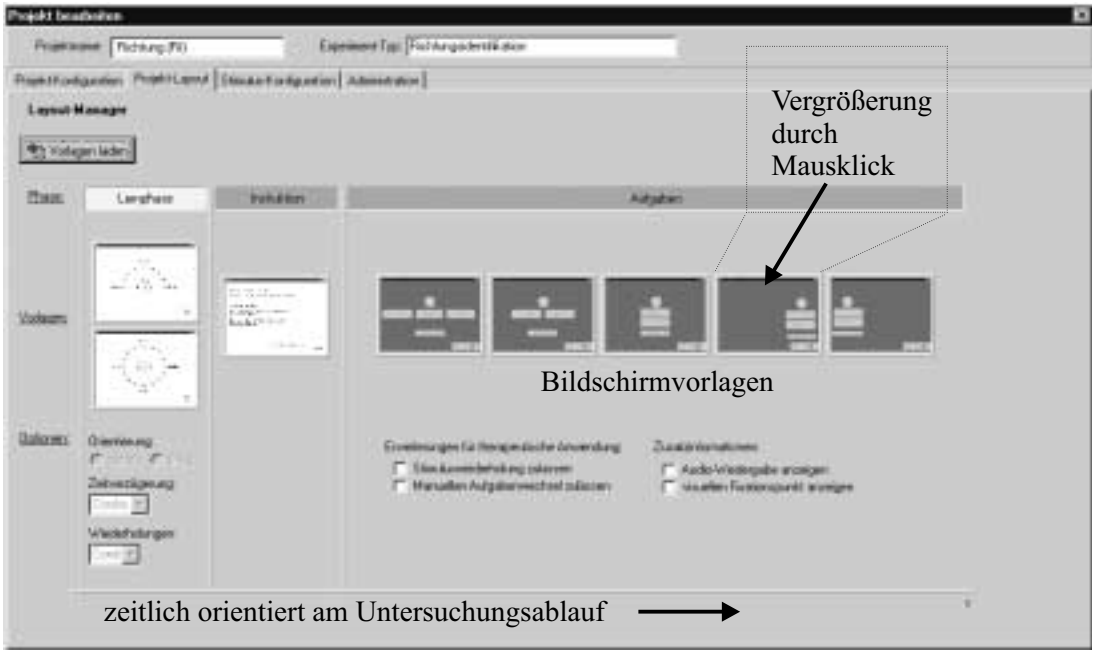


Abbildung 8.9: Realisierung der Subkomponente *Projekt-Layout*

eine Körper- bzw. Raumhälfte betroffen war. Die Folge war, daß Reize in der vernachlässigten Raumhälfte nicht oder nur z.T. wahrgenommen wurden. Von der Vernachlässigung waren sowohl visuelle, akustische als auch taktile Reize betroffen[8]. So konnte bei einigen Patienten - vorwiegend bei Patienten mit visuellem Neglect - beobachtet werden, daß eine Hälfte des Bildschirms nicht wahrgenommen wurde. Antwortbuttons in dieser Bildschirmhälfte wurden nicht beachtet, was zu systematischen Fehlern im Ergebnis des Experiments führte. Dieses Phänomen zeigt deutlich die Objektbezogenheit der Erkrankung. Da das diagnostische Ziel in der Erkennung räumlich-akustischer Defizite liegt, müssen systematische Fehler durch visuelle Nichtbeachtung ausgeschlossen werden. Diese Erkenntnis floß in die weitere Systementwicklung ein, indem für jedes Experiment mehrere Bildschirmvorlagen entwickelt wurden, die im Projekt-Layout zur Auswahl stehen. Neben zentrierten sind zusätzlich exzentrische Positionen für die Antwortbuttons verfügbar. Abbildung 8.10 zeigt die Bildschirmvorlagen am Beispiel des Experiments „Richtungsidentifikation".

Durch die flexible Anordnung der Antwortbuttons ergeben sich weitere Vorteile:

- Eignung für Patienten mit links- *und* rechtsseitiger Vernachlässigung
- Möglichkeit zur gezielten Lenkung der Aufmerksamkeit

Obwohl rechtshirnige Schädigungen mit einer Vernachlässigung der linken Raumhälfte in der klinischen Praxis häufiger auftreten, unterstützt das System durch die links-

[8] supramodale Störung

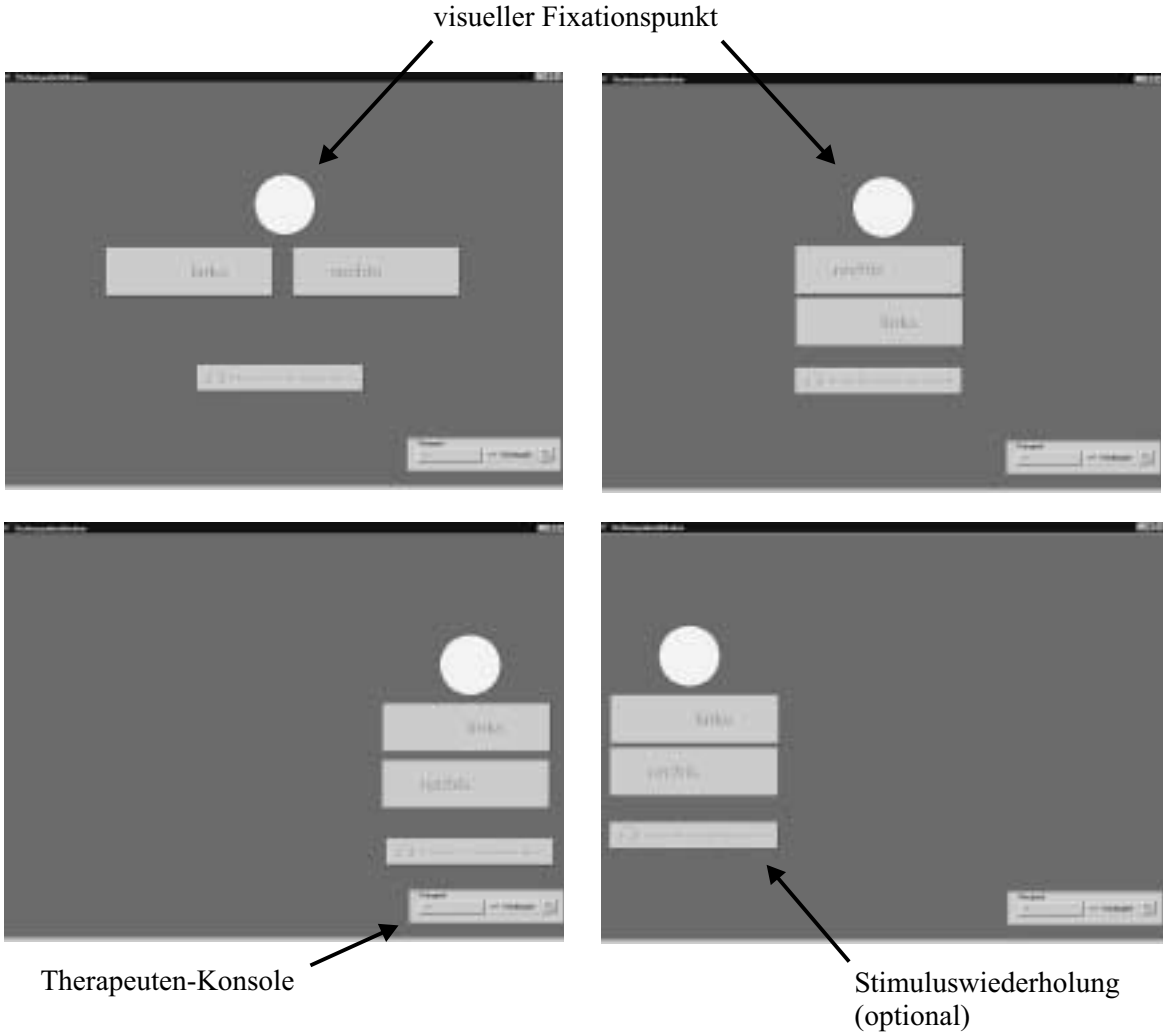


Abbildung 8.10: Bildschirmvorlagen mit variabler Ausrichtung des Bildschirminhalts am Beispiel des Experiments „Richtungsidentifikation"

und rechtsseitige Ausrichtung des Bildschirminhalts die Untersuchung beider Patientengruppen. Gleichzeitig ergibt sich eine sinnvolle experimentelle Erweiterung, indem die Aufmerksamkeit des Patienten bewußt in die vernachlässigte Bildschirmhälfte gelenkt werden kann. Davon wird erwartet, daß ein vorhandener systematischer Wahrnehmungsfehler reduziert wird.

Wie bereits in Abschnitt 8.2.2 erwähnt, ist der räumliche Höreindruck abhängig von der Position der Augen. Zur Kontrolle wurden zwei Maßnahmen ergriffen:

- Implementierung eines visuellen Fixationspunktes
- Videoüberwachung der Augenposition

Während der Untersuchung wird der Patient aufgefordert, die Augen auf den visuellen

Fixationspunkt (s. Abbildung 8.10) zu richten. Zur Überwachung wird eine hochauflösende, zoomfähige Videokamera verwendet (s. Abbildung 8.2, Adjustierung erfolgt vor der Untersuchung z.B. während des Testlaufs). Das Videosignal kann entweder simultan zur Untersuchung aufgezeichnet werden oder in Echtzeit auf einem separaten Monitor angezeigt werden. Im letztgenannten Fall wird die Augenposition direkt durch den Untersucher überwacht, der bei Abweichungen unmittelbar in das Experiment eingreifen kann (z.B. Experiment unterbrechen und Patienten zur erneuten Fixation auffordern).

Administration

In der Konzeption wurde die Benutzung des Systems durch mehrere Anwender berücksichtigt. Jeder Anwender kann Daten „seines" Experiments schützen, an definierte Anwender freigeben oder als „öffentlich" deklarieren, wodurch die gesamte Benutzergemeinde für den Zugriff authorisiert wird. Die Verwaltung der Zugriffsrechte findet in der Subkomponente *Administration* statt, die in Abbildung 8.11 dargestellt ist.

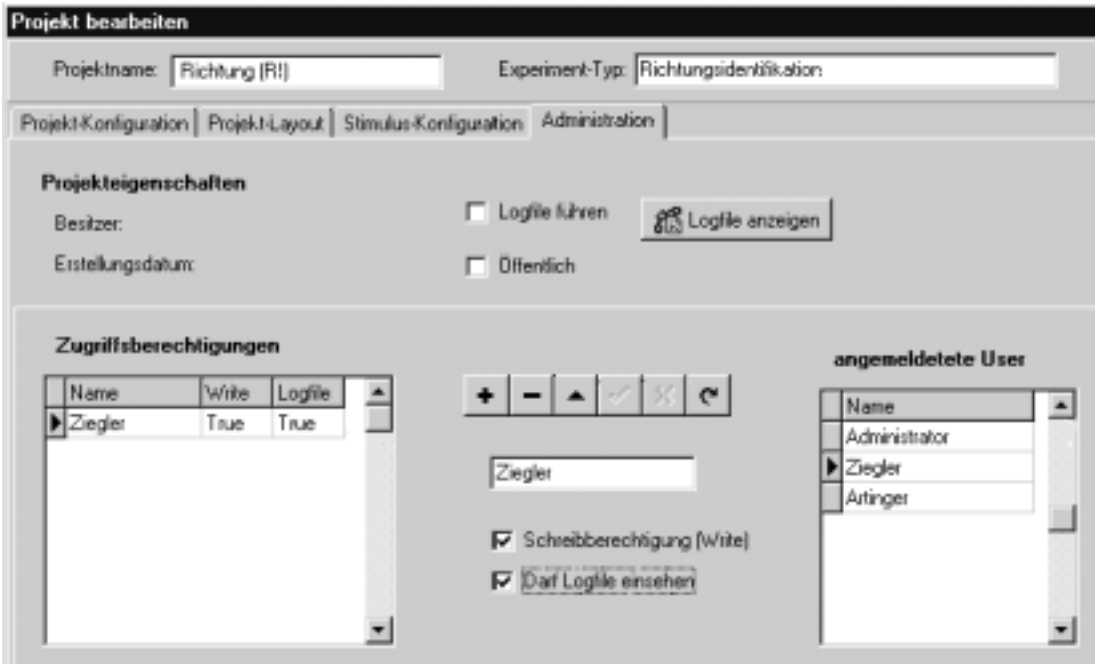


Abbildung 8.11: Verwaltung der Zugriffsrechte auf Projektdaten in der Subkomponente *Administration*

In der Tabelle ANGEMELDETE USER werden alle im System angemeldeten Anwender mit Ausnahme des Projekterstellers, der Besitzer des Projekts ist, aufgelistet. Durch Selektion erhalten weitere Anwender den Zugriff auf Projektdaten des geöffneten Projekts. Dabei wird zwischen Schreibrechten und dem Recht auf Einsehen des LOG-FILES differenziert. Beim LOG-FILE handelt es sich um eine ASCII-Datei, in der sämtliche Projektzugriffe mit Datum und Uhrzeit protokolliert werden.

Stimulus-Konfiguration

Ein Experiment besteht aus mehreren Aufgaben, in denen jeweils akustische Signale aus variierender Richtung präsentiert werden. Aus technischer Sicht werden dabei richtungsgefilterte Audiodaten (Samples) über das akustische Ausgabegerät[9] des PCs abgespielt. Für die Bereitstellung der akustischen Signale gibt es prinzipiell zwei Lösungswege:

1. Richtungsfilterung der Audiodaten in Echtzeit (zur Laufzeit der Untersuchung)
2. Vorabfilterung der Daten und Speicherung in separaten Audiodateien

In der Realisierung des Systemmoduls wurde auf eine Echtzeitfilterung verzichtet. Obwohl die Rechenleistung moderner CPUs[10] eine Echtzeitverarbeitung ohne Nutzung eines externen digitalen Signalprozessors zuläßt, wurde aus Gründen der Abwärtskompatibilität zu Systemen mit niedrigeren Taktraten, wie sie häufig noch im klinischen Umfeld vorzufinden sind, darauf verzichtet.

Alternativ wurde der Lösungsweg der Vorabfilterung gewählt. Im Vorfeld der Untersuchung wird die Audiodatei des Basisstimulus mit Hilfe des Moduls SPATIAL TOOLBOX (vgl. Abschnitt 6) für jede verwendete Reizposition binaural gefiltert. Die enstehende Folge von Audiodateien wird als zentrale Ressource in der Subkomponente *Stimulus-Konfiguration* eingelesen. Dabei werden Dateiname und Pfadangabe als Referenz in die Systemdatenbank eingetragen (s. Abbildung 8.12). Der Speicherort der Audiodateien ist daher nicht auf lokale Laufwerke beschränkt, sondern kann ein Wechseldatenträger (z.B. CD) oder der Fileserver eines lokalen Netzwerks sein. Die Trennung von PROJEKTDATEN und STIMULUSRESSOURCEN ermöglicht eine effiziente Wiederverwendung richtungsgefilterter Audiodateien in beliebigen PROJEKTEN.

Für die Aufnahme eines Basisstimulus in das System sind zusammenfassend folgende Einzelschritte notwendig:

- Erzeugung eines neuen Basisstimulusdatensatzes, dabei Vergabe eines eindeutigen Namens
- Binaurale Simulation aller benötigten Reizpositionen im Modul SPATIAL TOOLBOX (Basisstimulus $\rightarrow$ Folge richtungsgefilterter Audiodateien)
- (automatisiertes) Einlesen der Audiodateien (Dateiname und Pfadangabe) in die Systemdatenbank

Der erzeugte Basisstimulus kann nun experimentübergreifend von allen PROJEKTEN genutzt werden.

[9] gew. Audioerweiterungs-/Soundkarte
[10] Central Processing Unit, Systemprozessor des PCs

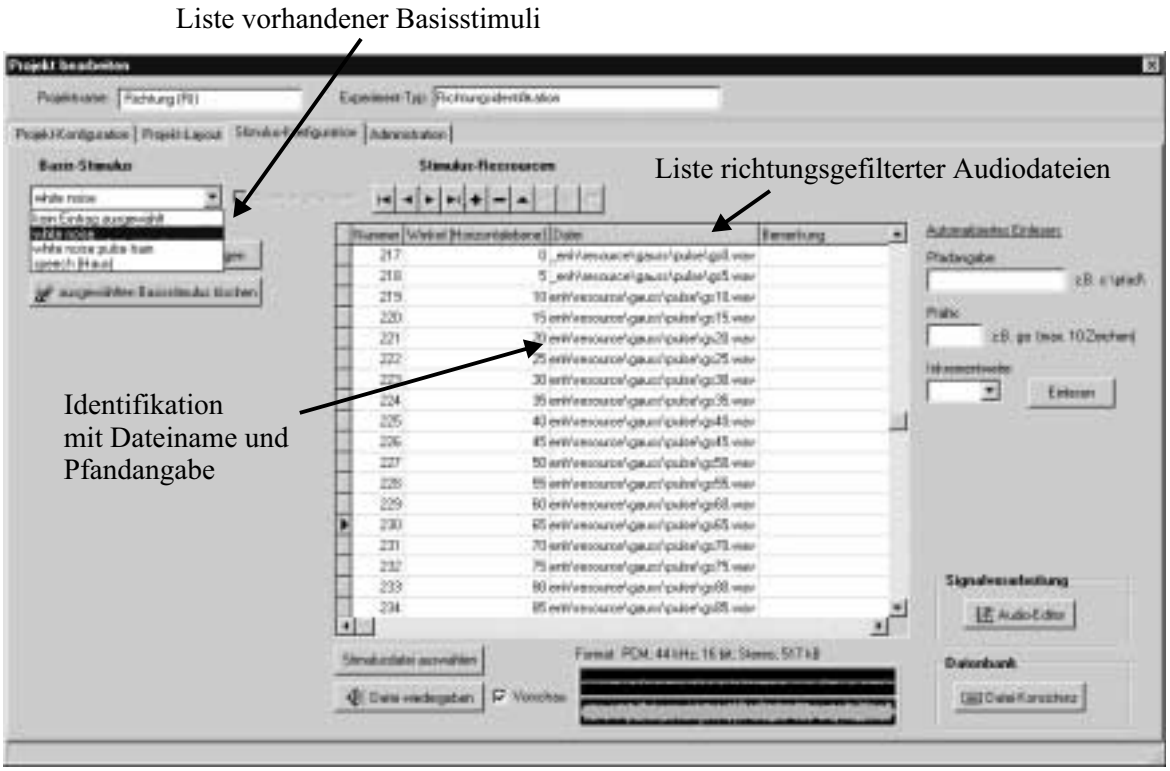


Abbildung 8.12: Konfiguration der Stimulusressourcen in der Subkomponente *Stimulus-Konfiguration*

8.3.4 Experimentdurchführung

In der Systemkomponente DURCHFÜHRUNG wird ein konfiguriertes PROJEKT für die klinische Untersuchung vorbereitet. Dabei werden Daten des PROJEKTS mit untersuchungsspezifischen Daten verknüpft. Zur Laufzeit der Untersuchung werden Antworten des Patienten durch das System aufgezeichnet (z.B. wahrgenommene Hörereignisrichtung, Reaktionszeit, etc.), die im Anschluß daran in der Experimentauswertung analysiert werden können. Im folgenden wird analog zur Experimentkonfiguration (vgl. Abschnitt 8.3.3) die Struktur der Komponente erläutert. Die Darstellung konzentriert sich auf experimentübergreifende Funktionen.

Struktur der Systemkomponente Durchführung

Die Trennung von Konfigurations- und Durchführungsparametern ermöglicht, daß das PROJEKT die Funktion einer Vorlage erfüllt, die mehrfach in Untersuchungen verwendet werden kann (z.B. mit unterschiedlichen Patienten). Abbildung 8.13 verdeutlicht dieses Prinzip. Dabei werden folgende Aktivitäten unterschieden:

- Wahl von Durchführungsparametern

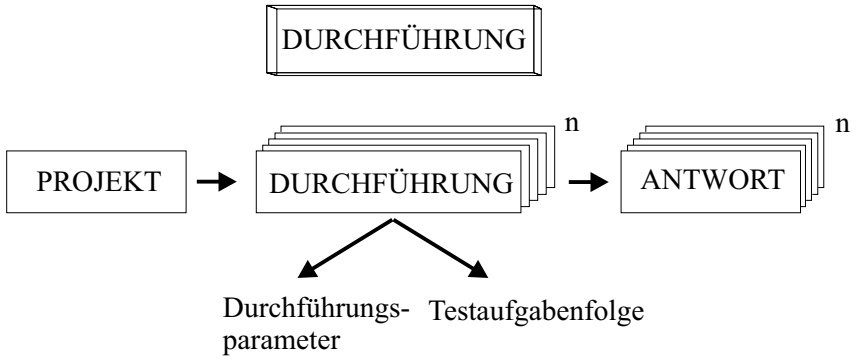


Abbildung 8.13: Struktur der Systemkomponente DURCHFÜHRUNG

- Erstellung von Testaufgaben (optional)

Die wichtigsten Durchführungsparameter sind:

- Patienten-/Therapeutenidentität
- Einstellung regelmäßiger Unterbrechungen

Experimentdurchführungen sind patientenspezifisch, d.h. die DURCHFÜHRUNG wird einem zuvor angelegten Patientendatensatz zugeordnet. Dies ermöglicht u.a. eine patientenbezogene Auswertung der Antwortdaten (s. Abschnitt 8.3.5). Ferner wird festegelegt ob, und falls ja, in welchen Abständen Unterbrechungen durch das System eingefügt werden sollen. Als Abstandsmaß dient die Anzahl durchgeführter Aufgaben. Bei Erreichen des Abstands informiert das System den Anwender mit einer Dialogbox. Den zeitlichen Umfang der Unterbrechung bestimmt der Anwender, da erst nach Bestätigung der Dialogbox fortgefahren wird.

