

# 7 Akalkulie

K. Willmes-von Hinckeldey

## 7.1 Definition

Patienten mit einer Akalkulie zeigen als Folge einer erworbenen Hirnschädigung, vorwiegend der linken Hirnhälfte, *Störungen im Umgang mit Zahlen und beim Rechnen* (Ardila u. Rosselli, 2002; Grafman u. Rickard, 1997). Diese zeigen sich nicht nur in Testuntersuchungen, sondern betreffen auch viele Verrichtungen im Alltag, wie etwa das Einkaufen, Transaktionen bei einer Bank, das Umgehen mit Telefonnummern, Zeitangaben, Maßeinheiten sowie den approximativen Umgang mit Zahlen (z. B. bei Überschlagsrechnungen oder beim Abschätzen von Anzahlen, Entfernungen, Preisnachlässen).

Der Begriff „Akalkulie“ wurde von Solomon Henschen (1919) geprägt, obwohl Lewandowsky u. Stadelmann (1908) bereits detailliert einen Fall beschrieben hatten, in dem Rechenstörungen als *eigenständige Folge einer Hirnschädigung* darstellt wurden und nicht als Bestandteil einer Sprachstörung. Auch Berger (1926) grenzte die sog. *sekundäre Akalkulie* bei Patienten mit Störungen der Aufmerksamkeit, des Kurz- oder Langzeitgedächtnisses, der Sprache oder des Lesens von der *primären* oder *reinen Form der Akalkulie* ab, die nicht auf eine dieser Störungen zurückgeführt werden kann.

Akalkulie als Störung oder Verlust der *bereits erworbenen Rechenfähigkeit* ist von der (Entwicklungs-)Dyskalkulie abzugrenzen, die eine von Kindheit an bestehende Rechenschwäche bezeichnet. Hier liegt eine Teilleistungsschwäche im Rechnen bei ansonsten im Normalbereich liegenden Fähigkeiten und Fertigkeiten vor (Butterworth, 2005).

## 7.2 Grundlagen

Vor einer Darstellung der auch klinisch zu beobachtenden Symptommuster ist es sehr hilfreich, die wichtigsten mentalen Operationen beim Umgang mit Zahlen und deren Organisation zu charakterisieren. Dieses Vorgehen liefert dann bereits den konzeptuellen Rahmen für eine systematische klinisch-diagnostische Untersuchung.

### 7.2.1 Mentale Repräsentation

Unser Wissen über Zahlen besitzen wir zumindest in drei Formaten, mit denen diese im Gehirn repräsentiert sind (vgl. das Triple-Code Modell von Dehaene u. Cohen, 1995):

1. *Sequenz oder Kette von arabischen Ziffern* (z. B. 57),
2. *Sequenz von Zahlwörtern* aus einem begrenzten Zahlwortlexikon mit bestimmten syntaktisch-morphologi-

schen Kombinationsregeln, die etwa für das Deutsche bei zweistelligen Zahlen noch die sog. Inversion von Einer- und Zehnerzahl beinhalten (z. B. „fünfzig-sieben“ = „siebenundfünfzig“),

3. *abstrakte, nicht an eine bestimmte Notation gebundene Quantität/Numerosität*.

Die kulturell gebundenen und kulturell vermittelten symbolischen Notationssysteme erlauben prinzipiell die exakte Enkodierung einer jeden beliebigen Zahl. Es gibt viele unterschiedliche Belege dafür, dass die *quantitative Repräsentation* (oft modelliert als ein von links nach rechts orientierter mentaler Zahlenstrahl) approximativ ist und dass die Genauigkeit mit steigender Quantität abnimmt (mit breiter werdenden und damit stärker überlappenden Aktivierungsabschnitten auf diesem Zahlenstrahl; Dehaene, 2003).

Bestimmte Zahlen können sich zudem neben einer Quantität auch auf bestimmte Aspekte von *episodischem oder deklarativem Faktenwissen* beziehen, wie z. B. „4711“, „1945“ oder wie das individuelle Geburtsjahr oder Lebensalter.

### 7.2.2 Input/Output

- Gehörte oder geschriebene *Zahlwörter* können wie andere Wörter auch identifiziert bzw. gesprochen und geschrieben werden.
- *Arabische Zahlen* können lediglich visuell identifiziert und geschrieben werden, wobei eine einzelne Ziffer bereits einem Wort mit bestimmter Bedeutung/Semantik (der durch die Ziffer bezeichneten numerischen Anzahl/Quantität) und nicht einem Buchstaben entspricht.
- Die *Anzahl einer Menge von (visuellen) Objekten* (auch Punkt- und Fingermuster oder die Augenzahl eines Würfels) erlaubt die *nichtsprachliche Enkodierung* von numerischer Quantität. Auch Handgesten können zum Ausdrücken von Anzahlen in nichtsprachlicher Form eingesetzt werden.

### 7.2.3 Transkodieren/Umformen

Die verschiedenen Zahlencodes können nach festen Regeln ineinander überführt werden. Beim (lauten) Lesen von arabischen Zahlen (z. B. „56“ = „sechsendfünfzig“) müssen die einzelnen Ziffern einschließlich ihrer Position in der Ziffernsequenz identifiziert werden. Bei der Zahl 56 muss aus dem Zahlwortlexikon das fünfte Element aus der Menge der Dekadenwörter und das sechste aus der Menge der Einerwörter abgerufen werden und unter Beachtung der In-

version und Verwendung des Partikels „und“ kombiniert werden.

Entsprechend gibt es andere Transkodierungsprozesse für die