In der DURCHFÜHRUNG wird ferner entschieden, ob der Untersuchung ein Testlauf vorausgehen soll. Falls ja, wird definiert, welche Aufgaben hierfür verwendet werden sollen. Abbildung 8.14 zeigt die Realisierung dieser Aktivität. Die Auswahl der Testaufgaben erfolgt alternativ auf zwei Arten:

- lineare Aufgabenentnahme
- manuelle Aufgabenentnahme

Bei *linearer* Aufgabenentnahme legt der Anwender eine Anzahl von Aufgaben fest, die der Menge konfigurierter Aufgaben des PROJEKTS von Beginn an entnommen werden (z.B. Anzahl 5, d.h. der Testlauf besteht aus den Aufgaben 1 bis 5). Die Entnahme erfolgt *ohne* Zurücklegen, d.h. die Zahl verfügbarer Aufgaben reduziert sich entsprechend. Zur Vermeidung von Wiederholungen beginnt die Untersuchung mit der der letzten Testaufgabe folgenden Aufgabe (im Beispiel Aufgabe 6). Die *manuelle* Aufgabenentnahme ermöglicht eine wahlfreie Konfiguration des Testlaufs (s. Abbildung

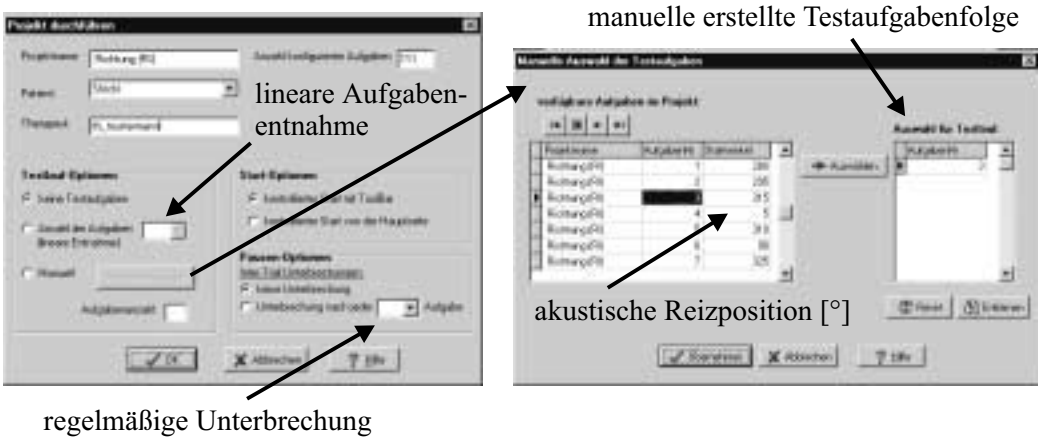


Abbildung 8.14: Durchführungsparameter und Konfiguration des Testlaufs

8.14, rechts). Der Anwender wählt hierzu einzelne Aufgaben aus, die in eine Liste eingetragen werden. Die Entnahme erfolgt *mit* Zurücklegen, d.h. die Aufgabenanzahl der nachfolgenden Untersuchung reduziert sich nicht. Die manuelle Entnahme ist beispielsweise dann sinnvoll, wenn im Testlauf bestimmte Reizpositionen sicher enthalten sein sollen.

Nach der Bearbeitung wird das System in den Durchführungsstatus versetzt, d.h. alle Systemaktivitäten werden unterbunden und die Systemsteuerung geht an die *Experiment-Steuerung* (vgl. Abbildung 8.7) über. Zur Laufzeit der Untersuchung werden experimentabhängige Antwortparameter vom System aufgezeichnet und dem Durchführungsdatensatz zugeordnet (s. Abbildung 8.13). Dadurch wird eine vorwärtsgerichtete Datenstruktur erzielt (PROJEKT-DURCHFÜHRUNG-ANTWORT).

8.3.5 Experimentauswertung

Das Systemmodul verfügt über eine *integrierte Auswertungskomponente* mit der elementarstatistische Parameter bestimmt werden können. Die Komponente bietet dem Anwender gleichzeitig flexible Möglichkeiten zur graphischen Aufbereitung der Antwortdaten. Durch die Implementierung von Datenexportroutinen können die Antwortdaten alternativ auch für eine anschließende Weiterverarbeitung exportiert werden, was vor allem für klinisch-experimentelle Forschungszwecke hilfreich ist. Die Realisierung der Experimentauswertung steht in enger Abhängigkeit zum Einzelexperiment, weshalb sich die nachfolgende Darstellung auf strukturelle und experimentübergreifende Aspekte bzw. Funktionen beschränkt.

Struktur der Systemkomponente Auswertung

Abbildung 8.15 zeigt die Struktur der Komponente AUSWERTUNG. Die Antwortdaten stehen systemintern in Form einer Antworttabelle zur Verfügung. Die Anzahl

der Spalten entspricht dabei der Anzahl der aufgezeichneten Antwortparameter. Bei vollständiger Durchführung des Experiments entspricht die Zeilenanzahl der Anzahl konfigurierter Aufgaben des PROJEKTS.

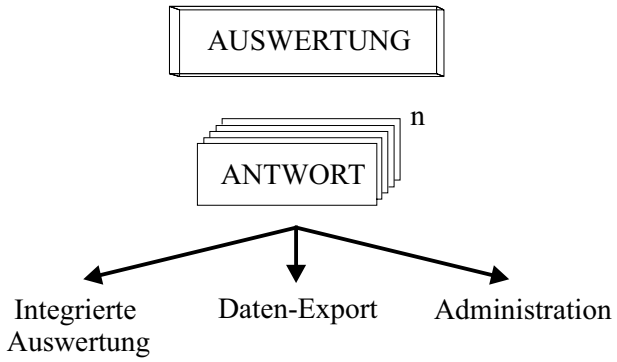


Abbildung 8.15: Struktur der Komponente AUSWERTUNG

Integrierte Auswertung

Die Funktionalität der integrierten Datenauswertung orientiert sich am klinischen Einsatz. Die Auswahl der Ergebnisparameter und der daraus abgeleiteten statistischen Kenngrößen wurde im Rahmen der experimentellen Erprobung ermittelt. Zur diagnostischen Beurteilung kann der Anwender funktionale Abhängigkeiten bzw. Ergebnisverteilungen generieren und sich angezeigen lassen. Die Analyse beschränkt sich dabei auf Daten *einer* Untersuchung bzw. Experimentdurchführung. Die Ergebnisdarstellung erfolgt graphisch, wobei dem Anwender flexible Möglichkeiten der Anpassung zur Verfügung stehen.

Daten-Export

Der Export von Antwortdaten ist auf zwei Arten möglich:

- Datenexport aus der Ergebnisdarstellung heraus
- Nutzung der Datenexport-Schnittstelle

Antwortdaten können zum einen in jeder Ergebnisdarstellung als ASCII-Text exportiert werden. Die Struktur der Daten entspricht dann der der Ergebnisdarstellung. Zum anderen bietet die Datenexport-Schnittstelle die Möglichkeit, die Rohdaten aller aufgezeichneten Antworten untersuchungsspezifisch zu exportieren (ASCII-Format). Die Realisierung dieser Schnittstelle ist in Abbildung 8.16 dargestellt, wobei Exportroutinen für jedes Einzelexperiment verfügbar sind. Die exportierten Daten können anschließend beliebig weiterverarbeitet werden, was insbesondere für das hypothesengeleitete Vorgehen in der experimentellen Forschung erforderlich ist. Auf diese Weise lassen sich z.B. Aussagen über Leistungsunterschiede zwischen einzelnen Patientengruppen hinsichtlich einzelner Merkmale statistisch absichern.

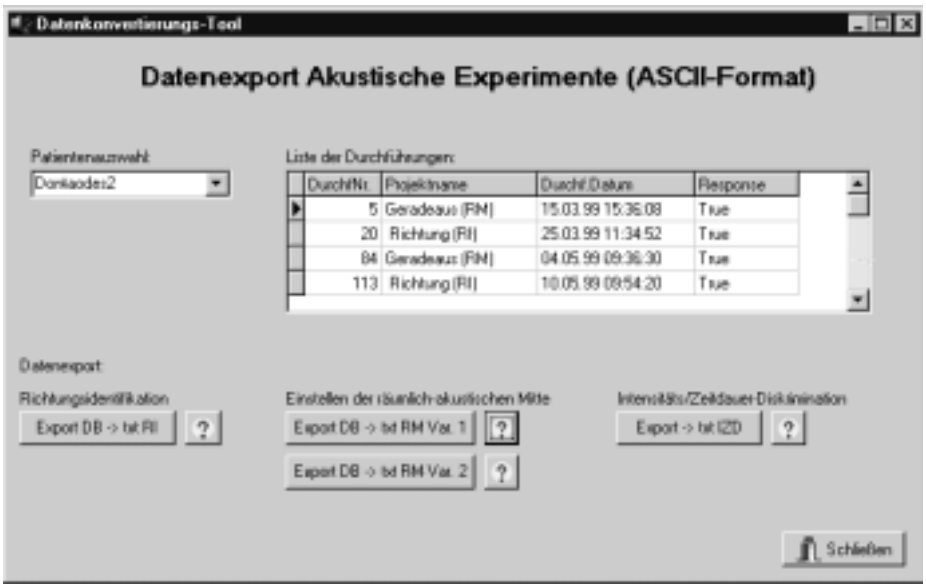


Abbildung 8.16: Datenexport-Schnittstelle

Administration

Die Subkomponente *Administration* dient der Verwaltung von Antwortdaten, die unabhängig von den Durchführungs- und Projektdaten behandelt werden. Der Anwender kann beispielsweise Antwortdaten durchführungs- oder patientenspezifisch löschen.

8.4 Experiment I: „Richtungsidentifikation"

Das Experiment „Richtungsidentifikation" dient zur Untersuchung der subjektiven akustischen Mittenwahrnehmung. Bei Normalpersonen wird ein Hörereignis als „in der Mitte" empfunden, wenn sich die Schallquelle in frontaler Position vor der Versuchsperson befindet und keine interauralen Signalunterschiede vorhanden sind. Im Experiment „Richtungsidentifikation" wird ein akustisches Signal unter Einschluß der frontalen Reizposition aus maximal 72 unterschiedlichen Reizpositionen in der Horizontalebene (Vollebene, 5°-Auflösung) präsentiert. Die Probandenaufgabe besteht aus der unmittelbaren Entscheidung, ob das Signal von links oder von rechts kam (Links-/Rechtsentscheidung). Neben der Anzahl falscher Antworten (Fehlerrate) ist die Reaktionszeit ein relevanter Antwortparameter. Das Experiment besitzt im Vergleich zu den anderen Experimenten den geringsten Schwierigkeitsgrad und ist aufgrund der geringen zeitlichen Anforderungen für Screening-Untersuchungen[11] geeignet.

[11] kurze diagnostische Untersuchung zur Erkennung/Ausschluß spezifischer Beeinträchtigungen

8.4.1 Diagnostische Ziele und Hypothesen

Patienten mit räumlichen Störungen weisen häufig eine einseitige Reizvernachlässigung auf (z.B. [KH97, Ker99], s.a. Abschnitt 3.4.2). Mit dem Experiment „Richtungsidentifikation" wird untersucht, ob diese Beeinträchtigung auch in der Verarbeitung räumlich-akustischer Reize beobachtet werden kann. Ein aussagekräftiger und experimentell bestimmbarer Parameter ist die *subjektive akustische Mittenwahrnehmung*. Während Normalpersonen die akustische Mitte bei frontaler Position des akustischen Reizes wahrnehmen, wird für Patienten eine systematische Verlagerung erwartet.

Zur Bestimmung der akustischen Mittenwahrnehmung werden die Antwortparameter *Fehlerrate* und *Reaktionszeit* zur Laufzeit der Untersuchung aufgezeichnet. Aus Lateralisations- und Lokalisationsexperimenten [BCSV84] ist bekannt, daß die subjektive akustische Mitte durch die Position gekennzeichnet ist, an der die *Fehlerrate ihr Maximum* erreicht. In diesem Bereich wird ebenfalls ein deutlicher Anstieg der Reaktionszeiten erwartet. Die physikalische Begründung für dieses Phänomen ist, daß die interauralen Signalunterschiede, als wesentliche Lokalisationsquelle in der Horizontalebene (vgl. Abschnitt 4.3), bei frontalem Schalleinfall ein *Minimum* aufweisen, wodurch dem Gehör nur wenig Richtungsinformation zur Verfügung steht. Die Lokalisationsentscheidung wird erschwert, was zum Anstieg der Fehlerrate und der für die Entscheidung benötigten Zeit führt.

Aus klinischer Sicht können u.a. folgende Fragestellungen formuliert werden:

- Vergleich der akustischen Mittenwahrnehmung zwischen Normalpersonen, Patienten ohne/mit räumliche(n) Störungen
- Vergleich der räumlich-akustischen Ergebnisse mit denen aus visuell-räumlichen Untersuchungen

8.4.2 Struktur und Leistungsmerkmale des Experiments

Nachfolgende Darstellung gibt zunächst einen Überblick über die Struktur und die Funktion des Experiments. Anschließend werden experimentspezifische Details der Experimentkonfiguration und -auswertung erläutert, die als Ergänzung der experimentübergreifenden Beschreibung in den Abschnitten 8.3.3 - 8.3.5 zu betrachten sind.

Struktur des Experiments „Richtungsidentifikation"

Der prinzipielle Ablauf des Experiments ist am Beispiel einer Aufgabe in Abbildung 8.17 dargestellt. Die Aufgabe gliedert sich in zwei Phasen. In *Phase 1* wird ein akustisches Signal aus einer vorgegebenen Reizposition in der Horizontalebene über Kopfhörer präsentiert. Zur Vermeidung von Lern- und Wiederholungseffekten variiert die akustische Reizposition in jeder Aufgabe.

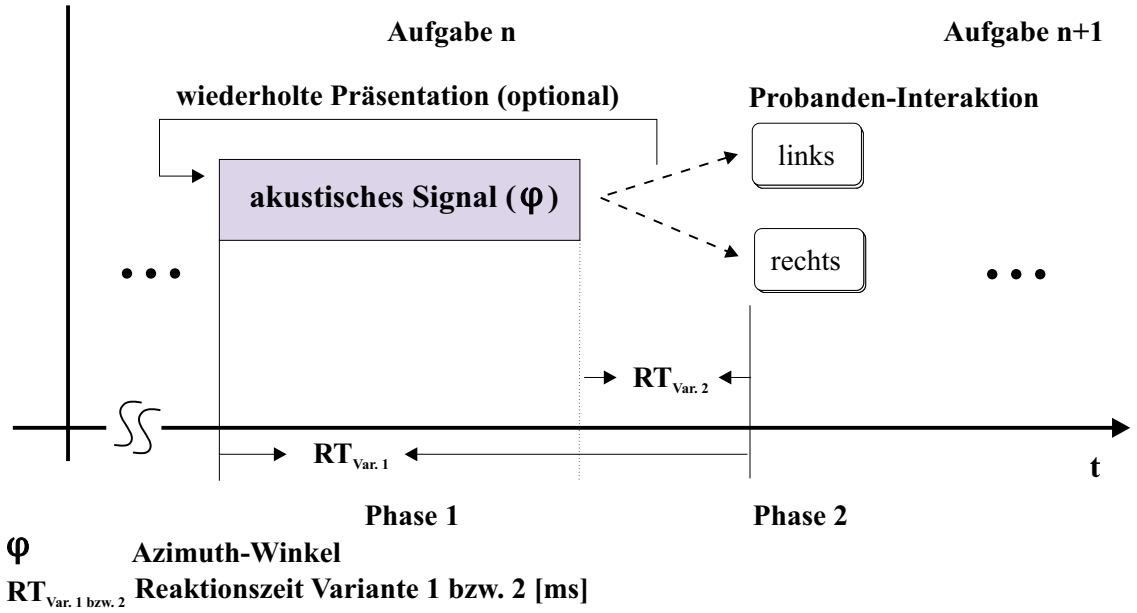


Abbildung 8.17: Struktur des Experiments „Richtungsidentifikation"

Im Anschluß daran wird der Proband in *Phase 2* zur Entscheidung aufgefordert, ob das gehörte Signal von links oder von rechts kam (erzwungene 2-Alternativen-Entscheidung: Links-/Rechts). Kann der Proband die Entscheidung nicht treffen, kann die Reizpräsentation wiederholt werden. Bei entsprechender Konfiguration des Experiments wird neben der Antwort (Links-/Rechts) die benötigte Reaktionszeit (ms-Auflösung) bestimmt und aufgezeichnet. Der Startzeitpunkt der Reaktionsszeitmessung ist alternativ der Beginn oder das Ende der Signalwiedergabe ($RT_{Var.1}$ bzw. $RT_{Var.2}$ siehe Abb. 8.17). Bei Variante 1 kann die Probandenreaktion schon während der Signalwiedergabe erfolgen, während bei Variante 2 die Reaktion erst nach dem Abspielen des akustischen Signals möglich ist. Variante 2 stellt damit sicher, daß der Proband den Reiz in voller Länge gehört hat.

Konfiguration des Experiments „Richtungsidentifikation"

Abbildung 8.18 zeigt die Realisierung der Komponente KONFIGURATION. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, daß sich die Anordnung der Parametereinstellungen von links nach rechts (Abschnitt LERNPHASE/INSTRUKTION und AUFGABENKONFIGURATION) am Untersuchungsablauf (vgl. Abbildung 8.4) orientiert. Die Gruppe OPTIONEN beinhaltet die Festlegung, ob der Untersuchung eine LERNPHASE bzw. INSTRUKTION (vgl. Abbildung 8.5) vorausgehen soll. Falls eine LERNPHASE erforderlich ist, erfolgt in der Gruppen-Box LERNPHASE die Auswahl einer Vorlage, die alternativ die horizontale Halb- oder Vollebene umfassen kann (s. Abbildung 8.6). Die LERNPHASE dient dazu, dem Probanden *a priori* Information über die Signalcharakteristik und die unterschiedlichen Reizpositionen zu geben, wodurch beim Probanden ein Bekanntheitsgrad entsteht.

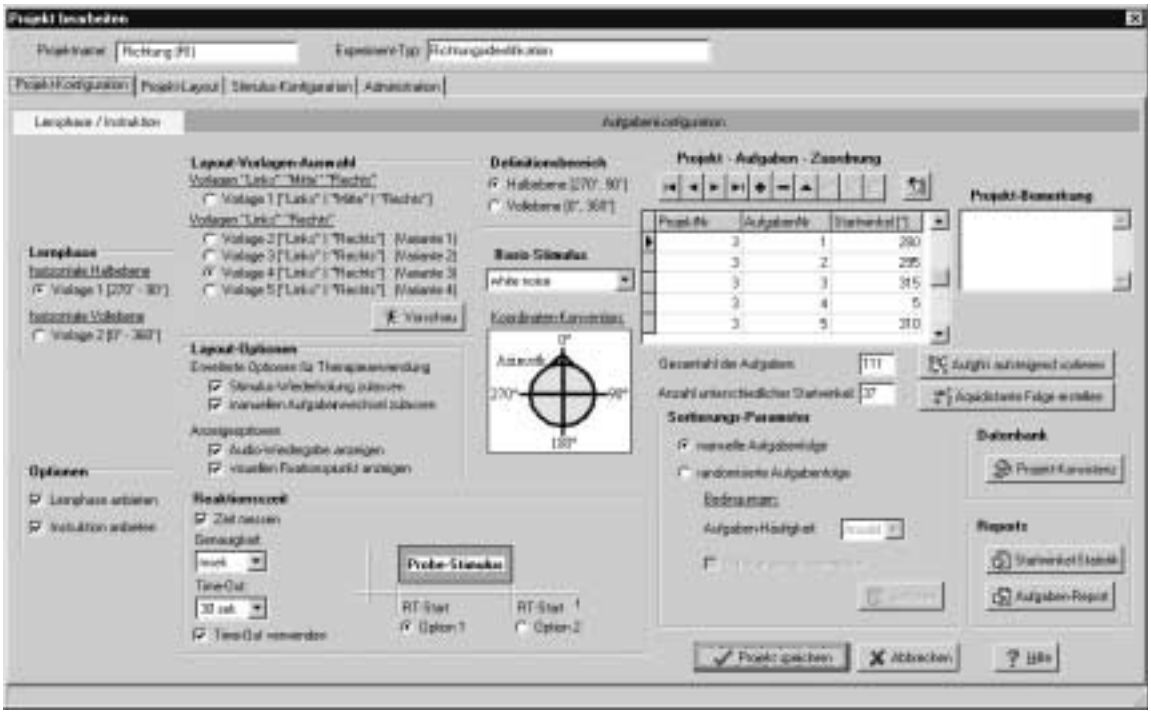


Abbildung 8.18: Konfiguration des Experiments „Richtungsidentifikation"

Der Abschnitt AUFGABENKONFIGURATION beinhaltet die Definition der Aufgaben und die Festlegung aufgabenübergreifender Parameter, die für das gesamte Experiment gültig sind. Im ersten Schritt erfolgt die Anpassung des Aufgabenbildschirms. Hierzu kann der Anwender in der Gruppen-Box LAYOUT-VORLAGEN-AUSWAHL eine Bildschirmvorlage auswählen (vgl. Abbildung 8.10). Durch den elementartigen Aufbau des Aufgabenbildschirms besteht in der Gruppen-Box LAYOUT-OPTIONEN ferner die Möglichkeit, die Anzeige einzelner Elemente zu aktivieren/deaktivieren. Dadurch kann jede Bildschirmvorlage individuell angepaßt werden.

In der Gruppen-Box REAKTIONSZEIT werden folgende Parameter festgelegt:

- Genauigkeit der Zeitmessung (s, ms)
- Beschränkung der Bearbeitungszeit („time-out")
- Beginn der Reaktionszeitmessung

Neben der Auflösung kann die Bearbeitungszeit für jede Aufgabe beschränkt werden („time-out"). Nach Ablauf dieser Zeit wechselt das System automatisch zur nächsten Aufgabe oder beendet die Untersuchung, falls die letzte Aufgabe präsentiert wurde. Die Kontrolle der Bearbeitungszeit trägt zur Standardisierung der Untersuchungsbedingungen bei. Ferner kann der Startzeitpunkt der Reaktionszeitmessung aus zwei Alternativen ausgewählt werden. Im ersten Fall beginnt die Messung zu Beginn, im

zweiten Fall nach Beendigung der Signalwiedergabe. Die Wahl des Startzeitpunkts bestimmt gleichzeitig den zulässigen Zeitraum, innerhalb dem Antworten erfolgen können. Im ersten Fall kann die Antwort bereits während der Signalwiedergabe erfolgen, während im zweiten Fall eine Antwort erst nach dem Ende möglich ist.

Das Experiment bzw. PROJEKT besteht aus einer Folge von Aufgaben, die im nächsten Schritt definiert werden. Hierzu sind folgende Parameter zu bestimmen:

- Basisstimulus (aufgabenübergreifend)
- Definitionsbereich (aufgabenübergreifend)
- STARTWINKEL (aufgaben-individuell)

Der *Basisstimulus* ist das in der Untersuchung verwendete akustische Signal. Die Auswahl aus im System verfügbaren Reizen ist für alle Aufgaben gültig. In der Gruppen-Box DEFINITIONSBEREICH wird unterschieden, ob akustische Reize nur in der vorderen und/oder hinteren Hälfte der Horizontalebene präsentiert werden sollen. Die Aufgabendefinition erfolgt tabellarisch in der PROJEKT-AUFGABEN-ZUORDNUNG. Für jede Einzelaufgabe wird der Parameter STARTWINKEL zugewiesen, der die akustische Reizposition des Basisstimulus in [°] angibt. Aufgaben können auf zwei Arten erzeugt werden:

- manuelle Erstellung
- automatische Erstellung

Bei *manueller Erstellung* werden die Aufgaben durch den Anwender mit Hilfe der über der Tabelle befindlichen Navigationsleiste erzeugt. Im Anschluß daran wird der Startwinkel (abhängig vom Definitionsbereich) ausgewählt[12]. Alternativ kann durch das System eine Aufgabenfolge mit äquidistanten Startwinkeln erstellt werden. Der Winkelabstand beträgt 5° und ist identisch mit der Auflösung des binauralen Simulationssystems (vgl. Abschnitt 6). Dabei wird sichergestellt, daß jede zulässige Reizposition genau einmal auftritt.

Im nächsten Schritt erfolgt die Sortierung der Aufgaben. In der Gruppen-Box SORTIERUNGS-PARAMETER wird entschieden, ob die Aufgabenreihenfolge der Konfiguration in der späteren Untersuchung beibehalten (manuelle Aufgabenfolge) oder zufällig erzeugt wird (randomisierte Aufgabenfolge). Im Fall der Randomisierung kann die Aufgabenhäufigkeit vorgegeben werden. Optional kann der Algorithmus aufgefordert werden, die Nachbarschaft zweier identischer Startwinkel zu vermeiden (Wiederholungseffekt). Abbildung 8.19 zeigt das Ergebnis einer Randomisierung.

Neben den „operativen" Funktionen der Aufgaben- und Experimentkonfiguration stehen Prüf- und Berichtsfunktionen zur Verfügung. Für die Prüfung der Datenkonsistenz

[12]die Aufgabenreihenfolge der Tabelle entspricht der Reihenfolge in der Untersuchung

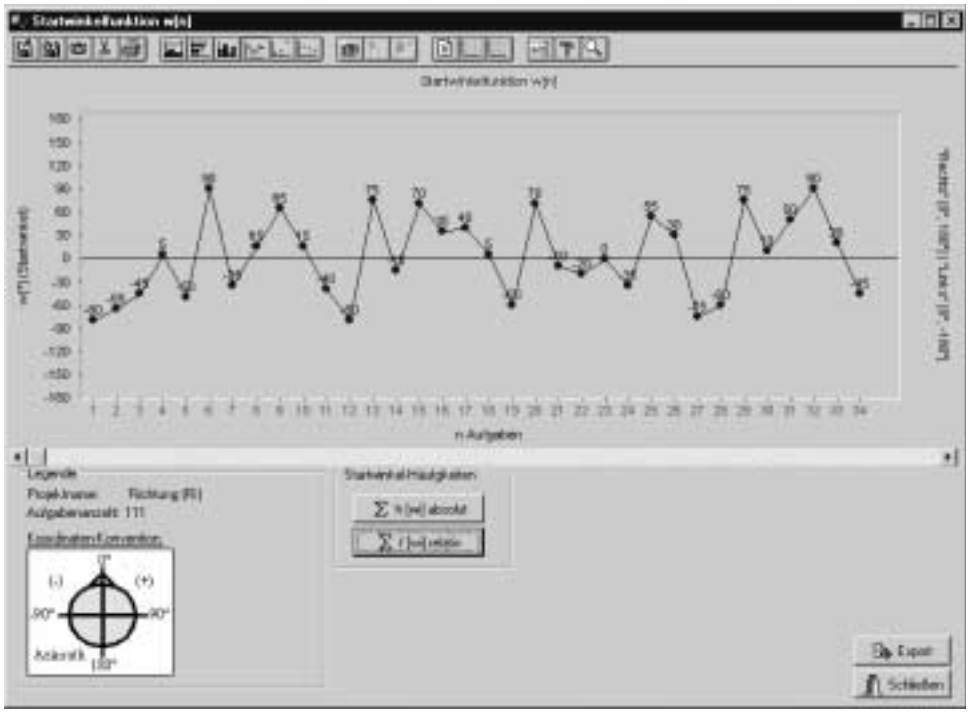


Abbildung 8.19: Akustische Reizpositionen (Startwinkelfunktion) nach erfolgter Randomisierung

(Startwinkel innerhalb des Definitionsbereichs, Verfügbarkeit der Ressourcen) kann ein Prüflauf durchgeführt werden (PROJEKT-KONSISTENZ), der in einem Ergebnisbericht protokolliert wird. Die Konfigurationseinstellungen werden zusammenfassend im AUFGABEN-REPORT dargestellt. Der Bericht kann entweder ausgedruckt oder in binärer Form gespeichert werden.

Auswertung des Experiments „Richtungsidentifikation"

Die integrierte Auswertungskomponente ermöglicht die Ergebnisdarstellung von Einzeluntersuchungen (s. Abbildung 8.20). Die zur Laufzeit der Untersuchung aufgezeichneten Antwortdaten können nach folgenden Parametern analysiert werden:

- Anzahl „korrekter" und „falscher" Antworten[13]
- Anzahl der „links" / "rechts"-Entscheidungen
- Reaktionszeit der Richtungsentscheidung

[13] „korrekt" bedeutet, daß der Proband die Richtung des akustischen Signals korrekt identifiziert hat

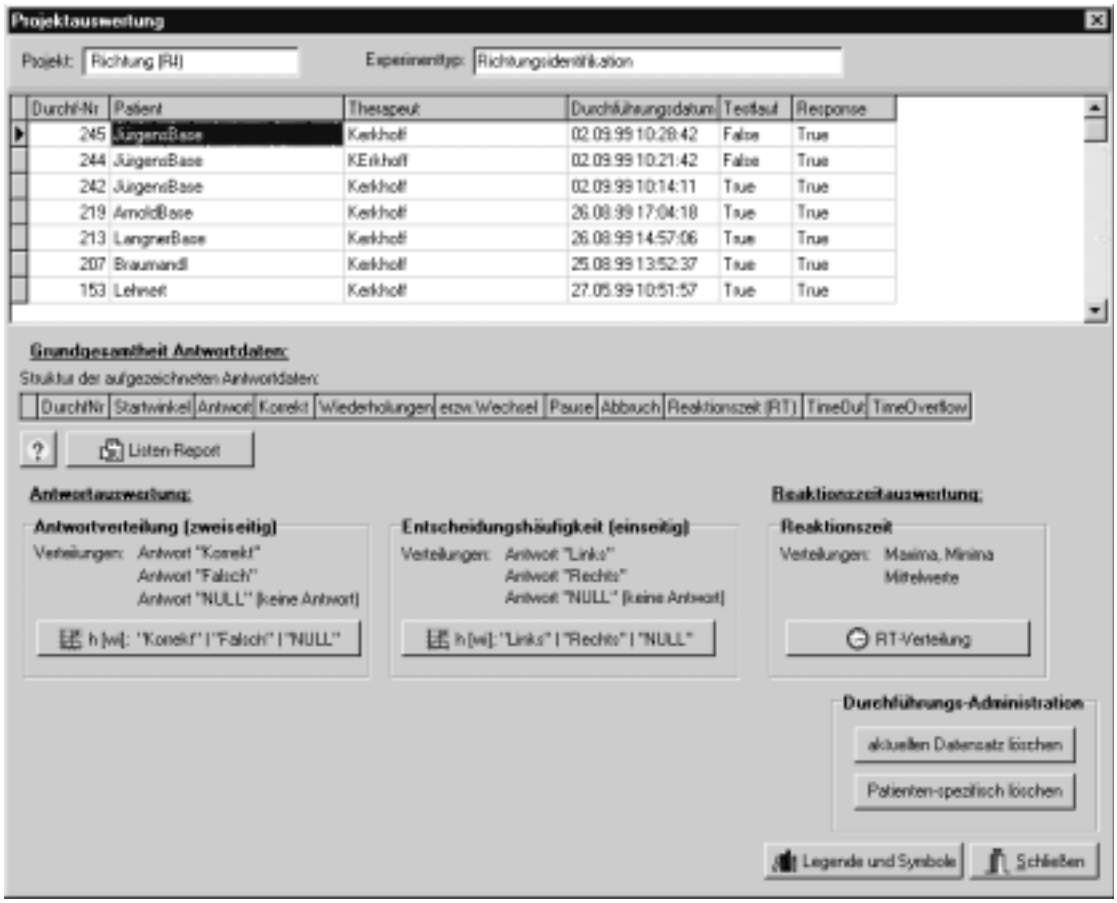


Abbildung 8.20: Integrierte Datenauswertung im Experiment „Richtungsidentifikation"

Die Auswertung erfolgt in Form von Häufigkeitsverteilungen, deren graphische Darstellung durch den Anwender angepaßt werden kann. Kenngrößen der Verteilung (Lage, Symmetrie, Breitbandigkeit) erlauben die Beurteilung, ob systematische Lokalisationsfehler vorliegen.

Im folgenden wird als Beispiel die Untersuchung eines Patienten mit linksseitigem Neglect betrachtet. Die vorangegangene Standarddiagnose ergab für diesen Patienten einseitige visuelle Beeinträchtigungen im linken Halbfeld. Mit Hilfe des Experiments „Richtungsidentifikation" wurde untersucht, ob parallel zu den visuellen auch Defizite in der räumlich-akustischen Wahrnehmung festgestellt werden können. Die Untersuchung bestand aus insgesamt 111 Aufgaben (akustische Reizpositionen beschränkt auf vordere Hälfte der Horizontalebene, 37 Positionen bei 5°-Auflösung, jede Position besaß die Häufigkeit 3).

Verteilung der Fehler

Abbildung 8.21 zeigt die Verteilung „falscher" Antworten (Fehlerverteilung), wobei die Fehlerhäufigkeit als Funktion der akustischen Reizposition aufgetragen ist. Auffällig ist das Auftreten von Fehlern bei rechtsgelegenen Reizpositionen, d.h. akustische Rei-

ze werden bis etwa 15° als „von links kommend" eingestuft. Erst ab 20° gelingt dem Patienten eine sichere Identifikation des von rechts einfallenden Signals. Diese Beobachtung deutet auf eine nach rechts verschobene subjektive akustische Mitte hin. Die Fehlerverteilung ist gegenüber Normalpersonen aufgeweitet, was vermutlich auf eine insgesamt reduzierte Lokalisationsfähigkeit zurückgeht.

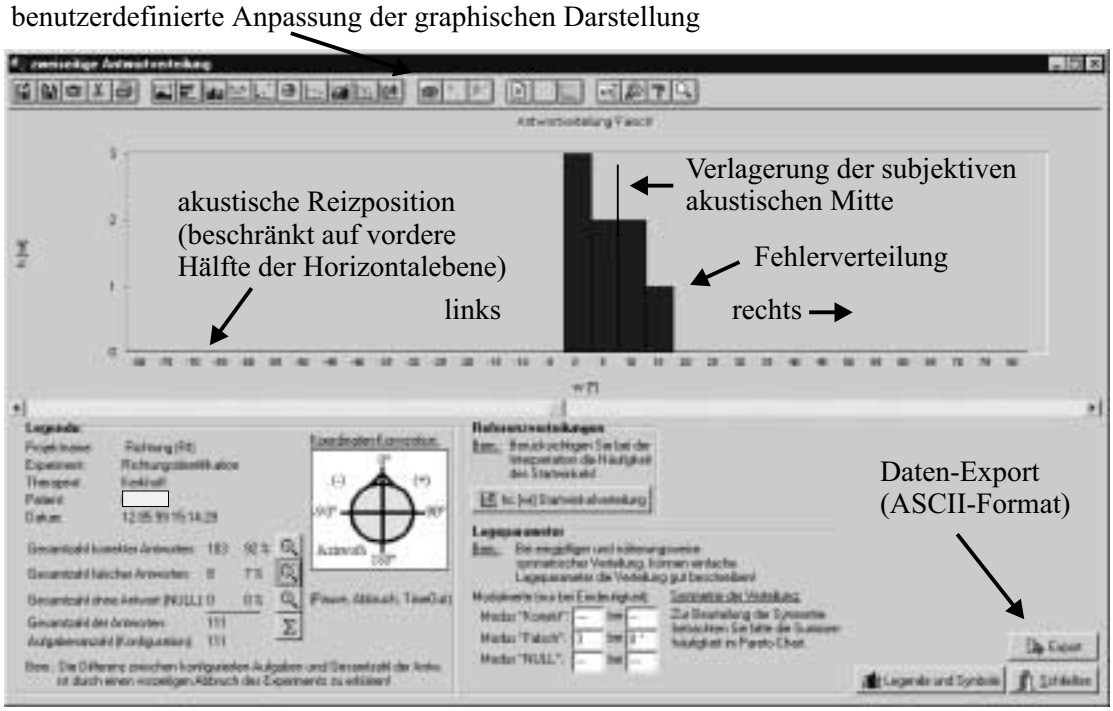


Abbildung 8.21: Fehlerverteilung eines Patienten mit linksseitigem Neglect, auffällige Fehlerrate bei rechts gelegenen akustischen Reizen, Interpretation als Rechtsverlagerung der subjektiven akustischen Mitte

Neben Angaben zur Untersuchung (Projektname, Therapeut, Patient, Datum der Untersuchung) besteht in Abbildung 8.21 der Zugriff auf Referenzverteilungen, die bei der Ergebnisinterpretation zu berücksichtigen sind (z.B. Abhängigkeit der Fehlerverteilung von der Verteilung der akustischen Reizpositionen).

Verteilung der Reaktionszeiten

Als weiterer Antwortparameter wird Reaktionszeit (RT) betrachtet. Von Normalpersonen wird ein RT-Maximum bei 0° (Frontaleinfall) erwartet, da an dieser Reizposition die interauralen Merkmale im Vergleich zu den Rändern (−90° und 90°) ein Minimum aufweisen. Die Richtungsidentifikation „links"/„rechts" ist schwerer und sollte daher mehr Zeit beanspruchen. Abbildung 8.22 zeigt die Verteilung der Reaktionszeiten des Neglect-Patienten unter gleichen Untersuchungsbedingungen wie in Abbildung 8.21. Dabei zeigt sich eine Rechtsverlagerung des RT-Maximums (5°). Auch dieses Ergebnis kann als Folge einer rechtsgerichteten Verlagerung der subjektiven akustischen Mittenwahrnehmung interpretiert werden.

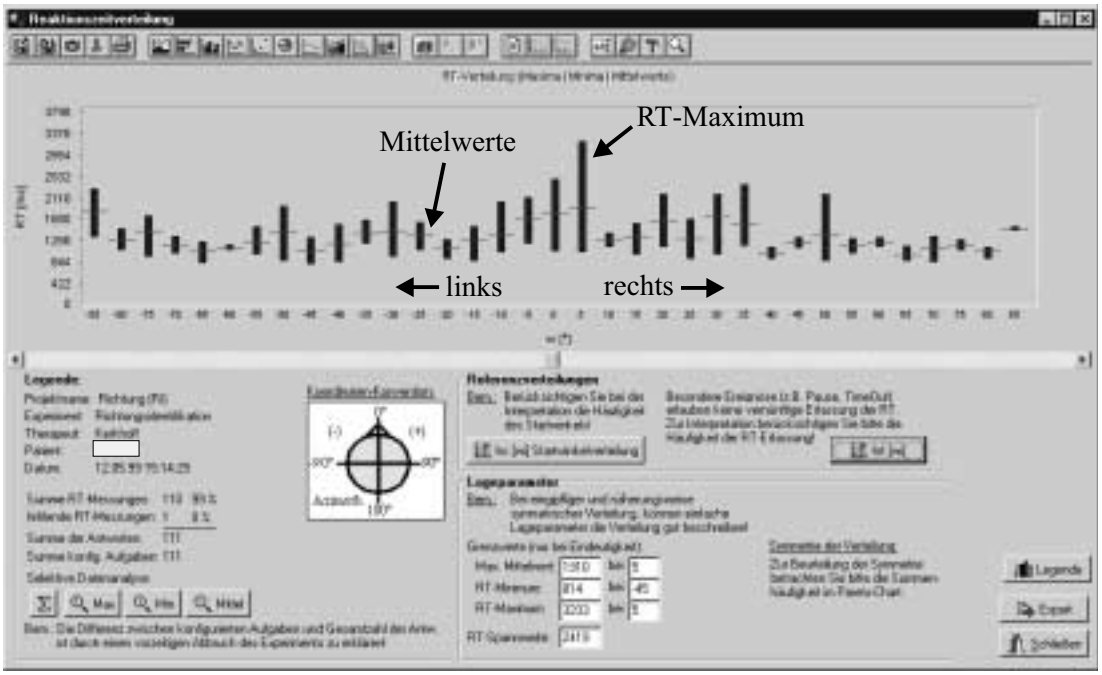


Abbildung 8.22: Verteilung der Reaktionszeiten (RT) eines Patienten mit linksseitigem Neglect, auffällige Rechtsverlagerung des RT-Maximums

8.4.3 Erkenntnisse aus dem klinischen Einsatz

Nachfolgend werden beispielhaft Ergebnisse aus dem klinischen Einsatz in der neuropsychologischen Abteilung des Städtischen Krankenhauses München-Bogenhausen vorgestellt.

Verteilung der Fehler

Zur Gewinnung von Referenzdaten wurden 22 Normalpersonen (Altersvariationsbreite 28-73 Jahre, Median 50; 15 Frauen, 7 Männer) untersucht. Verwendet wurden insgesamt 37 akustische Reizpositionen in der vorderen Hälfte der Horizontalebene (5°-Auflösung im Winkelbereich von $-90°$ bis $+90°$). Jede Position besaß die Häufigkeit 3 (111 Aufgaben insgesamt).

Während des Experiments richteten die Probanden ihre Augen auf den 2 x 2 cm großen Fixationspunkt (vgl. Abbildung 8.10). Vor dem Beginn der Untersuchung wurde der Kopf in einer Kopfstütze zentral vor dem Monitor stabilisiert, wobei auf eine zum Monitor parallele Rumpfposition geachtet wurde. Als akustisches Signal wurde weißes Rauschen mit einer Dauer von 1.5 s verwendet aufgrund der Resistenz gegen periphere Höreinbußen, insbesondere bei höheren Frequenzen. Der Effektivwert des Schalldrucks betrug 75 dB. Im Vorfeld wurde an allen Probanden eine Luftschallaudiometrie durchgeführt, wobei Personen mit mehr als 20 dB Hörverlust und/oder Asymmetrie des Audiogramms von mehr als 15 dB von der Untersuchung ausgeschlossen wurden.

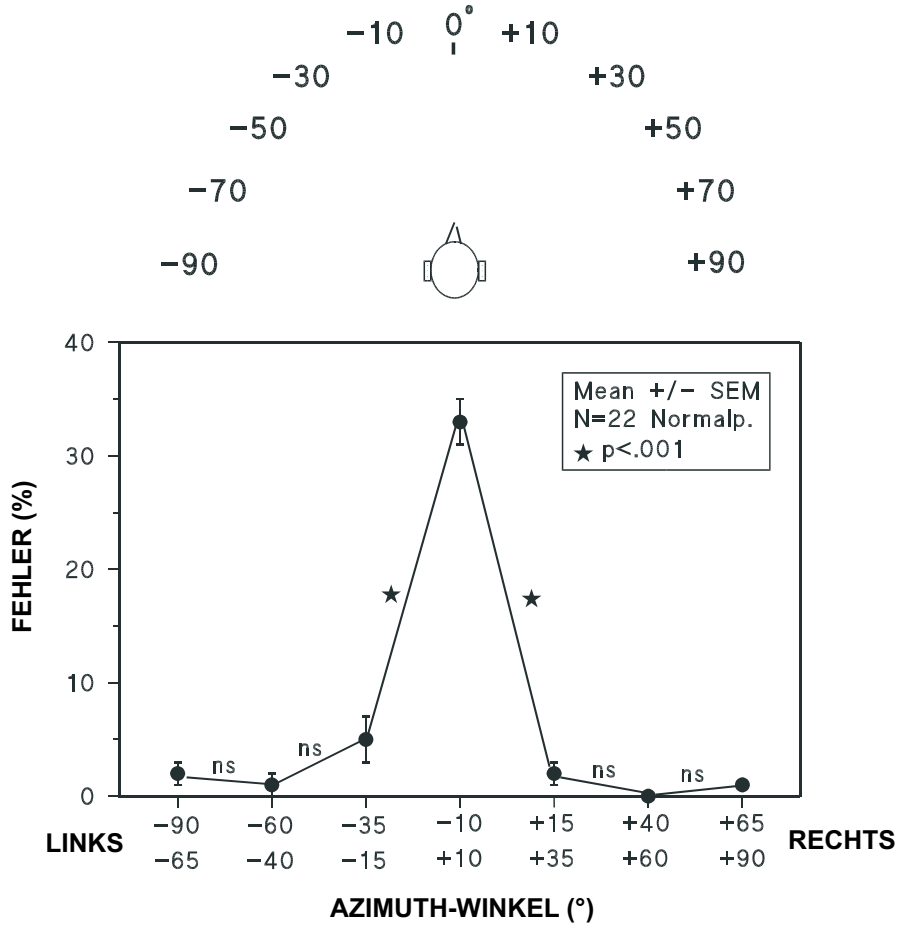


Abbildung 8.23: Verteilung der Fehler (N = 22 Normalpersonen, 111 Aufgaben in der vorderen Hälfte der Horizontalebene, 5°-Auflösung, Aufgabenhäufigkeit 3), Intervallbildung für jeweils 5 bzw. 6 akustische Positionen, Kreise: Mittelwerte +/- SEM (SEM standard error of the mean), Sterne: signifikante Unterschiede der Fehlerrate bei unterschiedlichen Reizpositionen (Signifikanzniveau $p < 0.001$), ns: nicht signifikant mit $p > 0.05$

Abbildung 8.23 zeigt die Fehlerverteilung. Die Mittelwerte und die mittleren absoluten Abweichungen (SEM) sind als Funktion der akustischen Reizposition aufgetragen. Für ausgewählte Positionen wurde eine Varianzanalyse mit anschließenden Paarvergleichen mittels t-Test [Bor93] durchgeführt.

Wie erwartet, zeigt sich ein signifikanter Anstieg der Fehlerrate in Richtung mittlerer Reizpositionen ($p < 0.001$). Bei seitlicher Auslenkung (links und rechts) reduziert sich die Fehlerrate deutlich ($\pm 15°$ Fehlerrate $\leq 5\%$), was zu einer schmalgipfligen Verteilung führt. Die generell niedrigere Fehlerrate im rechten vorderen Quadranten ($0° - 90°$) läßt einen geringfügigen (nicht signifikanten) Rechtsohrvorteil erkennen.

Die symmetrische Lage des Maximums bei 0° kennzeichnet die *subjektive akustische Mitte der Normalpersonen.*

Verteilung der Reaktionszeiten

Unter Beibehaltung der Untersuchungsbedingungen (vgl. Verteilung der Fehler w.o.) wurde die Reaktionszeit (ms-Auflösung) für die „links"/„rechts"-Entscheidung bestimmt.

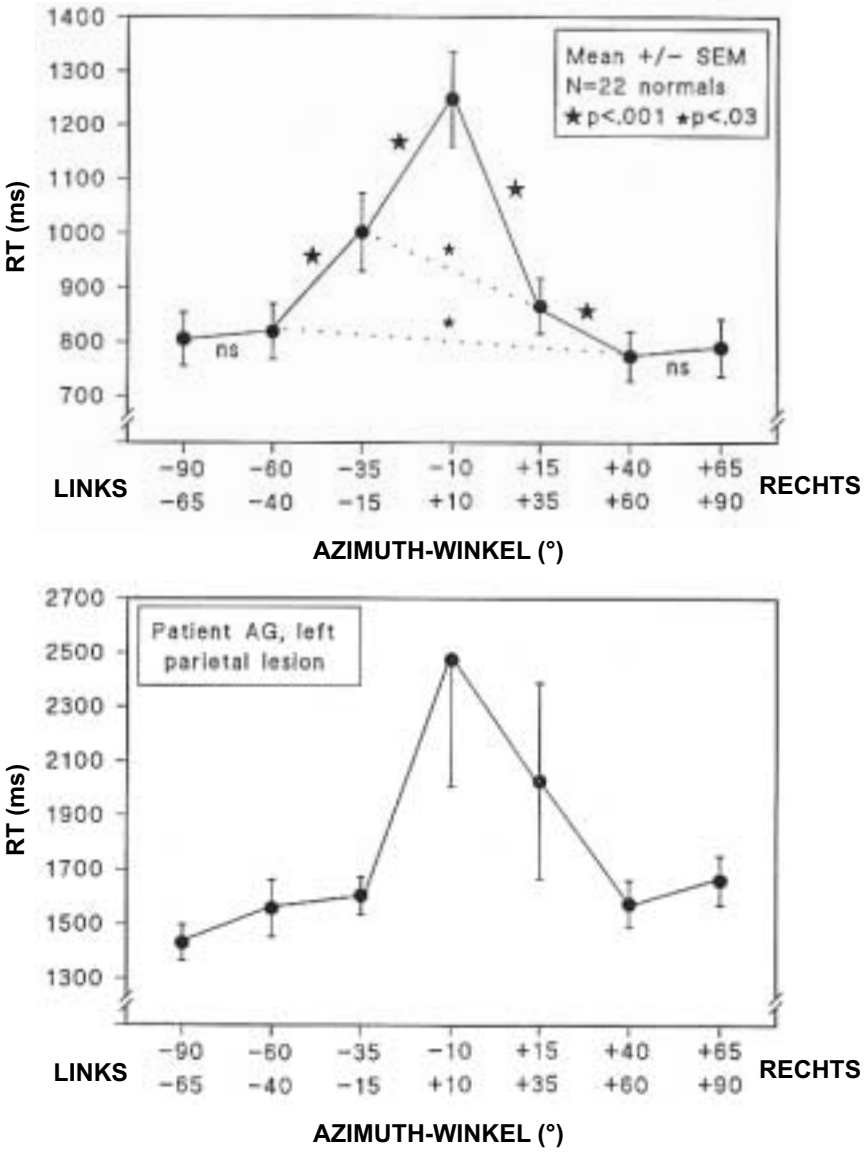


Abbildung 8.24: Verteilung der Reaktionszeit, N = 22 Normalpersonen (oben) und Patient mit linkshemisphärischer Störung als Kontrollperson (unten), gleiche Bedingungen wie Abb. 8.23

Abbildung 8.24 zeigt im oberen Teil die Reaktionszeitverteilung für Normalpersonen und im unteren Teil die eines Patienten mit linkshemisphärischer Läsion des Parietallappens. Dieser Patient wies in den verfügbaren klinischen visuellen Tests auf eine eventuelle rechtsseitige räumliche Störung *keine* Defizite auf. Bei Normalpersonen zeigt

sich deutlich der erwartete Anstieg der Reaktionszeiten, dessen Maximalwert etwa bei frontaler Reizposition (0°) erreicht wird. Die Varianzanalyse bestätigt die Signifikanz des Anstiegs in beide Richtungen ($p < 0.001$). Im direkten Vergleich dazu zeigt das Patientenergebnis eine generelle Zunahme der Reaktionszeiten, die bei mittleren und rechts gelegenen Positionen (0° bis 35°) besonders deutlich ausgeprägt ist. Diese Beobachtung läßt den Rückschluß zu, daß durch die linkshemisphärische Störung die akustische Lokalisationsfähigkeit im rechten vorderen Raumbereich reduziert ist. Zusätzlich werden unerwartet *einseitige* Unterschiede in den Reaktionszeiten festgestellt. Bei Normalpersonen besteht ein Zeitvorteil für rechts gelegene Reizpositionen ($p < 0.03$), der sich beim Patienten für links gelegene Reizpositionen zeigt. Diese Auffälligkeiten in der Verarbeitung akustischer Reize konnten mit den bislang verfügbaren klinischen Methoden nicht festgestellt werden.

8.5 Experiment II: „Einstellen der räumlich-akustischen Mitte"

Das Experiment „Einstellen der räumlich-akustischen Mitte" ist ein *interaktives Zuordnungsexperiment*, das sensitiver als das Experiment „Richtungsidentifikation" auf systematische Verlagerungen der subjektiven akustischen Mitte reagiert. Wie im vorangegangenen Experiment wird ein akustischer Reiz aus variabler Position in der Horizontalebene präsentiert. Die Aufgabe des Patienten besteht zunächst in der möglichst exakten Beurteilung, ob das Signal genau von vorne (0°) bzw. genau von hinten (180°) kommt. Nimmt der Patient den Reiz nicht aus diesen Richtungen wahr, wird er aufgefordert, die Reizposition schrittweise so lange zu verändern, bis seiner Wahrnehmung nach eine mittlere Position erreicht ist. Hierzu stehen dem Patienten Inkremente unterschiedlicher Orientierung („links"/„rechts") und Abstufung zur Verfügung.

8.5.1 Diagnostische Ziele und Hypothesen

Das primäre diagnostische Ziel ist die Bestimmung systematischer Veränderungen der subjektiven akustischen Mittenwahrnehmung bei Patienten mit räumlichen Verarbeitungsstörungen. Im Unterschied zum Experiment „Richtungsidentifikation" soll der Patient Hörereignisse nicht nur rezeptiv wahrnehmen, sondern sie selbst einstellen (Herstellungsverfahren). An den Patienten werden dabei zusätzliche Anforderungen gestellt:

- kurzfristiges Behalten der akustischen Richtungsinformation
- Entscheidung, in welche Richtung der Reiz bewegt werden soll
- Entscheidung über eine adäquate Schrittweite

Von Patienten mit räumlichen Störungen wird neben einer systematischen (ipsiläsionalen) Verlagerungen der akustischen Mitte eine - im Vergleich zu Normalpersonen - generell erhöhte „Unschärfe" in der Lokalisation erwartet, die zu einer breiteren Antwortverteilung führen müßte. Gleichzeitig werden Schwierigkeiten in der Wahl adäquater Richtungsinkremente erwartet, d.h. Patienten werden vermehrt inadäquate Inkrementweiten (z.B. kleine Schritte bei großer Entfernung zur Mitte und umgekehrt) verwenden. Zur Absicherung der beobachteten Effekte sollen die Untersuchungsergebnisse mehrerer Gruppen gegenübergestellt werden:

- Normalpersonen
- Patienten mit linkshemisphärischer Störung (*ohne* räumliche Störung)
- Patienten mit rechtshemisphärischer Störung (*mit/ohne* räumliche Störung z.B. Neglect bzw. Hemianopsie, sowie *mit/ohne* Halbseitenblindheit)

8.5.2 Struktur und Leistungsmerkmale des Experiments

Nachfolgende Darstellung gibt zunächst einen Überblick über die Struktur und die Funktion des Experiments. Anschließend werden experimentspezifische Details der Experimentkonfiguration und -auswertung erläutert, die als Ergänzung der experimentübergreifenden Beschreibung in den Abschnitten 8.3.3 - 8.3.5 zu betrachten sind.

Struktur des Experiments „Einstellen der räumlich-akustischen Mitte"

Abbildung 8.25 zeigt am Beispiel einer Aufgabe die Struktur des Experiments, die sich in vier Phasen gliedert. In *Phase 1* wird ein akustisches Signal aus einer vorgegebenen Reizposition in der Horizontalebene (Azimuthwinkel φ) über Kopfhörer präsentiert. Im Anschluß daran muß der Proband zunächst entscheiden, ob sich das Hörereignis in der räumlich-akustischen Mitte ($\varphi = 0° \vee 180°$) befindet oder nicht[14] (*Phase 2*). Weicht das Hörereignis von der Mitte ab, soll der Proband in *Phase 3* die akustische Reizposition in diskreten Schritten (Winkelinkrement $\Delta\varphi_i$) ändern und in die Mitte führen. Während dieser Anpassung kann der akustische Reiz beliebig oft angehört werden. Am Ende der schrittweisen Annäherung an die subjektive akustische Mitte erfolgt in *Phase 4* die Probandenentscheidung „Jetzt befindet sich der Reiz in der Mitte". Optional kann die Bearbeitungszeit (Phase 1 bis 4) durch das System bestimmt und aufgezeichnet werden. Aufgrund der Abhängigkeit von der intialen Reizposition kann dieser Parameter allerdings nicht als Reaktionszeit interpretiert werden.

Das Experiment besitzt im Vergleich zum Experiment „Richtungsidentifikation" eine *erhöhte Testempfindlichkeit*, da pro Aufgabe im Mittel *mehrere* Lokalisationsentscheidungen über die relative Lage des Reizes zur akustischen Mitte getroffen werden, die implizit Aufschluß über den Ort des Hörerignisses geben.

[14] diese Entscheidung wird dem System *nicht* mitgeteilt

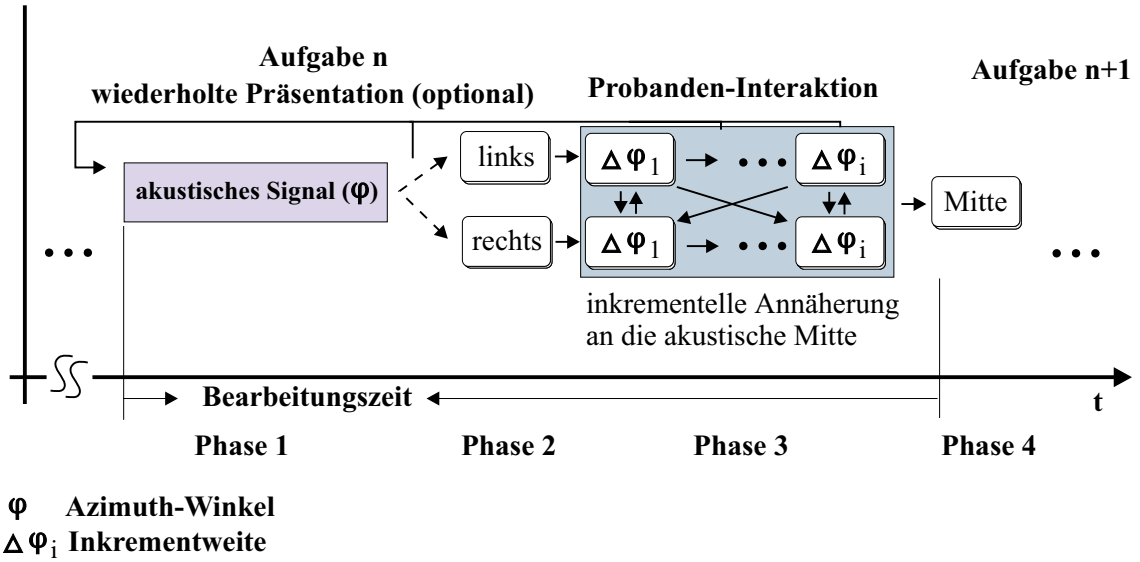


Abbildung 8.25: Struktur des Experiments „Einstellen der räumlich-akustischen Mitte"

Konfiguration des Experiments „Einstellen der räumlich-akustischen Mitte"

Der Aufbau der Konfiguration gleicht dem des Experiments „Richtungsidentifikation" (vgl. Abschnitt 8.4.2). Angepaßt wurde die Gestaltung des Aufgabenbildschirms als wesentliches Element der Benutzerschnittstelle. Dem Anwender stehen zwei Möglichkeiten für die individuelle Gestaltung des Bildschirms zur Verfügung:

- Auswahl eines Aufgabenbildschirms aus mehreren Bildschirmvorlagen
- Aktivierung/Deaktivierung einzelner Bildschirmelemente

Abbildung 8.26 zeigt die verfügbaren Bildschirmvorlagen, die im wesentlichen hinsichtlich der Anzahl und Schrittweite der Richtungsinkremente ($\Delta\varphi_i$) variieren, die dem Probanden zur Steuerung des akustischen Reizes angeboten werden.

Aufgrund der Randbedingung, daß die Mittenposition ($\varphi = 0\,^\circ$) in jedem Fall erreichbar sein muß, bestimmt das kleinste Inkrement ($\Delta\varphi_{i\,min}$) den Bereich zulässiger Reizpositionen (Richtungsauflösung). Dadurch können gleichzeitig die Anforderungen an die Lokalisationsentscheidung kontrolliert werden. Im Beispiel (s. Abbildung 8.27) sind durch die Wahl von $\Delta\varphi_{i\,min} = 5\,^\circ$ alle simulierbaren Reizpositionen in 5°-Auflösung zulässig. In anderen Fällen ($\Delta\varphi_{i\,min} = 15\,^\circ \vee 30\,^\circ \vee 45\,^\circ$) wird der Bereich zulässiger Reizpositionen durch die Gruppenbildung zum Winkel $0\,^\circ$ entsprechend eingeschränkt. Mit der Wahl der Aufgabenvorlage führt das System automatisch einen Prüflauf durch, der die akustischen Reizpositionen der Einzelaufgaben auf diese Bedingung hin kontrolliert.

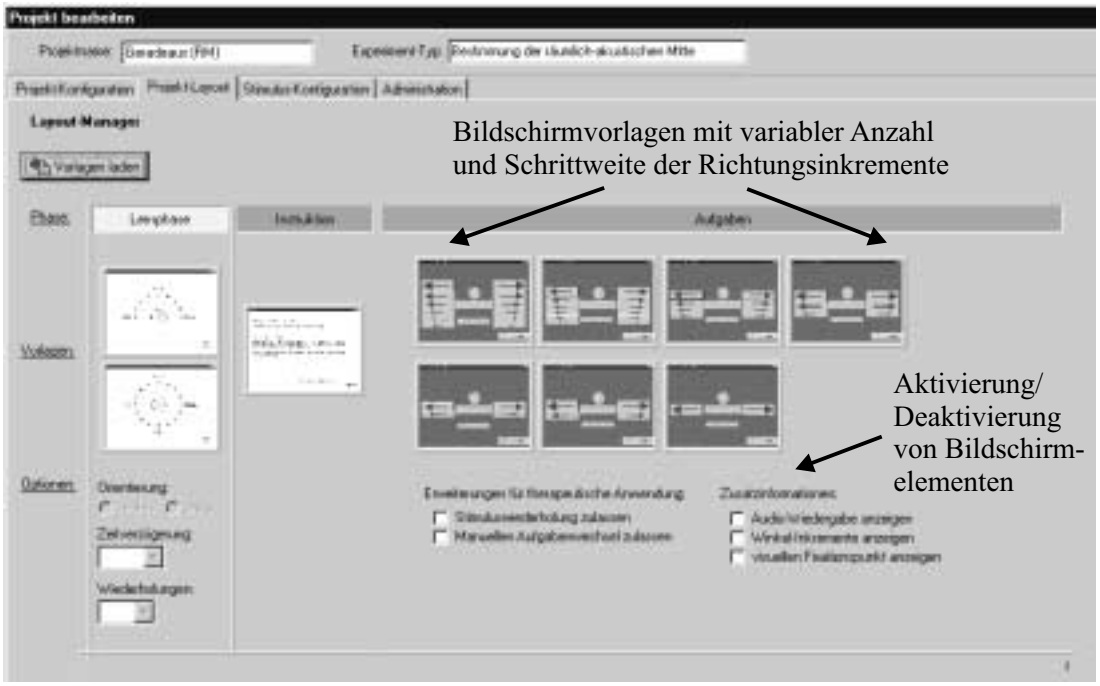


Abbildung 8.26: Anpassung des Aufgabenbildschirms im Experiment „Einstellen der räumlich-akustischen Mitte"

Auswertung des Experiments „Einstellen der räumlich-akustischen Mitte"

Die integrierte Auswertungskomponente ermöglicht die Ergebnisdarstellung von Einzeluntersuchungen. Die zur Laufzeit der Untersuchung aufgezeichneten Antwortdaten können u.a. nach folgenden Parametern analysiert werden:

- Verteilung des Restwinkels
- Verteilung der Richtungsinkremente

Der *Restwinkel* beschreibt die Winkeldifferenz zwischen der Mittenwahrnehmung des Patienten[15] und der akustischen Mitte (0 °-Position). Dieser Parameter ist ein quantitatives und anschauliches Maß zur Beurteilung der subjektiven akustischen Mittenwahrnehmung. Gleichzeitig gibt die Form der Verteilung Aufschluß über die Lokalisationsfähigkeit des Patienten. Für Normalpersonen wird eine zuverlässige Erkennung der akustischen Mitte erwartet. Die Verteilung des Restwinkels sollte daher schmalgipflig sein und einen Schwerpunkt bei 0 ° aufweisen. Demgegenüber wird für Patienten eine größere Streuung und/oder Verlagerung des Schwerpunkts als Indiz für eine Verschiebung der akustischen Mittenwahrnehmung erwartet. Untersuchungsergebnisse, die diese Erwartungen bestätigen, sind in Abschnitt 8.5.3 enthalten.

[15] Mittenentscheidung des Patienten in Phase 4 vgl. Abbildung 8.25

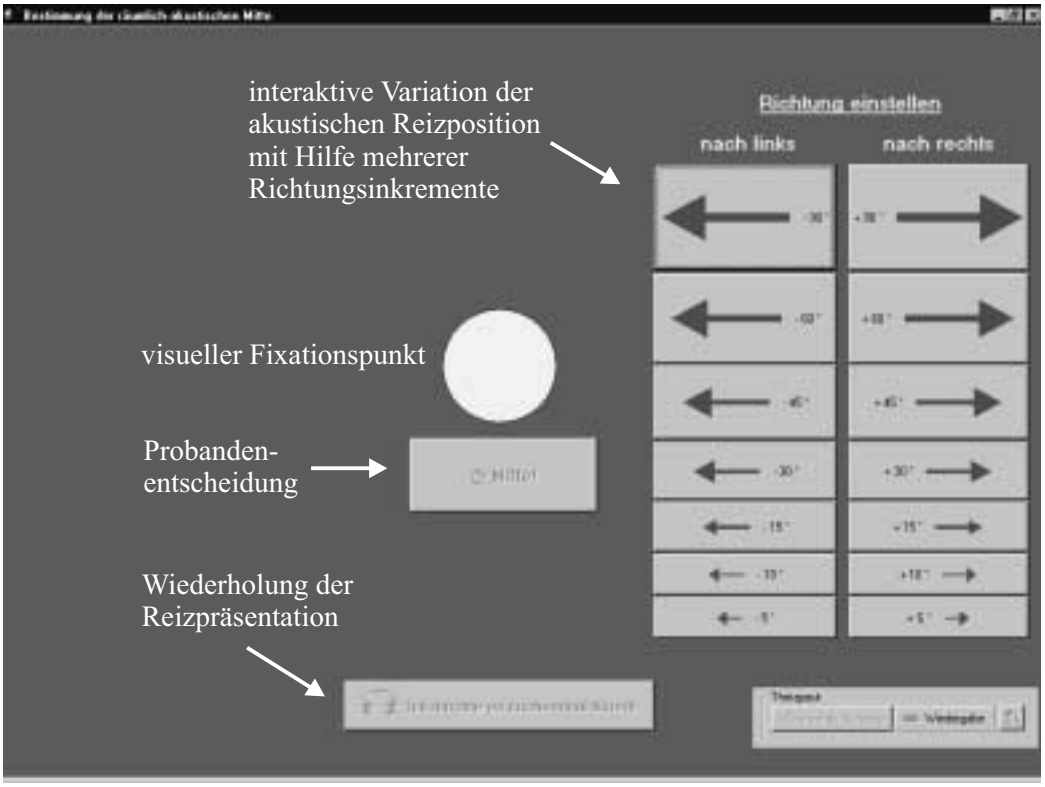


Abbildung 8.27: Beispiel eines Aufgabenbildschirms, $\Delta\varphi_{i\,min} = 5°$, rechtsexzentrische Ausrichtung der Inkrementbuttons

Zur Beurteilung, wie effizient der Patient die angebotenen Richtungsinkremente zur Verlagerung der akustischen Reizposition verwendet, kann eine *Verteilung der Richtungsinkremente* erstellt werden. Während der Untersuchung wurde hierzu die Wahl des Richtungsinkrements in Abhängigkeit von der momentanen Reizposition aufgezeichnet. Für jede Einzelaufgabe entsteht eine Positionsfolge, die den „Weg" von der initialen Reizposition bis zur Entscheidung des Patienten, daß der Reiz nun aus der Mitte kommt, beschreibt. In der Auswertung dieser Folgen ist relevant, welche Abhängigkeit zwischen der Orientierung bzw. Weite des Inkrements und der momentanen Reizposition besteht. Als Beispiel zeigt Abbildung 8.28 die Häufigkeitsverteilung der Richtungsinkremente aus der Untersuchung einer Normalperson. Deutlich sichtbar sind Verteilungsgipfel der $5°$ bzw. $-5°$-Inkremente bei mittleren Reizpositionen im Bereich von $-10°$ bis $10°$, die wie folgt interpretiert werden können:

1. Der Proband verwendet bei Reizpositionen mit geringer seitlicher Auslenkung von der Mitte ($0°$) am häufigsten *kleine* Richtungsinkremente ($|5°|$).

2. Der Proband beachtet die Orientierung (+/-) der Richtungsinkremente, d.h. negative Inkremente bei rechts gelegenen Reizpositionen, die den Reiz nach links verlagern und umgekehrt

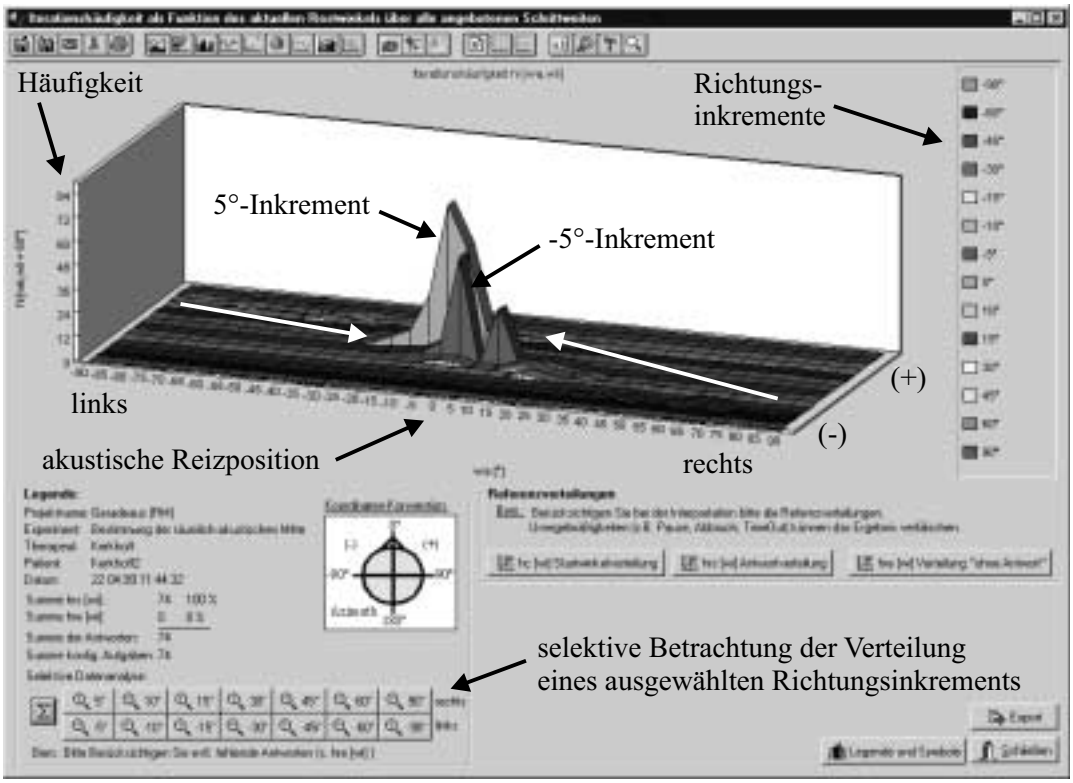


Abbildung 8.28: Verteilung der Richtungsinkremente (Normalperson), x-Achse: akustische Reizposition, y-Achse: absolute Häufigkeit, z-Achse: angebotene Richtungsinkremente

Diese Beobachtung entspricht der Erwartung, daß Normalpersonen die momentane Reizposition zuverlässig beurteilen können[16]. Im direkten Vergleich dazu soll ein Patient mit räumlichen Störungen (linksseitiger Neglect) betrachtet werden (s. Abbildung 8.29). Das Patientenergebnis zeigt eine inadäquate Verwendung der Schrittweite der Richtungsinkremente, die bei links gelegenen Reizpositionen ausgeprägter ist (große Schrittweite bei kleiner seitlicher Auslenkung). Die Verwendung der Richtungsinkremente konzentriert sich insgesamt auf rechts gelegene Positionen, was auf eine Vernachlässigung links gelegener akustischer Reize zurückzuführen ist.

Die integrierte Auswertungskomponente stellt dem Anwender weitere Funktionen und Verteilungen zur Analyse der Ergebnisdaten zur Verfügung:

- Restwinkel als Funktion durchgeführter Aufgaben
- Restwinkel als Funktion der initialen Reizposition
- Verteilung der Bearbeitungszeit

[16] der dominante Gipfel der 5 °-Inkremente wird dadurch verursacht, daß kleine Schritte unabhängig von der initialen Reizposition in jeder Aufgabe häufiger verwendet werden

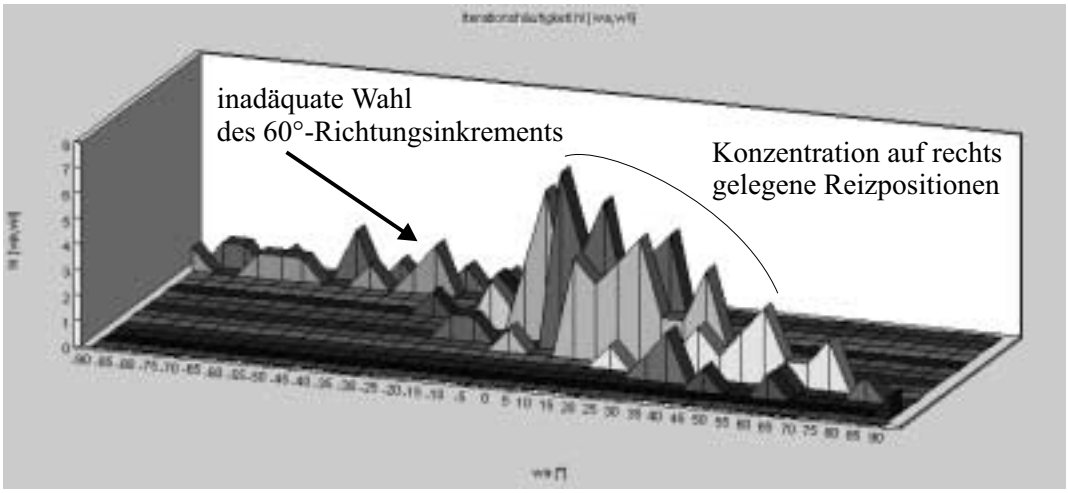


Abbildung 8.29: Verteilung der Richtungsinkremente, Patient mit linksseitigem Neglect (Parameter und Achsenbeschriftung vgl. Abb. 8.28)

- Kontroll- bzw. Referenzverteilungen (Verteilung konfigurierter Reizpositionen vs. erfolgte Antworten, etc.)

Eine detaillierte Darstellung sämtlicher Auswertungsmöglichkeiten sprengt den Rahmen dieser Arbeit, weshalb nachfolgend lediglich die Grundgedanken der einzelnen Analysen erläutert werden.

Restwinkel als Funktion durchgeführter Aufgaben

Diese Funktion wurde aus zwei Gründen implementiert:

- Patienten mit räumlichen Verarbeitungsstörungen besitzen häufig Aufmerksamkeitsdefizite
- Die Anforderungen des Experiments an die Aufmerksamkeit des Patienten sind vergleichsweise hoch (vgl. Experiment „Richtungsidentifikation")

Aufmerksamkeitsbedingte Leistungsrückgänge können im Verlauf der Untersuchung eintreten und dadurch erkannt werden, daß sich der Restwinkel bei fortschreitender Anzahl durchgeführter Aufgaben erhöht. Zur Erkennung bzw. zum Ausschluß dieses überlagerten Effekts steht dem Anwender eine implementierte Funktion zur Verfügung.

Restwinkel als Funktion der initialen Reizposition

Neben dem Nachlassen der Aufmerksamkeit können Aufmerksamkeitsdefizite zum Auftreten sog. *Startpositionseffekte* führen. Bezogen auf das vorliegende Experiment verursacht dieser Effekt eine Abhängigkeit des Restwinkels von der initialen akustischen Reizposition der Einzelaufgabe, der insbesondere bei Neglect-Patienten mit einseitiger Reizvernachlässigung auftreten kann. Zur Kontrolle wurde daher eine entsprechende Funktion implementiert.

Verteilung der Bearbeitungszeit

Das vorliegende Experiment ist aufgrund der Struktur und Zielsetzung nicht für die Bestimmung von Reaktionszeiten geeignet. Alternativ kann die Bearbeitungszeit von der initialen Reizpräsentation bis zur Mittenentscheidung (Phase 1 bis 4 vgl. Abbildung 8.25) bestimmt werden, die eine qualitative Aussage über die Performanz der Lokalisationsfähigkeit des Patienten ermöglicht. Bei der Interpretation ist die Abhängigkeit von der initialen Reizposition zu berücksichtigen.

Kontroll- bzw. Referenzverteilungen

Die Beurteilung von Untersuchungsergebnissen erfordert Kenntnisse über die Konfiguration und Durchführung der Untersuchung. Konfigurationsbedingte Abweichungen enstehen beispielsweise, falls einzelne Reizpositionen in den vorbereiteten Aufgaben häufiger auftreten als andere. Durchführungsbedingte Abweichungen werden z.B. durch Überspringen von Aufgaben oder einen vorzeitigen Abbruch des Experiments verursacht. Weicht die Verteilung der Reizpositionen von der Gleichverteilung ab, führt dies zu Verzerrungen im Ergebnis. In jeder der o.a. Einzelauswertungen besteht daher der Zugriff auf Kontroll- bzw. Referenzverteilungen, durch die der Anwender Besonderheiten feststellen kann.

8.5.3 Erkenntnisse aus dem klinischen Einsatz

Nachfolgend werden beispielhaft Ergebnisse aus dem klinischen Einsatz in der neuropsychologischen Abteilung des Städtischen Krankenhauses München-Bogenhausen vorgestellt.

Verteilung des Restwinkels

Restwinkelverteilungen wurden an N = 22 Normalpersonen (Altersbereich 42-73 Jahre, Median 48; 15 Frauen, 7 Männer) und an jeweils 5 bzw. 6 Patienten (Altersbereich 37-65 Jahre) mit einseitigen (unilateralen) Hirnschädigungen (dokumentiert in CT/MRI[17]) bestimmt. Die Patientenklassifikation erfolgte im Vorfeld der Untersuchung durch visuelle und akustische Standarddiagnoseverfahren (visuelle Neglectuntersuchung, perimetrische Gesichtsfelduntersuchung zur Überprüfung einer Hemianopsie, Audiometrie).

Die Präsentation der akustischen Reize erfolgte zufällig aus der vorderen Hälfte der Horizontalebene (37 Reizpositionen im Winkelbereich von $[-90\,°, 90\,°]$). Pro Reizposition wurden zwei Aufgaben präsentiert (74 Aufgaben). Die anfänglich gewählte Aufgabenhäufigkeit 3 (111 Aufgaben) erwies sich als zu anstrengend für die Patienten.

Während des Experiments saßen die Probanden parallel zum Monitor des Systems, wobei eine Kopf-Kinn-Stütze die Kopfposition stabilisierte. Zur Kontrolle der Augenposition wurden die Probanden aufgefordert, den Blick auf den am Bildschirm eingeblendeten Fixationspunkts zu richten. Der Untersuchungsablauf wurde den Probanden

[17] bildgebendes Untersuchungsverfahren (Kernspinresonanz-Tomographie)

in einem Testlauf (12 Aufgaben) verdeutlicht. Nach der Hälfte der Aufgaben fand eine Erholungspause von etwa 5 Minuten statt.

Abbildung 8.30 zeigt die Restwinkelverteilungen für die einzelnen Probandengruppen. An den Daten wurde zur Erkennung statistischer Abhängigkeiten eine Varianzanalyse mit anschließendem t-Test [Bor93] durchgeführt.

Normalpersonen

Die Gruppe der Normalpersonen zeigt eine geringe, aber signifikante (t-Test, $p < 0.0001$) linksgerichtete Verlagerung der akustischen Mitte, die im Mittel $-1.9\,^\circ$ beträgt. Die schmalgipflige Verteilung bestätigt, daß der binaural simulierte Höreindruck eine zuverlässige Lokalisation erlaubt.

RBD („right brain damaged")- und LBD („left brain damaged")-Patienten

Beide Patientengruppen dienen als Kontrollen und zeigen im Vergleich zu den Normalpersonen eine breitere Verteilung des Restwinkels, die auf eine reduzierte Lokalisationsfähigkeit zurückzuführen ist. Die Mittenwahrnehmung zeigt dagegen keine signifikante Abweichung ($p > 0.05$) von der physikalischen Mitte und entspricht etwa der von Normalpersonen.

Neglect-Patienten

Bei den Neglect-Patienten (linksseitiger Neglect, d.h. Vernachlässigung von Reizen der linken Hemisphäre) zeigt sich neben der gegenüber Normalpersonen breiteren Verteilung eine signifikante Verlagerung ($p < 0.0001$) der subjektiven akustischen Mitte ($\bar{x} = 13.9\,^\circ$). Der Vergleich der Mittelwerte innerhalb der Probandengruppen ergibt die größte Verlagerung für diese Patienten.

Patienten mit Hemianopsie

Als Ergänzung wurden hemianopische Patienten mit links- und rechtshemisphärischer Störungslokalisation untersucht. Von diesen Patienten sind bislang lediglich Beeinträchtigungen in der visuellen Modalität bekannt (Verlagerung der visuellen Mittenwahrnehmung), die in dieser Untersuchung auch in der akustischen Modalität nachgewiesen werden. Patienten mit Hemianopsie rechts bzw. links (Blindheit der rechten bzw. linken Gesichtsfeldhälfte) zeigen ipsiläsionale[18] Verschiebungen der räumlich-akustischen Mitte ($\bar{x} = 7.8\,^\circ$ bzw. $-13.9\,^\circ$).

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, daß Patienten mit einer Halbseitenblindheit (Hemianopsie) ihre akustische Mitte im Gegensatz zu Neglect-Patienten in Richtung ihres blinden Halbfeldes verschieben, während Neglect-Patienten ihre akustische Mitte weg vom vernachlässigten Halbraum einschätzen [KAZ99].

[18] auf der Läsionsseite

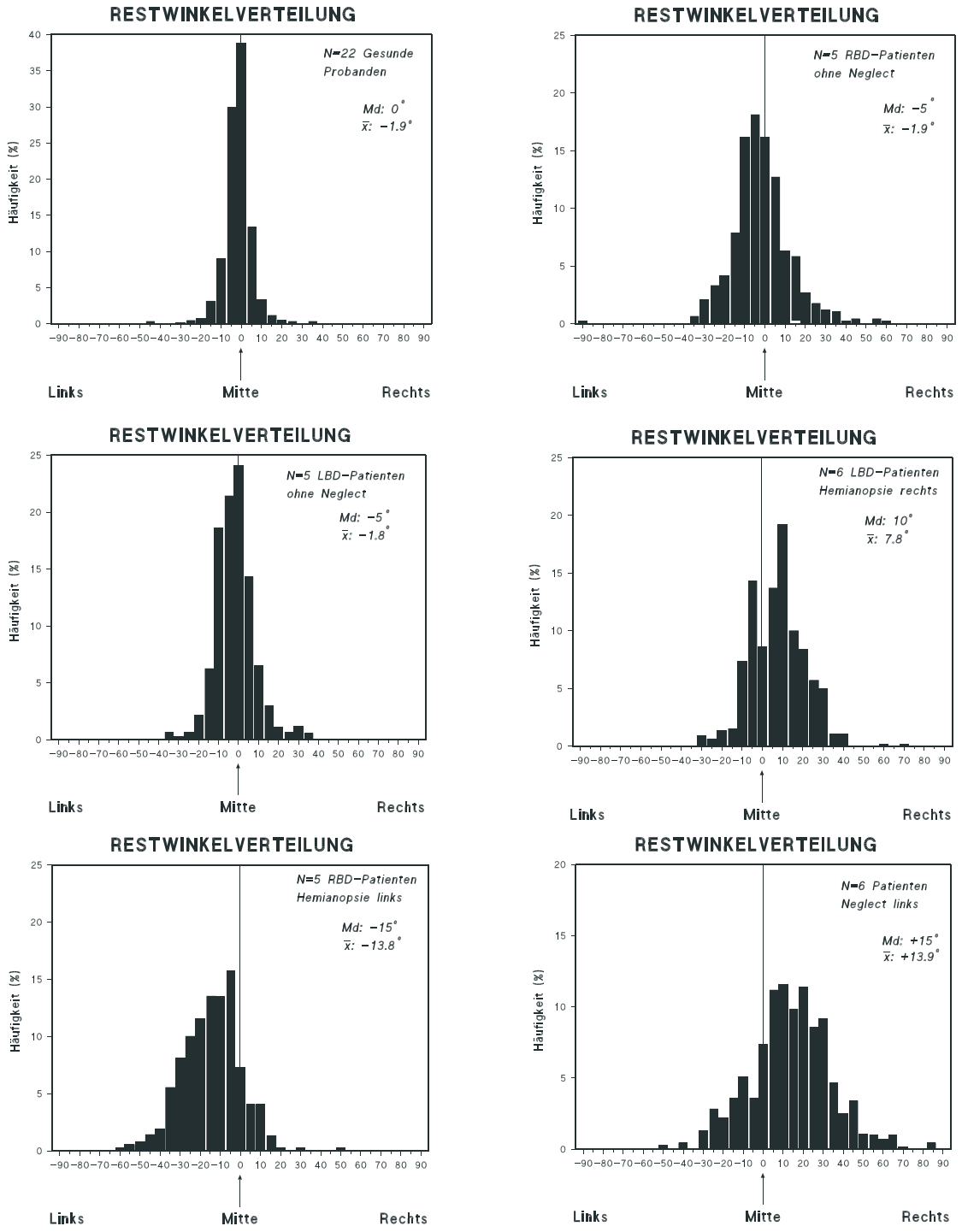


Abbildung 8.30: Restwinkelverteilung für unterschiedliche Probandengruppen (Normalpersonen, RBD „right-brain-damaged", LBD „left-brain-damaged", Hemianopiker und Neglect-Patienten), Md Medianwert, $\bar{x}$ arithmetischer Mittelwert

Modulation des Höreindrucks durch Variation der Kopf-Rumpf Position und simultane visuelle Stimulation (Optokinetik)

Die vorangegangene Untersuchung wurde durch das Einbeziehen von Einflußgrößen des räumlichen Hörens (Modulationsparameter vgl. Abschnitt 8.2.2) erweitert. Dabei wurde die Abhängigkeit von zwei Parametern analysiert:

- Variation der Kopf-Rumpf Position
- simultane visuelle Stimulation durch bewegten Bildhintergrund (Optokinetik)

Für beide Parameter konnte bei Patienten mit linksseitigem Neglect ein modulierender Effekt in der visuell-räumlichen Wahrnehmung nachgewiesen werden [Ker99]. Die Frage, ob ein ähnlicher Effekt auch in der akustischen Modalität auftritt, kann mit den bisherigen klinischen Methoden nicht beantwortet werden. In der folgenden Untersuchung wurde die räumliche-akustische Wahrnehmung bei systematischer Variation an N = 2 Neglect-Patienten experimentell bestimmt. Die Untersuchungsbedingungen waren identisch mit denen in Abschnitt 8.5.3. Abbildung 8.31 zeigt die Verteilung des Restwinkels. Die linke Spalte verdeutlicht den Einfluß der Kopfdrehung, während die rechte Spalte die Abhängigkeit vom optokinetischen Einfluß darstellt. Kopf und Rumpf des Patienten waren während der optokinetischen Stimulation mittig (0°) zum Monitor durch Verwendung einer Kopf- und Kinnstütze stabilisiert.

Kopfdrehung

Die relative Kopf-Rumpf Position wurde durch Kopfdrehung nach rechts und nach links (jeweils 20°) bei konstanter Rumpfposition verändert. Während die Kopfdrehung nach rechts (intakte Raumhälfte) die ipsiläsionale Verlagerung der akustischen Mittenwahrnehmung verstärkte, trat für die Kopfdrehung in die vernachlässigte Raumhälfte (links) ein *kompensatorischer* Effekt auf. Zu beachten ist, daß sich das akustische Signal durch die Kopfhörerdarbietung während der Kofdrehung relativ zum Ohr und Kopf nicht veränderte, was unter Freifeldbedingungen (externe Anordnung von Lautsprechern) nur aufwendig zu realisieren ist.

Optokinetik

Der optokinetische Einfluß wurde getestet, indem die gewohnte Bildschirmoberfläche (s. Abb. 8.27) durch einen Bildhintergrund ersetzt wurde, auf dem sich kleine Quadrate mit konstanter Geschwindigkeit (7.5°) bewegten. Rechtsgerichtete Bewegungen verstärkten die krankheitsbedingte akustische Mittenverschiebung während linksgerichtete zu einer Kompensation führten.

Zusammenfassend konnte durch die feinstufige akustische Auflösung des Systems bei Neglect-Patienten eine ausgeprägte Interaktion zwischen visueller und akustischer Verarbeitung festgestellt werden (optokinetische Bedingung). Ferner wurden modulierende Effekte durch die Kopf-Rumpf Position beobachtet, die in modifizierter Form auch bei Normalpersonen festgestellt wurden [LE98b]. Beide Effekte bieten die Grundlage für weiterführende Experimente und die Entwicklung therapeutischer Ansätze für die schwer zu behandelnde Neglect-Störung.

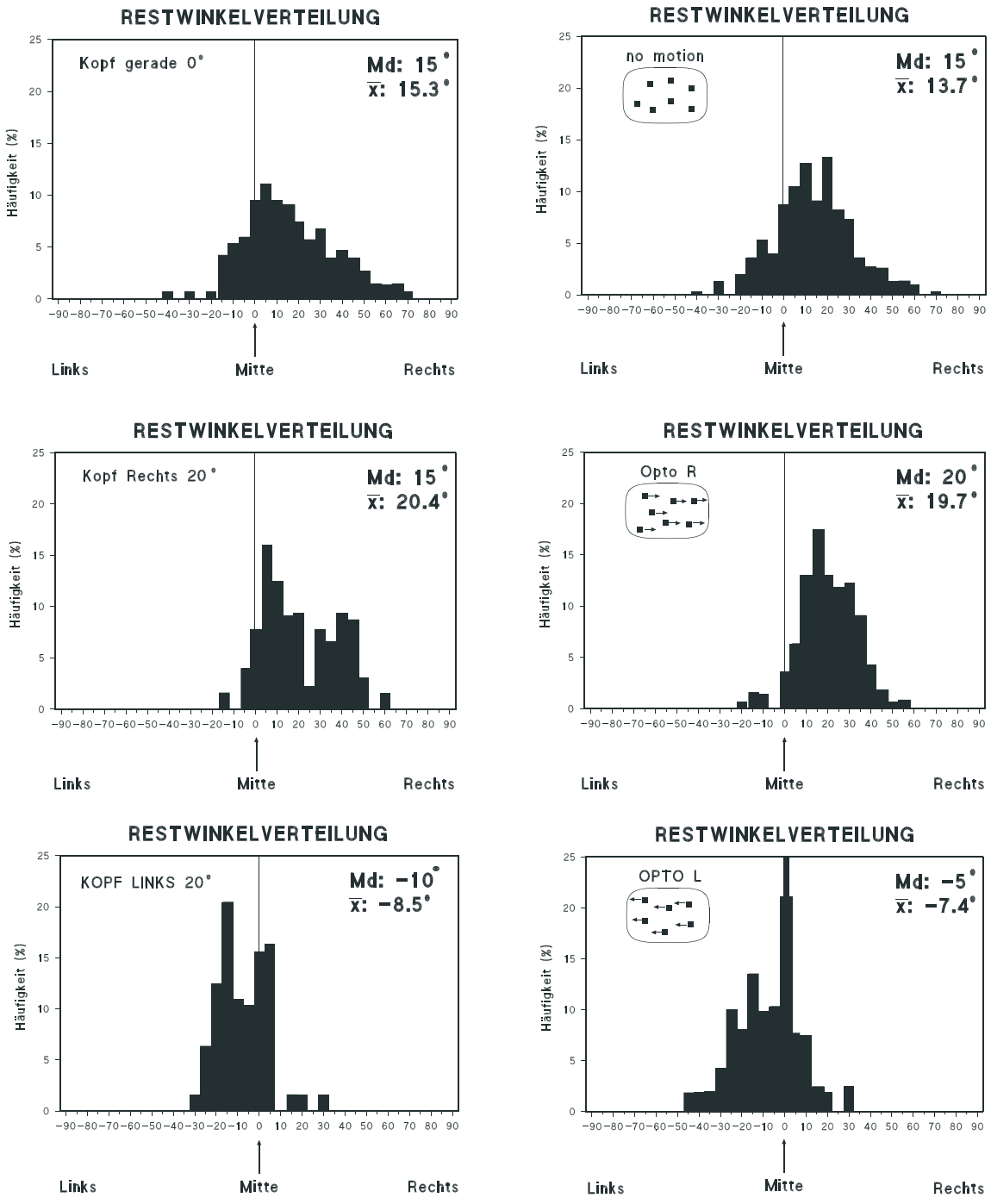


Abbildung 8.31: Restwinkelverteilung von N = 2 Patienten mit linksseitigem Neglect, links: Variation der Kopfposition (gerade, 20° rechts und 20° links), rechts: bewegter Bildhintergrund (optokinetische Stimulation) mit unterschiedlicher Orientierung (OPTO R bzw. L: Bewegung der Bildpunkte nach rechts bzw. links), nähere Erläuterungen siehe Text, Md Medianwert, $\bar{x}$ arithmetischer Mittelwert

Weiterführende Untersuchungen

In weiterführenden Untersuchungen können beispielsweise folgende Fragestellungen verfolgt werden:

- Untersuchung weiterer Modulationsparameter
- Erweiterung der Reizdarbietung auf die hintere Hälfte der Horizontalebene
- Entwicklung therapeutischer Ansätze

Die *Rumpfdrehung* (bei konstanter Kopfposition) ist neben der Kopfdrehung eine Alternative zur Veränderung der relativen Kopf-Rumpf Position, deren Einfluß bislang nur in der visuellen Neglect-Forschung und bei Normalpersonen bekannt ist [KH97, LE98b]. Daneben kann der modulierende Einfluß der *Augenposition* untersucht werden. Das System *Comp*X unterstützt diesen Ansatz durch die Bereitstellung einer hochauflösenden, zoomfähigen Videokamera, durch die Pupillenbewegungen während der Untersuchung beobachtet und aufgezeichnet werden können (vgl. Abb. 8.2).

Die bisherigen Untersuchungen beschränkten sich auf akustische Reizpositionen in der vorderen Hälfte der Horizontalebene. Experimente, die rückwärtige Positionen einbeziehen, tragen z.B. zur Aufklärung der Frage bei, wie sich akustische Mittenverlagerungen bei Neglect-Patienten im hinteren Halbraum auswirken (s. z.B. [VGNB95]). Prinzipiell sind zwei Möglichkeiten denkbar, die in Abbildung 8.32 als „Translation" und „Rotation" bezeichnet sind.

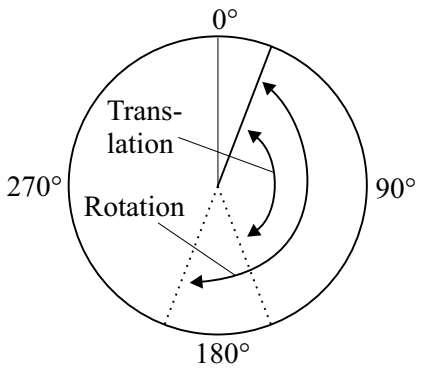


Abbildung 8.32: Mögliche Auswirkungen der räumlich-akustischen Mittenverlagerung bei Neglect-Patienten in der hinteren Hälfte der Horizontalebene, α: Mittenverlagerung in der vorderen Hälfte der Horizontalebene

Unter *therapeutischen* Gesichtspunkten kann untersucht werden, inwieweit die beobachteten Effekte der Kopfdrehung z.B. durch *Vibration der Nackenmuskulatur* simuliert werden können (vgl. Abschnitt 8.2.2). Ist dies der Fall, richten sich nach weiteren

Untersuchungen zur zeitlichen Stabilität der Effekte die Überlegungen auf die Konstruktion einer *Prothese*. Diese nimmt entweder permanent oder in zeitlichen Intervallen eine Stimulation der Nackenmuskeln vor, wodurch z.B. die halbseitige Vernachlässigung bei Neglect-Patienten kompensiert werden könnte.

Eine weiterer Ansatz ergibt sich aus einer psychoakustischen Beobachtungen an Normalpersonen: Im Rahmen einer Studie zum Einfluß monauraler Merkmale beim räumlichen Hören [OP86] wurde zur Unterdrückung interauraler Merkmale ein Ohr bedämpft. Als Randerscheinung wurde eine konsistente Verlagerung des Höreindrucks in Richtung des *ungedämpften* Ohrs festgestellt. Bezogen auf Neglect-Patienten könnte versucht werden, die Mittenverlagerung durch eine variable Dämpfung des *ipsiläsionalen* Ohrs zu kompensieren.

8.6 Experiment III und IV: „Lokalisation" und „Räumlich-akustisches Arbeitsgedächtnis"

Die bisherigen Experimente (I und II) konzentrieren sich auf die Erkennung systematischer Verlagerungen der subjektiven akustischen Mittenwahrnehmung („links"/„rechts"-Entscheidung bzw. interaktive Anpassung der Reizposition). Im Experiment „Lokalisation" wird die Frage untersucht, wie *genau* die räumlich-akustische Position des Reizes bestimmt werden kann (Lokalisationsfähigkeit), die durch die hohe Auflösung des binauralen Simulationssystems (5° in der Horizontalebene) unterstützt wird. Das Experiment „Räumlich-akustisches Arbeitsgedächtnis" ergänzt die bisherigen Experimente, die sich auf die *Wahrnehmung* akustischer Reize beziehen durch die Evaluation des *akustischen Kurzzeitgedächtnisses*. Aufgrund der strukturellen Ähnlichkeit werden die Experimente III und IV nachfolgend gemeinsam erläutert.

8.6.1 Diagnostische Ziele und Hypothesen

Die vorangegangenen Experimente I und II beinhalten jeweils „implizite" akustische Lokalisationsentscheidungen („links"/„rechts" bzw. „Kommt der Reiz aus der Mitte?"), durch die auf die Lokalisationsfähigkeit des Probanden indirekt zurückgeschlossen werden kann (z.B. führt die reduzierte Lokalisationsfähigkeit bei Patienten zu breiteren Antwortverteilungen s. „Fehlerverteilung" Abb. 8.21 bzw. „Restwinkelverteilung" Abb. 8.30). Eine direkte Bestimmung der Lokalisationsfähigkeit erfolgt im Experiment „Lokalisation", bei dem der Proband unmittelbar nach der Reizdarbietung zur möglichst exakten Richtungsangabe des Hörereignisses aufgefordert wird. Bezeichnet $\Delta\varphi$ den Lokalisationsfehler, wird bei Patienten mit räumlichen Störungen neben der natürlichen Abhängigkeit des Fehlers $\Delta\varphi = f(\varphi)$ (Anstieg der Lokalisationsunschärfe in Richtung der Ränder $\pm 90°$), zusätzlich ein hemisphärenspezifischer Effekt erwartet. So sollte die Lokalisationsunschärfe in der vernachlässigten Raumhälfte deutlich höher sein als in der intakten.

Daneben besteht die Vermutung, daß Teile der für die räumliche Informationsverarbeitung zuständigen Hirnareale auch Funktionen des *Kurzzeitgedächtnisses* übernehmen, was in der visuellen Modalität bereits nachgeweisen werden konnte [SJK+95]. Vergleichbare Beeinträchtigungen in der akustischen Modalität liegen nahe, sind bislang aber nur bei Primaten bekannt [CDRG90].

8.6.2 Struktur und Leistungsmerkmale der Experimente

Nachfolgende Darstellung gibt zunächst einen Überblick über die Struktur und die Funktion des Experiments. Anschließend werden experimentspezifische Details der Experimentkonfiguration und -auswertung erläutert, die als Ergänzung der experimentübergreifenden Beschreibung in den Abschnitten 8.3.3 - 8.3.5 zu betrachten sind.

Struktur der Experimente „Lokalisation" und „Räumlich-akustisches Arbeitsgedächtnis"

Der prinzipielle Ablauf der Experimente ist am Beispiel einer Aufgabe in Abbildung 8.33 dargestellt. Abhängig vom Typ des Experiments gliedert sich die Aufgabe in zwei (Experiment „Lokalisation") bzw. drei (Experiment „Räumlich-akustisches Arbeitsgedächtnis") Phasen.

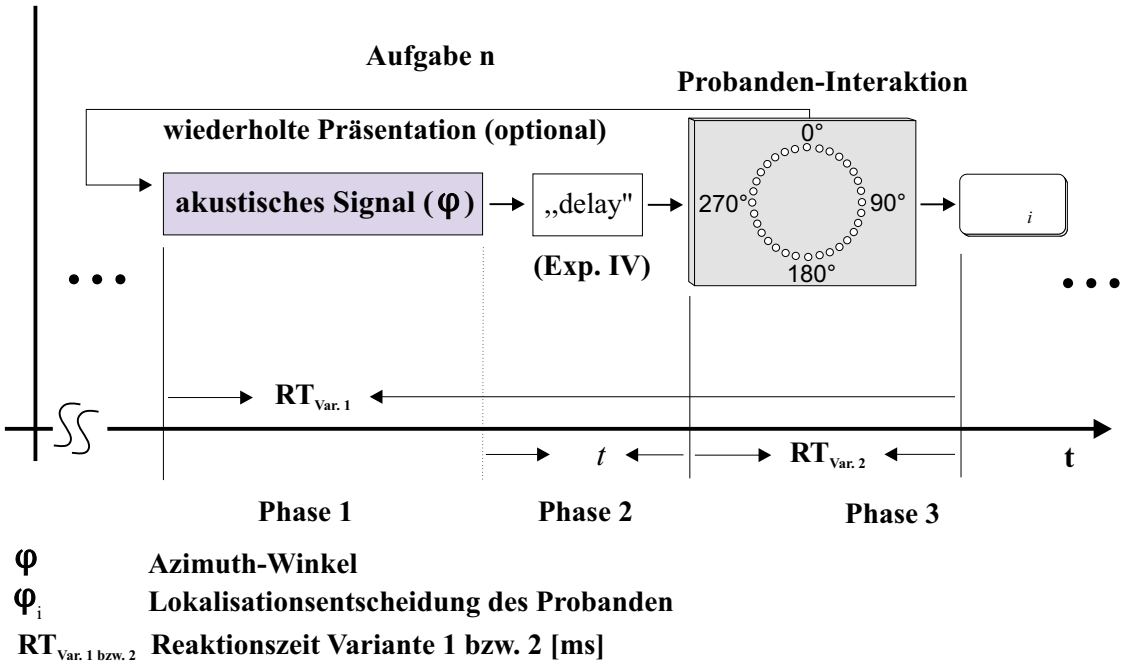


Abbildung 8.33: Struktur der Experimente „Lokalisation" (ohne Phase 2 bzw. $\Delta t = 0$) und „Räumlich-akustisches Arbeitsgedächtnis"

Nach der Präsentation des akustischen Signals aus einer vorgegebenen Reizposition in der Horizontalebene (*Phase 1*) wird der Proband im Experiment „Lokalisation" unmittelbar aufgefordert, die Richtung des Hörereignisses (φ_i) so exakt wie möglich anzugeben (*Phase 3*). Die Antwort des Probanden wird vom System aufgezeichnet.

In Erweiterung wird im Experiment „Räumlich-akustisches Arbeitsgedächtnis" eine Verzögerung (delay in ms-Auflösung) zwischen der Reizpräsentation und der Antwort des Probanden eingefügt (*Phase 2*). Diese bewirkt, daß die Richtungsinformation temporär (vermutlich im akustischen Kurzeit- bzw. Arbeitsgedächtnis) gespeichert werden muß. Während der Verzögerung ($\Delta\, t$) wird ein neutraler (leerer) Bildschirm eingeblendet, durch den eine visuelle Kodierung der Richtungsinformation vermieden werden soll. Würde der Antwortbildschirm (s. Abbildung 8.33) sofort präsentiert, könnte der Proband eine unmittelbare Zuordnung zwischen akustischer Reizposition und einem visuell dargebotenen kreisförmigen Bildpunkt vornehmen. Anstelle der akustischen Richtungsinformation würde der Proband die Position des Bildpunktes im visuellen Kurzzeitgedächntnis speichern. Dadurch wäre das akustische Arbeitsgedächtnis entlastet und das Untersuchungsergebnis systematisch verzerrt.

Transformationsproblem der Lokalisationsentscheidung

Ein Grundproblem von Lokalisationsexperimenten besteht in der Wahl der Methode, mit der der Proband die Richtung des Hörereignisses anzeigt bzw. mitteilt. Folgende Möglichkeiten können unterschieden werden:

- Lenken des Lichstrahls einer Laserdiode (z.B. [LE98a])
- Nennen von Polarkoordinaten (Azimuth, Elevation)
- Projektion der Horizontalebene auf einen Bildschirm (Proband deutet auf angezeigte Bildpunkte)
- Anzeige (z.B. mit dem Finger oder ausgestreckten Arm) an einer kreisförmigen Kopfhalterung (Hutkrempe mit 360 °-Einteilung)

Offensichtlich sind einige dieser Methoden eher für Normalpersonen (Polarkoordinaten, Lichtstrahl des Lasers führen), andere auch für den Einsatz an hirngeschädigten Patienten geeignet. Jede dieser Methoden erfordert allerdings eine *Transformationsleistung* vom Probanden (z.B. Umsetzung der Hörereignisrichtung auf die senkrechte Projektion einer Bildschirmdarstellung). Von Patienten mit räumlichen Störungen wird erwartet, daß das räumliche Vorstellungsvermögen beeinträchtigt ist. Diese Problematik wurde in der Konzeption der Experimente berücksichtigt. Durch die Realisierung einer manuellen Eingabemöglichkeit für die Richtungsentscheidung (s. Abbildung 8.34) können sämtliche der o.a. Methoden verwendet werden.

Konfiguration der Experimente „Lokalisation" und „Räumlich-akustisches Arbeitsgedächtnis"

Der prinzipielle Aufbau der Experimentkonfiguration gleicht dem der vorangegangenen Experimente. Als zusätzlicher Parameter wurde die *Verzögerungszeit* („Delay" vgl. Abbildung 8.33) aufgenommen, durch den der zeitliche Abstand zwischen der akustischen Reizpräsentation und der Richtungsentscheidung in ms definiert wird.

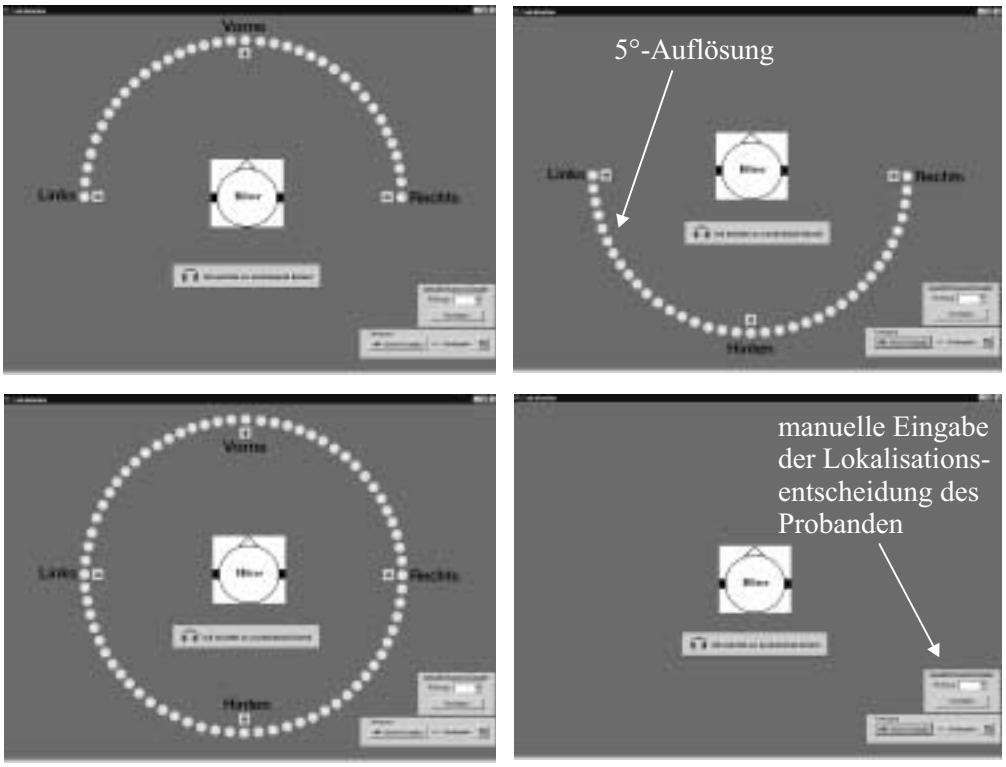


Abbildung 8.34: Vorlagen des Aufgabenbildschirms in den Experimenten „Lokalisation" und „Räumlich-akustisches Arbeitsgedächtnis"

Ebenfalls angepaßt wurde die *Gestaltung des Aufgabenbildschirms* als zentrales Element der Benutzerschnittstelle. Abbildung 8.34 zeigt die vordefinierten Vorlagen des Aufgabenbildschirms, aus denen der Anwender abhängig von der spezifischen Fragestellung der Untersuchung auswählen kann. Die Vorlagen unterscheiden zwischen Untersuchungen in der vorderen bzw. hinteren Hälfte der Horizontalebene („front-space" bzw. „back-space") und der horizontalen Vollebene. Die Antwort des Probanden erfolgt an einem visuell dargestellten Halb- bzw. Vollkreis, der aus interaktiven Kontaktpunkten aufgebaut ist. Der Abstand der Kontaktpunkte beträgt 5° und entspricht der minimalen Auflösung der räumlich-akustischen Simulation (vgl. Abschnitt 6). Bei Verwendung eines berührungssensitiven Monitors erfolgt die Richtungsentscheidung des Probanden durch Berührung eines Kontaktpunktes mit dem Finger. Aufgrund der o.a. Transformationsproblematik wurde zusätzlich ein Aufgabenbildschirm *ohne* visuelle Hinweisreize implementiert. Dieser neutrale Bildschirm ermöglicht die Verwen-

dung alternativer Methoden für die Mitteilung der Lokalisationsentscheidung, wobei die Entscheidung manuell durch den Untersucher eingegeben wird.

Der Übergang zwischen Experiment III und IV erfolgt durch die Wahl des Delay-Parameters. In der Experimentdurchführung wird während dieser Verzögerung eine leere (neutrale) Bildschirmmaske präsentiert. In der Konfiguration kann festgelegt werden, ob Reaktionszeiten (ms-Auflösung) vom System aufgezeichnet werden sollen. Für die Reaktionszeitmessung stehen zwei Startzeitpunkte zur Verfügung (s. Abbildung 8.33):

- Beginn der akustischen Reizpräsentation ($RT_{Var.1}$)
- Ende der akustischen Reizpräsentation[19] ($RT_{Var.2}$)

Im ersten Fall kann die Probandenantwort unter der Voraussetzung, daß kein Delay eingefügt wurde, schon während der Signalwiedergabe erfolgen. Im zweiten Fall wird sichergestellt, daß der Proband den akustischen Reiz in voller Länge gehört hat. Speziell für das Experiment IV wurde der in Abschnitt 8.4.2 erläuterte Sortieralgorithmus erweitert. Die Randomisierung kann (innerhalb definierbarer Schranken) wahlweise anhand der akustischen Reizposition oder des Delay-Parameters erfolgen.

Auswertung der Experimente „Lokalisation" und „Räumlich-akustisches Arbeitsgedächtnis"

Die Experimentauswertung erfolgt auf der Ebene von Einzeluntersuchungen. Dabei werden die zur Laufzeit der Untersuchung aufgezeichneten Antwortdaten nach folgenden Parametern analysiert:

- Lokalisationsfehler
- Reaktionszeit

Der *Lokalisationsfehler* ist die Winkeldifferenz zwischen der akustischen Reizposition und der Lokalisationsentscheidung des Probanden (Hörereignisrichtung). Aufgrund der Ergebnisse in den vorangegangenen Experimenten (vgl. Abbildungen 8.30 und 8.23) wird für Normalpersonen eine zuverlässige Lokalisation in der vorderen Hälfte der Horizontalebene erwartet. Gleichzeitig wird der Fehler an den seitlichen Rändern (90° bzw. 270°) aufgrund der reduzierten Lokalisationsfähigkeit in diesem Bereich zunehmen. Werden rückwärtige Reizpositionen (hintere Hälfte der Horizontalebene) einbezogen, können zusätzlich Richtungsinvertierungen („front-back-confusions") auftreten (s. Abschnitt 4.2.4), die in den Antwortdaten erkannt werden müssen. Im Umgang mit diesen Fehlern bestehen zwei Möglichkeiten:

- Entfernung aus den Antwortdaten

[19] bzw. Einblendung des Antwortbildschirms

- Separate Behandlung

Für Patienten mit einseitigen räumlichen Störungen wird generell ein größerer Lokalisationsfehler erwartet, der auf eine herabgesetzte Lokalisationsfähigkeit zurückgeht. Ferner sollten hemisphärenabhängige Effekte (Asymmetrien) zu beobachten sein (bessere Lokalisation in der intakten vs. schlechtere in der beeinträchtigten Seite). Diese Aussagen können durch die Reaktionszeitauswertung erhärtet werden. Im Experiment „Räumlich-akustisches Arbeitsgedächtnis" werden diese Parameter abhängig von der Verzögerung („Delay") ausgewertet.

8.6.3 Klinische Anwendung

Mit dem Experiment „Lokalisation" wird ein klassisches psychoakustisches Experiment unter klinischen Bedingungen realisiert, das mit der hohen Richtungsauflösung des binauralen Systems (5° in der Horizontalbene) bislang an Patienten mit räumlichen Störungen noch nicht durchgeführt wurde. In systematischen Untersuchungen können beispielsweise folgende Fragestellungen analysiert werden:

- Beurteilung der Lokalisationsfähigkeit in der vorderen *und* hinteren Hälfte der Horizontalebene
- Auswirkung systematischer Verlagerungen der akustischen Mittenwahrnehmung in der *hinteren* Hälfte der Horizontalebene
- Untersuchungen zur Hemisphärendominanz bei der Verarbeitung akustischer Reize

Bisherige Untersuchungen zur *Lokalisationsfähigkeit* an Patienten beschränken sich mit Ausnahme einer Studie ([VGNB95], Auflösung der akustischen Reizposition 10°) auf die vordere Hälfte der Horizontalebene. Das Experiment „Lokalisation" ermöglicht die systematische Bestimmung der räumlichen Hörleistung sowohl in getrennten Halbebenen (vordere, hintere Hälfte der Horizontalebene) als auch in der horizontalen Vollebene. Dadurch können die Auswirkungen einer krankheitsbedingten Verlagerung der *subjektiven akustischen Mitte* in der vorderen Halbebene auf die *hintere Halbebene* untersucht werden. Neben den bisherigen Fragestellungen zur Lokalisationsfähigkeit kann das Experiment auch in der *Hemisphärendominanzforschung* eingesetzt werden. Die Fragen richten sich in diesem Bereich an die funktionelle Spezialisierung der Hirnhälften. Durch Variation des akustischen Reizmaterials (Sprache, tonales, melodisches Material) kann die akustische Erkennungs- bzw. Verarbeitungsleistung in Abhängigkeit von der Position des Reizes untersucht werden. Dabei lassen sich Rechts- bzw. Linksohrvorteile, die für spezifisches Reizmaterial an Normalpersonen bekannt sind, auch an Patienten untersuchen.

Diese Fragestellungen können auch im Experiment „Räumlich-akustisches Arbeitsgedächtnis" aufgegriffen werden. Zusätzlich kann allerdings geprüft werden, welche Abhängigkeit diese Effekte von der Leistung des akustischen Arbeitsgedächtnisses aufweisen.

8.7 Experiment V: „Intensitäts-/Zeitdauer-/Frequenzdiskrimination"

Die bisherigen Experimente I - IV konzentrieren sich auf die Variation der Richtungsinformation im akustischen Signal. In Ergänzung dazu ermöglicht das Experiment „Intensitäts-/Zeitdauer-/Frequenzdiskrimination" die Kontrolle weiterer Signalparameter. Zu diesem Zweck wird ein Diskriminationsexperiment realisiert, bei dem, im Gegensatz zu den bisherigen Experimenten, *zwei* akustische Reize präsentiert werden, die durch den Probanden verglichen werden sollen. Einer der beiden Reize erhält die Funktion eines Referenz- oder Standardstimulus, während der zweite Reiz variable Merkmale aufweist, wobei die Reihenfolge zwischen beiden vertauscht werden kann. Als Merkmale werden charakteristische Signalparameter verwendet (Frequenz, Zeitdauer und Intensität). Die Aufgabe des Probanden besteht darin, Abweichungen zwischen beiden Reizen festzustellen und in einer Antwort dem System mitzuteilen. Obwohl Diskriminationsexperimente mit diesen Parametern bereits durchgeführt wurden (z.B. [JF95]) besteht die Besonderheit dieses Experiments darin, daß zusätzlich die akustische Richtung variiert werden kann. Die Bestimmung von Unterschiedsschwellen wird dadurch um eine Dimension erweitert.

8.7.1 Diagnostische Ziele und Hypothesen

Die Motivation für die Entwicklung dieses Experiments stammt aus Untersuchungen und Beobachtungen in der visuellen Modalität. Verfahren der visuellen Neglect-Diagnostik (vgl. Abschnitt 3.4.4) fordern den Patienten in jeweils beiden Raum-/Körperhälften zu Längenschätzungen (Linienhalbierung) und Größenschätzungen (Vergleich geometrischer Formen) auf. Dabei können spezifische, halbseitige Fehlschätzungen (Über- bzw. Unterschätzungen) festgestellt werden. Daraus leitet sich die Frage ab, ob diese Fehlschätzungen auf die visuelle Modalität beschränkt oder auch in der akustischen Modalität erkennbar sind. Obwohl eine eindeutige Abbildung der in der visuellen Modalität angewendeten Verfahren auf die akustische Modalität nicht möglich ist (visuelle Länge $\rightarrow$ Merkmal des akustischen Signals(?)), bestehen dennoch Ähnlichkeiten zu akustischen Signalparametern wie Frequenz, zeitliche Länge und Intensität.

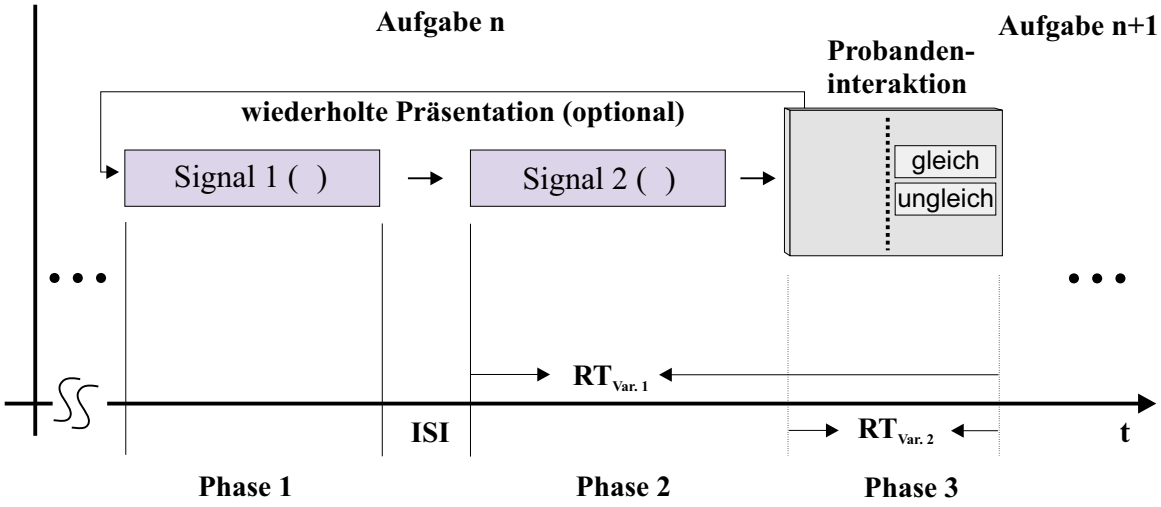
Klinisch-relevante Fragen richten sich zunächst an die Bestimmung von Unterschiedsschwellen in der Diskrimination dieser Merkmale, d.h. welche minimalen Abweichungen zwischen zwei Signalen gerade noch erkannt werden. Die Ergebnisse können anschließend mit den Leistungen von Normalpersonen und Kontrollgruppen verglichen und bewertet werden. Speziell bei Patienten mit Störungen der räumlichen Informationsverarbeitung werden einseitige Leistungsvariationen auch in der akustischen Modalität erwartet. Daneben erfordert die akustische Diskrimination, abhängig vom zeitlichen Abstand der beiden Reize, auch die Aktivierung des akustischen Arbeitsgedächtnisses.

8.7.2 Struktur und Leistungsmerkmale des Experiments

Nachfolgende Darstellung gibt zunächst einen Überblick über die Struktur und die Funktion des Experiments. Anschließend werden experimentspezifische Details der Experimentkonfiguration und -auswertung erläutert, die als Ergänzung der experimentübergreifenden Beschreibung in den Abschnitten 8.3.3 - 8.3.5 zu betrachten sind.

8.7.3 Struktur des Experiments „Intensitäts-/Zeitdauer-/Frequenzdiskrimination"

Die Struktur des Experiments ist in Abbildung 8.35 am Beispiel einer Aufgabe dargestellt. Die Aufgabe gliedert sich in drei Phasen. In *Phase I* wird ein vorgegebenes akustisches Signal präsentiert. Nach Ablauf eines Zeitintervalls (ISI Inter-Stimulus-Intervall) erfolgt die Wiedergabe des zweiten Signals in der *Phase 2*. Im Anschluß daran (*Phase 3*) wird der Proband aufgefordert, beide Signale hinsichtlich eines zuvor vereinbarten Merkmals miteinander zu vergleichen. Kann der Proband die Entscheidung nicht treffen, besteht die Möglichkeit zur wiederholten Reizpräsentation. Das Ergebnis des Vergleichs (z.B. „Gleich" / „Ungleich") teilt der Proband anschließend dem System durch Aktivierung eines Buttons am Aufgabenbildschirm mit.



= (*f* + I + *t* +) **Frequenz-, Intensitäts-, Zeitdauer-, Richtungsvariation**

$RT_{Var.\ 1\ bzw.\ 2}$ **Reaktionszeit Variante 1 bzw. 2 [ms]**

ISI **Inter-Stimulus-Intervall [ms]**

Abbildung 8.35: Struktur des Experiments „Intensitäts-/Zeitdauer-/Frequenzdiskrimination"

Eines von beiden akustischen Signalen erhält die Funktion eines Standard- oder Referenzstimulus, während das andere Signal variable Eigenschaften aufweist. Signal 1

und 2 können sich in einem oder mehreren der folgenden Merkmale unterscheiden:

- Zeitliche Länge ($T/(T \pm \Delta t)$
- Intensität ($I/(I \pm \Delta I)$
- Frequenz (bei Tönen $f/(f \pm \Delta f)$
- akustische Reizposition ($\varphi/(\varphi \pm \Delta \varphi)$

In einem typischen Experiment wird beipielsweise ein Merkmal bzw. Parameter ausgewählt. In der Konfiguration wird eine Aufgabenfolge erstellt, in der die Größe des Merkmals zufällig innerhalb vorgegebener Schranken variiert. Anhand der Fehlerverteilung in den Antwortdaten kann die Schwelle bestimmt werden, an der der Proband beide Signale gerade noch/nicht mehr unterscheiden kann.

Während der Untersuchung wird die Antwort des Probanden aufgezeichnet. Bei entsprechender Konfiguration wird zusätzlich die Reaktionszeit (RT, ms-Auflösung) bestimmt, wobei der Startzeitpunkt der Reaktionszeitmessung aus zwei Alternativen gewählt werden kann (s. Abbildung 8.35):

- Beginn der Wiedergabe von Signal 2 ($RT_{Var.1}$)
- Ende der Wiedergabe von Signal 2[20] ($RT_{Var.2}$)

Bei Variante 1 kann die Reaktion des Probanden schon während der Präsentation des zweiten Reizes erfolgen. Diese Wahl ist z.B. für Parameter wie Frequenz, Intensität und Richtung sinnvoll. Im Gegensatz dazu wird die Reaktion im Fall der Variante 2 erst nach dem Präsentationsende von Signal 2 ermöglicht. Diese Wahl ist beispielsweise für Untersuchungen zur Zeitdauerdiskrimination sinnvoll, da sichergestellt werden muß, daß der Proband beide Signale in voller Länge gehört hat.

Konfiguration des Experiments „Intensitäts-/Zeitdauer-/Frequenzdiskrimination"

Abbildung 8.36 zeigt die Realisierung der Komponente KONFIGURATION. In Ergänzung zu den bisherigen Konfigurationsmöglichkeiten (vgl. z.B. Abschnitt 8.4.2) wurde die Anpassung des Aufgabenbildschirms erweitert. Dem Anwender stehen mehrere Vorlagen des Aufgabenbildschirms zur Verfügung, die sich im wesentlichen durch die Positionierung der Antwortbuttons unterscheiden (zentriert, links, rechts). Zusätzlich besteht die Möglichkeit, das Aussehen der Antwortbuttons benutzerdefiniert zu variieren. Dabei kann zum einen die Beschriftung geändert werden, zum anderen kann das im Button eingeblendete Icon[21] frei definiert werden. Mit Hilfe der implementierten Vorschau kann der Anwender prüfen, ob der Text bzw. das gewählte Icon im

[20] bzw. Einblendung des Antwortbildschirms
[21] kleines, aus Pixeln aufgebautes Bild

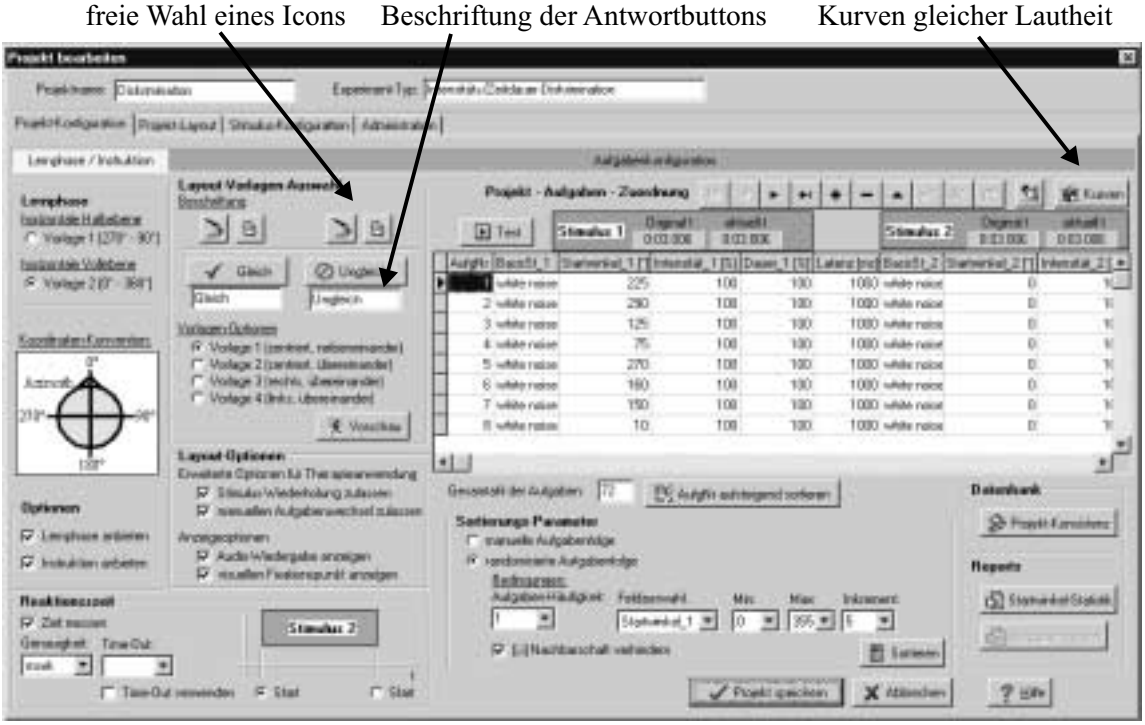


Abbildung 8.36: Konfiguration des Experiments „Intensitäts-/Zeitdauer-/Frequenzdiskrimination"

Button sichtbar ist und keine gegenseitigen Verdeckungen auftreten. Durch diese Anpassungsmöglichkeiten erhöht sich die Anzahl möglicher Aufgabestellungen. Beispiele dafür sind:

- „Gleich" / „Ungleich"
- „Signal 1" / „Signal 2"

Im ersten Fall wird lediglich unterschieden, ob beide akustische Signale bezüglich eines Merkmals identisch sind oder nicht, während im zweiten Fall vom Probanden zusätzlich die Erkennung und Zuordnung des veränderten Signals gefordert wird. Letztgenannter Fall ist dann bedeutsam, wenn die Reihenfolge von Standard- und variablem Stimulus vertauscht wird und die Auswirkungen der Vertauschung untersucht werden sollen.

In der Tabelle PROJEKT-AUFGABEN-ZUORDNUNG werden die Einzelaufgaben konfiguriert, wobei jeder Aufgabe eine Zeile zugeordnet ist. Durch die Spalten werden folgende experimentelle Parameter definiert:

- akustischer Basisstimulus (1 und 2)[22]

[22](1 und 2): unabhängige Wahl der Parameter für Signal 1 und Signal 2

- akustische Reizposition (1 und 2)
- Intensität (1 und 2)
- Dauer (1 und 2)
- Latenz (ISI)

Durch die Option, den akustischen Basisstimulus für beide Signale getrennt zu wählen, werden Aufgabenstellungen einbezogen, die neben idealen Testsignalen (Töne, weißes Rauschen) auch die Verwendung von sprachlichem Material vorsehen (s. Abschnitt 8.7.4). Mit dem Parameter *Intensität* wird die Lautheit des Signals variiert (wahlweise dB-skaliert oder prozentual). Technisch erfolgt die Variation dynamisch, d.h.zur Laufzeit des Experiments durch Anpassung des Aussteuerungspegels am digitalen Signal. Für die experimentelle Durchführung muß in diesem Zusammenhang berücksichtigt werden, daß im verwendeten Betriebssystem (MS-Windows) Lautstärkeeinstellungen der Audio-Wiedergabe an mehreren Stellen unabhängig voneinander vorgenommen werden können. Für den praktischen Einsatz erfordert dieser Umstand Schalldruckpegelmessungen mit einem externen Meßgerät im Vorfeld der Untersuchung und die Festlegung von Referenzeinstellungen an allen betriebssysteminternen Einstellungsmöglichkeiten. Der Parameter *Dauer* verändert die zeitliche Länge des Signals (wahlweise ms oder prozentual). Die Maximallänge des Signals entspricht der Länge des Originalsignals. Während der Wiedergabe wird abhängig von der Abtastrate die Sampleposition bestimmt, bis zu der die Wiedergabe erfolgen soll, wobei die Trunkierung am Signalende beginnt.

Zusätzlich kann das *Inter-Stimulus-Intervall* (ISI), also der zeitliche Abstand zwischen beiden Signalen, für jede Aufgabe getrennt definiert werden (ms-Auflösung). Dies ermöglicht einerseits die Kontrolle von Leistungen des akustischen Arbeitsgedächtnisses, da Reizmerkmale während dieser Zeit im Arbeitsspeicher gehalten werden müssen. Andererseits bietet sich die Möglichkeit zur Untersuchung psychakustischer Effekte, die im Zusammenhang mit Reizdarbietungen in kurzen zeitlichen Abständen auftreten („Gesetz der ersten Wellenfront" s. Abschnitt 4.5.2).

Aufgrund der im Vergleich zu den anderen Experimenten größeren Anzahl experimenteller Parameter wurden zur Unterstützung systematischer Untersuchungen die Sortierungsmöglichkeiten erweitert. Zur Generierung einer randomisierten Aufgabenfolge können alle Tabellenspalten (Parameter) verwendet werden, wobei zusätzlich bei numerischen Parametern (akustische Richtung, Dauer, Intensität, ISI) Schranken (minimaler, maximaler Wert) und Inkrementweiten gewählt werden können.

Auswertung des Experiments „Intensitäts-/Zeitdauer-/Frequenzdiskrimination"

Bedingt durch die Vielzahl möglicher experimenteller Fragestellungen wurde in dieser Komponente auf die Implementierung einer integrierten Auswertungskomponente verzichtet. Alternativ steht, wie bei den vorhergehenden Experimenten auch, eine

Schnittstelle für den Datenexport zur Verfügung, durch die sämtliche Konfigurations- und Antwortparameter in Tabellenform (ASCII-Format) zur Weiterverarbeitung der Daten exportiert werden können.

8.7.4 Klinische Anwendung

Die flexible Struktur des Experiments erlaubt zunächst die Realisierung zahlreicher psychoakustischer Experimente (Intensitäts-/Zeitdauer-/Frequenzdiskrimination), die mit Hilfe des Systems unter klinischen Randbedingungen am Patienten durchgeführt werden können. Dabei kann auf umfangreiche Referenzdaten zurückgegriffen werden, die in Studien an hörgesunden Normalpersonen ermittelt wurden (z.B. [JF95]).

Als Erweiterung zu diesen klassischen Untersuchungen besteht im vorliegenden Experiment die Möglichkeit zur richtungsabhängigen Signalpräsentation, d.h. Diskriminationsleistungen können abhängig von der Richtung des akustischen Reizes analysiert werden. Beispielsweise können Aufgaben zur Zeitdauerdiskrimination in unterschiedlichen Quadranten der Horizontalebene beobachtet werden, wobei speziell von Patienten mit einseitigen räumlichen Verarbeitungsstörungen hemisphärenabhängige Leistungsdefizite erwartet werden.

Eine aus neuropsychologischer Sicht neue Richtung erschließt sich durch Aufgabenstellungen, bei denen der akustische Reiz ein *Sprachsignal* ist. Dadurch lassen sich beispielsweise interferierende Effekte bei der Darbietung kurzer Silben (da, ba, ga) untersuchen, die alternierend aus linken und rechten Reizpositionen empfangen und verarbeitet werden. Der Einsatzbereich des Experiments beschränkt sich daher nicht auf die Untersuchung räumlich-akustischer Verarbeitungsstörungen sondern wird durch Anwendungen im Bereich der Sprachverarbeitung ergänzt.

Kapitel 9

Ausblick

Mit der Entwicklung und Erprobung des anwendungsorientierten Systems *Comp*X konnten zahlreiche Erfahrungen darüber gewonnen werden, wie Entwicklungspotentiale für computerunterstützte experimentelle Verfahren entdeckt werden können und welche Vorgehensweise zur Erschließung der klinischen Nutzbarkeit notwendig, sinnvoll und effizient ist. Ergänzend dazu bestand die Möglichkeit, einen Einblick in das methodische Vorgehen, die Arbeitsweise und die Organisation der medizinisch/psychologischen Behandlung hirngeschädigter Patienten zu erhalten. Im folgenden werden Ideen für zukünftige Entwicklungen vorgestellt, die zum einen auf dem Systemkonzept von *Comp*X aufbauen, sich zum anderen aber auch neuen Fragestellungen zuwenden.

Erweiterung räumlich-akustischer Untersuchungen

Die räumlich-akustischen Experimente in *Comp*X gehen vom *zeitinvarianten* Elementarfall *einer* Schallquelle an *einem* Ort aus. Eine sinnvolle Erweiterung besteht darin, den Elementarfall zu verallgemeinern und *zeitvariante* Aspekte des räumlichen Hörens zu berücksichtigen:

- mehrere Schallquellen
- bewegte Schallquelle(n)
- variable Entfernung der Schallquelle(n)

Während die Simulation *mehrerer* Schallquellen mit *Comp*X technisch realisierbar ist (z.B. Verwendung mehrerer richtungsgefilterter Audiodateien im Maskierungsmodul vgl. Abschnitt 5.3.2), können für die Simulation *bewegter* Schallereignisse z.B. die an diskreten Orten gemessenen Impulsantworten interpoliert werden. In einer Abschätzung ist zu prüfen, ob der beim „natürlichen" Hören vorhandene *Doppler-Effekt* nachgebildet werden muß. Ein ähnlicher Ansatz kann für die Simulation der Entfernungsabhängigkeit angewendet werden.

Bei Patienten mit räumlichen Störungen (Neglect, Hemianopsie) können damit verstärkt *dynamische Aspekte* der räumlich-akustischen Verarbeitung überprüft werden.

Entwicklung experimenteller Verfahren zur Behandlung von Sprachstörungen auf der Textebene

Die klinische Behandlung von Sprachstörungen konzentriert sich bislang auf die Wort- bzw. Satzebene, obwohl sich die Bedeutung vieler sprachlicher Äußerungen erst auf der darüberliegenden *Textebene* erschließt (vgl. Abschnitt 3.5.2). Im Rahmen experimenteller Anwendungen kann z.B. der Einfluß *prosodischer Information* auf das Textverstehen unter idealen und erschwerten Bedingungen (z.B. Ablenkung durch Umweltgeräusche) untersucht werden.

Aus technischer Sicht erfordert dieser Ansatz die Entwicklung von Verfahren der digitalen Sprachsignalverarbeitung, die es erlauben, *prosodische Information* kontrolliert zu verändern (z.B. Akzentuierung ausgewählter Silben). Aufgrund der Abhängigkeit des Textverstehens von der Kontextinformation ergeben sich gleichzeitig Anforderungen an eine *multimediale* Aufbereitung der experimentellen Anwendung.

Entwicklung einer Systemlösung für die Telediagnostik- bzw. -therapie

Die Grundidee der *Telediagnostik- bzw. -therapie* besteht in der räumlichen Trennung von Behandlungsplanung, -durchführung und -auswertung. Eine *diagnostische* Anwendung besteht im Aufbau einer zentralen Befundungsstelle, an die Patientendaten aus Kliniken und logopädischen Praxen zur Expertise übermittelt werden. Dadurch kann Expertenwissen konzentriert werden, wodurch die Qualität der Sprachdiagnostik erhöht wird und gleichzeitig Kosten gesenkt werden können. In der *Therapie* können z.B. Behandlungsabläufe von einer zentralen Stelle geplant, erstellt und evtl. auch *„online"* mit dem Patienten durchgeführt werden.

Die technische Realisierung erfordert zunächst einen geeigneten (evtl. geschützten) Kommunikationsdienst, durch den Sprach-, Bild- und Dateninformationen zwischen den Teilnehmern ausgetauscht werden können. Als Übertragungsmedium zur Signalübermittlung bietet sich die vorhandene Netzinfrastruktur des Internets an.

Literaturverzeichnis

[Abs97] CD-ROM Database With Abstracts. *Neuroscience Citation Index*. Institute for Scientific Information, Philadelphia, 1997. www.isinet.com.

[Ahr94] T. Ahrndt. *Entwurf und Erprobung von Computersystemen zur Untersuchung zerebral bedingter Sprechstörungen*. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Universität der Bundeswehr, 1994.

[AKZ99] F. Artinger, G. Kerkhoff, and W. Ziegler. A new PC-based system for the analysis of spatial hearing in man using binaural simulation. Journal of Neuroscience Methods (eingereicht), Oktober 1999.

[And88] J., R. Anderson. *Kognitive Psychologie: eine Einführung*. Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg, 1988.

[Art99] F. Artinger. CompX: Interaktives PC-gestütztes System für die therapieorientierte Diagnose lexikalisch bedingter Sprachstörungen. Hochschulkurier 4, Universität der Bundeswehr München, Januar 1999.

[ASLS93] R., A. Andersen, L., H. Snyder, C., S. Li, and B. Stricanne. Coordinate transformation in the representation of spatial information. *Current Opinion in Neurobiology*, 3:171–176, 1993.

[AZKL99] F. Artinger, W. Ziegler, G. Kerkhoff, and A. Lorenz. PC-basierte Aufgabenentwicklung in der klinischen Neuropsychologie unter besonderer Berücksichtigung der akustischen Modalität. In *Arbeitsgemeinschaft für Aphasieforschung und -behandlung*. Deutsche Gesellschaft für Neurotraumatologie und Klinische Neuropsychologie (DGNKN), November 1999.

[BCLP81] E. Bisiach, E. Capitani, C. Luzzatti, and D. Perani. Brain and conscious representation of outside reality. *Neuropsychologia*, 19:543–551, 1981.

[BCSV84] E. Bisiach, L. Cornacchia, R. Sterzi, and G. Vallar. Disorders of perceived auditory lateralization after lesions of the right hemisphere. *Brain*, 107:37–52, 1984.

[Beg91] D., R. Begault. Challenges to the successful implementation of 3-D sound. *Journal of the Audio Engineering Society*, 39(11):864–870, 1991.

[BL78] E. Bisiach and C. Luzzatti. Unilateral neglect of representational neglect. *Cortex*, 14:129–133, 1978.

[Bla68] J. Blauert. Ein Beitrag zur Trägheit des Richtungshörens in der Horizontalebene. *Acustica*, 20:200–206, 1968.

[Bla97] J. Blauert. *Spatial Hearing.* MIT Press, Cambridge, England, 1997.

[BM66] R. Brown and D. McNeill. The „tip of the tongue" phenomenon. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 5:325–337, 1966.

[Boo94] G. Booch. *Objektorientierte Analyse und Design.* Addison-Wesley, 1994.

[Bor93] J. Bortz. *Statistik für Sozialwissenschaftler.* Springer, Berlin, Heidelberg, 1993.

[Bre97] U. Breymann. *C++: eine Einführung.* Hanser, München, Wien, 1997.

[BSv89] U. Blaettner, M. Scherg, and D. von Cramon. Diagnosis of unilateral telencephalic hearing disorders. Evaluation of a simple psychoacoustic pattern discrimination test. *Brain*, 112(1):177–195, 1989.

[Bun98] Statistisches Bundesamt. Gesundheitsberichterstattung des Bundes. Technical report, Bundesministerium für Gesundheit und Bundesministerium für Bildung und Forschung, 1998.

[Bur97] R. Burkhardt. *UML - Unified Modeling Language.* Addison-Wesley-Longman, 1997.

[Bus99] N., A. Busis. Neurosciences on the internet: Software. Technical report, Neurosciences on the internet, 1999. www.neuroguide.com.

[Car97] A. Caramazza. How many levels of processing are there in lexical access? *Cognitive Neuropsychology*, 14(1):177–208, 1997.

[CBV97] G., G. Celesia, M. Brigell, and M., S. Vaphiades. Hemianopic anosognosia. *Neurology*, 49:88–97, 1997.

[CDRG90] M. Colombo, M., R. D'Amato, H., R. Rodman, and C., G. Gross. Auditory association cortex lesions impair auditory short-term memory in monkeys. *Science*, 247:336–338, 1990.

[CLC95] S., B. Chapman, H., S. Levin, and K., A. Culhane. Language impairment in closed head injury. In H., S. Kirshner, editor, *Handbook of Neurological Speech and Language Disorders.* Dekker, New York, 1995.

[CMZ93] D., Y. Cramon, N. Mai, and W. Ziegler. *Neurologie: Neuropsychologische Diagnostik.* VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1993.

[Cod70] E., F. Codd. A relational model of data for large shared data banks. *Communications of the ACM*, 13:377–387, 1970.

[D+92] N., I. Durlach et al. On the externalization of auditory images. *Presence*, 1(2):251–257, 1992.

[Dir98] Microsoft DirectX. DirectX Overview. Technical report, Microsoft Corporation, 1998. www.microsoft.com/directx.

[Ebn97] M. Ebner. *C++Builder-Datenbankprogrammierung.* Addison-Wesley-Longman, 1997.

[EH93] B. Eppinger and E. Herter. *Sprachverarbeitung, Reihe Informations- und Nachrichtentechnik.* Hanser, München, Wien, 1993.

[Ell91] A., W. Ellis. *Einführung in die kognitive Neuropsychologie.* Hans Huber, Bern, 1991.

[EYNC85] R. Efron, E., W. Yund, D. Nichols, and P., H. Crandall. An ear asymmetry for gap detection following anterior temporal lobectomy. *Neuropsychologia*, 23(1):43–50, 1985.

[Fel91] K. Fellbaum. *Elektronische Sprachverarbeitung.* Franzis-Verlag, Stuttgart, 1991.

[FFNA96] T. Fuse, T. Funakubo, T. Nakamura, and M. Aoyagi. Quantitative analysis of sound localization with ocular positioning. *NeuroReport*, 7:1589–1592, 1996.

[Fin90] M. Finsterwald. *Methoden zur Diagnose und biofeedbackgesteuerten Therapie von sprechmotorischen Störungen.* Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Universität der Bundeswehr, 1990.

[Fri84] A., D. Friederici. *Neuropsychologie der Sprache.* Kohlhammer, Stuttgart, 1984.

[G+81] T. Gotoh et al. A proposal of normalization for binaural recording. *Audio Engineering Society*, 1811(B-2):1–14, 1981. preprint.

[Gar82] M., F. Garrett. Production of speech: observations from normal and pathological language production. In A. Ellis, editor, *Normality and pathology in cognitive functions.* Academic Press, London, 1982.

[GK93] P. Gerdsen and P. Kröger. *Digitale Signalverarbeitung in der Nachrichtenübertragung.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1993.

[Gla93] W., R. Glaser. Picture naming. In W., J., M. Levelt, editor, *Lexical Access in Speech Production.* Blackwell, Cambridge MA, 1993.

[GM95] W., G. Gardner and K., D. Martin. HRTF measurements of a KEMAR. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97(6):3907–3908, 1995.

[Gol97] G. Goldenberg. *Neuropsychologie: Grundlagen, Klinik, Rehabilitation.* Gustav Fischer, Stuttgart, 1997.

[HP89] D. Howard and K., E. Patterson. Models of therapy. In X. Seron and G. Deloche, editors, *Cognitive Approaches in Neuropsychological Rehabilitation.* Lawrence Erlbaum, Hillsdale, N.J., 1989.

[HPF+85a] D. Howard, K., E. Patterson, S. Franklin, V. Orchard-Lisle, and J. Morton. The facilitation of picture naming in aphasia. *Cognitive Neuropsychology*, 2:49–80, 1985.

[HPF+85b] D. Howard, K., E. Patterson, S. Franklin, V. Orchard-Lisle, and J. Morton. The treatment of word retrieval deficits in aphasia: a comparison of two therapy methods. *Brain*, 108:817–829, 1985.

[HPS91] W. Huber, K. Poeck, and L. Springer. *Sprachstörungen: Ursachen und Behandlung von Sprachstörungen (Aphasien) durch Schädigungen des zentralen Nervensystems.* TRIAS-Thieme Hippokrates Enke, Stuttgart, 1991.

[HPW83] W. Huber, K. Poeck, and D. Weniger. *Aachener Aphasie Test (AAT), Handanweisung.* Hogrefe, Göttingen, 1983.

[HSMK97] M. Husain, K. Shapiro, J. Martin, and C. Kennard. Abnormal temporal dynamics of visual-attention in spatial neglect patients. *Nature*, 385:154–156, 1997.

[Ins95] Bibliographisches Institut. *Meyers Lexikon.* Brockhaus AG, Mannheim, 1995.

[JF95] J., Y. Jeon and F., R. Fricke. The effect of frequency on duration judgements. *Acustica*, 81:136–144, 1995.

[JL94] J., D. Jescheniak and W., J., M. Levelt. Word frequency effects in speech production: Retrieval of syntactic information and of phonological form. *Journal of Experimental Psychology: Language, Memory and Cognition*, 20:824–843, 1994.

[K+98] T. Kubo et al. Sound lateralization and speech discrimination in patients with sensorineural hearing loss. *Acta Otolaryngol*, Suppl 538:63–69, 1998.

[Kar94] H., O. Karnath. Disturbed coordinate transformation in the neural representation of space as the crucial mechanism leading to neglect. In P., W. Halligan and J., C. Marshall, editors, *Spatial Neglect: Position papers on theory and practice.* Lawrence Erlbaum, Hillsdale, 1994.

[Kar97] H., O. Karnath. Neglect. In W. Hartje and K. Poeck, editors, *Klinische Neuropsychologie.* Thieme, Stuttgart, 1997.

[KAZ99] G. Kerkhoff, F. Artinger, and W. Ziegler. Contrasting spatial hearing deficits in hemianopia and spatial neglect. *Neuroreport*, 10 (17):3555–3560, 1999.

[KAZ00a] G. Kerkhoff, F. Artinger, and W. Ziegler. Akustisch-räumliche Wahrnehmungsstörungen nach Hirnschädigung: Kontrastierende Effekte von Hemianopsie versus Hemineglect in der subjektiven, akustischen Geradeauseinschätzung. Tagung der experimentell arbeitenden Psychologen (TEAP) (Vortrag), April 2000.

[KAZ00b] G. Kerkhoff, F. Artinger, and W. Ziegler. Contrasting and combined spatial hearing deficits in hemianopia and spatial neglect. Workshop on Cognitive Neuropsychology, Januar 2000.

[KB95] E., I. Knudsen and M., S. Brainard. Creating a unified representation of visual and auditory space in the brain. *Annual Review of Neuroscience*, 18:19–43, 1995.

[Ker99] G. Kerkhoff. Neglect. In R. Götze and B. Höfer, editors, *Alltagsorientierte Therapie*. Thieme, Stuttgart, 1999.

[KH97] H., O. Karnath and W. Hartje. Neglect - Symptomatik, Diagnostik, Anatomie und Erklärungskonzepte. In N. Birbaumer, D. Frey, J. Kuhl, W. Prinz, and F., E. Weinert, editors, *Enzyklopädie der Psychologie*. Hogrefe, Göttingen, Bern, Toronto, Seattle, 1997.

[KM95] G. Kerkhoff and C. Marquardt. VS - A new computer program for detailed offline analysis of visual-spatial perception. *Journal of Neuroscience Methods*, 63:75–84, 1995.

[Kna97] M. Knauff. *Räumliches Wissen und Gedächtnis*. DUV Deutscher UniversitätsVerlag, Wiesbaden, 1997.

[KS97] G. Kerkhoff and I. Schindler. Hemineglect versus Hemianopsie. Hinweise zur Differentialdiagnostik. *Fortschritte der Neurologie und Psychiatrie*, 65:278–289, 1997.

[KS98] G. Kerkhoff and I. Schindler. Neurovisuelle Störungen. In P. Frommelt and H. Grötzbach, editors, *Neurorehabilitation*. Blackwell, Berlin, 1998.

[Kuc87] H. Kuchling. *Physik*. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1987.

[KW92] D., J. Kistler and F., L. Wightman. A model of head-related transfer functions based on principal components analysis and minimum-phase reconstruction. *Journal of the Acoustical Society of America*, 91(3):1637–1647, 1992.

[KW93] B. Kolb and I., Q. Whishaw. *Neuropsychologie*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1993.

[Lam94] G. Lamberti. Persönlichkeit und Krankheitsverarbeitung nach Schlaganfall. In I. Ohlendorf, T., A. Pollow, W. Widdig, and D., B. Linke, editors, *Sprache und Gehirn*. HochschulVerlag, Freiburg, 1994.

[LE96] J. Lewald and W., H. Ehrenstein. The effect of eye position on auditory lateralization. *Experimental Brain Research*, 108:473–485, 1996.

[LE98a] J. Lewald and W., H. Ehrenstein. Audio-visual spatial integration: a new psychophysical approach using laser pointing to acoustic targets. *Journal of the Acoustical Society of America*, 104:1586–1597, 1998.

[LE98b] J. Lewald and W., H. Ehrenstein. Influence of head-to-trunk position on sound lateralization. *Experimental Brain Research*, 121(3):230–238, 1998.

[Leh91] H. Lehnert. Strahlverfolgungsverfahren (Ray-Tracing) mit punktförmigen Quellen und Empfängern sowie idealen Strahlern. In J. Blauert and E. Paulus, editors, *Fortschritte der Akustik (DAGA91)*. DPG, Bad Honnef, 1991.

[Lev83] W., J., M. Levelt. Monitoring and self-repair in speech. *Cognition*, 14:41–104, 1983.

[Lev89] W., J., M. Levelt. *Speaking: From intention to articulation*. MIT Press, Cambridge MA, 1989.

[Lev93] W., J., M. Levelt. Accessing words in speech production: stages, processes and representations. In W., J., M. Levelt, editor, *Lexical Access in Speech Production*. Blackwell Publishers, Cambridge, 1993.

[Lük90] H., D. Lüke. *Signalübertragung*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1990.

[LKE99] J. Lewald, H., O. Karnath, and W., H. Ehrenstein. Neck-proprioceptive influence on auditory lateralization. *Experimantal Brain Research*, 125:389–396, 1999.

[LPM98] W., J., M. Levelt, P. Praamstra, and A., S. Meyer. An MEG study of picture naming. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10:5:553–567, 1998.

[LRM98] W., J., M. Levelt, A. Roelofs, and A., S. Meyer. A theory of lexical access in speech produktion. *Behavioral and Brain Science*, in Press, 1998.

[LSV+91] W., J., M. Levelt, H. Schriefers, D. Vorberg, A., S. Meyer, T. Pechmann, and J. Havinga. The time course of lexical access in speech production: A study of picture naming. *Psychological Review*, 98:122–142, 1991.

[May99] S. Mayer. Jajaja, papperlapapp. *DIE ZEIT*, 18, 1999.

[MB95] E. Mommertz and G. Bayer. PC-based high frequency range M-sequence measurements using an interleaved sampling method. *Acustica*, 81:80–83, 1995.

[MG91] J., C. Middlebrooks and D., M. Green. Sound localization by human listeners. *Annual Reviews of Psychology*, 42:135–159, 1991.

[MM90] J., C. Makous and J., C. Middlebrooks. Two-dimensional localization by human listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*, 22:468–473, 1990.

[MWR97] H., M. Müller, S. Weiss, and G. Rickheit. Experimentelle Neurolinguistik. In Bielefelder Linguistik, editor, *Linguistik: Die Bielefelder Sicht.* Aisthesis-Verlag, Bielefeld, 1997.

[NB96] L. Nickels and W. Best. Therapy for naming disorders (part I): principles, puzzles and progress. *Aphasiology*, 10:21–47, 1996.

[Nei67] U. Neisser. *Cognitive Psychology.* Appleton-Century-Crofts, New York, 1967.

[OD99] Online-Database. *HealthWorld Medline Search.* HealthWorld Online, Lakewood, 1999. www.healthy.net.

[OP86] S., R. Oldfield and S., P Parker. Acuity of sound localisation: a topography of auditory space. III. Monaural hearing conditions. *Perception*, 15(1):67–81, 1986.

[oS95] UNESCO Division of Statistics. UNESCO DATABASE: Quote of Illiteracy. Technical report, UNESCO, Paris, 1995. unesco-stat.unesco.org/database.

[OS99] A., V. Oppenheim and R., W. Schafer. *Zeitdiskrete Signalverarbeitung.* Oldenburg-Verlag, München, Wien, 1999.

[PBK70] P. Plath, J. Blauert, and G. Klepper. Untersuchungen über die Trägheit des Richtungshörens bei Gesunden und Patienten. *Archiv der klinischen und experimentellen Ohrenheilkunde*, 196:212–215, 1970.

[PDCB89] B. Pinek, J., R. Duhamel, C. Cave, and M. Brouchon. Audio-spatial deficits in humans: differential effects associated with left versus right hemisphere parietal damage. *Cortex*, 25:175–186, 1989.

[Pet96] C. Petzold. *Windows 95 Programmierung.* Microsoft Press Deutschland, Unterschleißheim, 1996.

[Poe89] K. Poeck. *Klinische Neuropsychologie.* Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York, 1989.

[RHP81] R., M. Ruff, N., A. Hersh, and K., H. Pribram. Auditory spatial deficits in the personal and extrapersonal frames of reference due to cortical lesions. *Neuropsychologia*, 19:435–443, 1981.

[Rin95] J., H. Rindel. Computer simulation techniques for acoustical design of rooms. Acoustics Australia, September 1995.

[Roe92] A. Roelofs. A spreading-activation theory of lemma retrieval in speaking. *Cognition*, 42:107–142, 1992.

[Rot92] M. Roth. *Computer in der Sprachtherapie*. Gunter Narr Verlag, Tübingen, 1992.

[RV89] D., D. Rife and J. Vanderkooy. Transfer-function measurement with maximum-length sequences. *Journal of the Audio Engineering Society*, 37:419–443, 1989.

[SBL86] M., T. Sarno, A. Buonaguro, and E. Levita. Characteristics of verbal impairment in closed head injured patients. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 67:400–405, 1986.

[SCGM97] N. Soroker, N. Calamaro, J. Glicksohn, and M., S. Myslobodsky. Auditory inattention in right-hemisphere-damaged patients with and without visual neglect. *Neuropsychologia*, 35(1):249–256, 1997.

[Sch95] A. Schmitz. Ein neues digitales Kunstkopfmeßsystem. *Acustica*, 81:416–420, 1995.

[SHW99] W. Sturm, M. Herrmann, and C., W. Wallesch. *Lehrbuch der Klinischen Neuropsychologie*. Swets und Zeitlinger, Amsterdam, 1999.

[SJK+95] E., E. Smith, J. Jonides, R., A. Koeppe, E. Awh, E., H. Schuhmacher, and S. Minishima. Spatial versus object working memory:PET investigations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7(3):337–356, 1995.

[SM90] B., E. Stein and M., A. Meredith. Multisensory integration. neural and behavioral solutions for dealing with stimuli from different sensory modalities. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 608:51–65, 1990.

[SML90] H. Schriefers, A., S. Meyer, and W., J., M. Levelt. Exploring the time course of lexical access in language production: picture-word interference studies. *Journal of Memory and Language*, 29:86–102, 1990.

[Spi88] G. Spikofski. The diffuse-field probe transfer function of studio-quality headphones. *EBU Review Technical*, 229:111–126, 1988.

[Tei95] J. Teiwes. *PHONX - ein computerunterstütztes Experimentiersystem zur Analyse, Diagnose und Therapie zentral bedingter Störungen von Sprachverarbeitungsprozessen*. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Universität der Bundeswehr, 1995.

[TK78] D. Tsichritzis and A. Klug. The ANSI/X3/SPARC DBMS Framework Report of the Study Group on Database Management Sytems. *Information Systems*, 3:173–191, 1978.

[Unl95] R. Unland. *Objektorientierte Datenbanken.* International Thomson Publishing, Thomson's Aktuelle Tutorien,4, 1995.

[VAG97] G. Vigliocco, T. Antonini, and M., F. Garrett. Grammtical gender is on the tip of Italian tongues. *Psychological Science*, 8:314–317, 1997.

[Val93] G. Vallar. The anatomical basis of spatial neglect in humans. In I., H. Robertson and J. Marshall, editors, *Unilateral neglect: clinical and experimental studies.* Hove, LEA, 1993.

[Van94] J. Vanderkooy. Aspects of MLS measuring systems. *Journal of the Audio Engineering Society*, 42:219–231, 1994.

[VGNB95] G. Vallar, C. Guariglia, D. Nico, and E. Bisiach. Spatial hemineglect in back space. *Brain*, 118:467–472, 1995.

[VGR97] G. Vallar, C. Guariglia, and M., L. Rusconi. Modulation of the neglect syndrome by sensory stimulation. In P. Thier and H., O. Karnath, editors, *Parietal Lobe Contributions to Orientation in 3D Space.* Springer, Berlin, 1997.

[Vos95] G. Vossen. *Datenbank-Theorie.* International Thomson Publishing, Thomson's Aktuelle Tutorien,5, 1995.

[VP86] G. Vallar and D. Perani. The anatomy of unilateral neglect after right hemisphere stroke lesions. A clinical/CT-scan correlation study in man. *Neuropsychologia*, 24:609–622, 1986.

[WADW93] E., M. Wenzel, M. Arruda, Kistler D., J., and F,. L. Wightman. Localization using nonindividualized head-related transfer functions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 94:111–123, 1993.

[WES98] E., R. Wist, W., H. Ehrenstein, and M. Schraus. A computer-assisted test for the electrophysiological and psychophysical measurement of dynamic visual function based on motion contrast. *Journal of Neuroscience Methods*, 80:41–47, 1998.

[WK89a] F., L. Wightman and D., J. Kistler. Headphone simulation of free-field listening. I.: Stimulus synthesis. *Journal of the Acoustical Society of America*, 85(2):858–867, 1989.

[WK89b] F., L. Wightman and D., J. Kistler. Headphone simulation of free-field listening. II.: Psychophysical validation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 85(2):868–878, 1989.

[WWDF88] E., M. Wenzel, F. Wightman, Kistler D., J., and S. Foster. Acoustic origins of individual differences in sound localization. *Journal of the Acoustical Society of America, Suppl. 1*, 84:879, 1988.

[Zan95] H. Zander. *Audio am PC: Soundverarbeitung mit WAVE und MIDI.* Markt und Technik, Haar b. München, 1995.

[ZM88] J. Zihl and N. Mai. Therapeutische Möglichkeiten der klinischen Neuropsychologie. *PRAXIS der klinischen Verhaltensmedizin und Rehabilitation*, 4:251–256, 1988.

[ZPV95] R., J. Zatorre, A. Ptito, and J., G. Villemure. Preserved auditory spatial localization following cerebral hemispherectomy. *Brain*, 118:879–889, 1995.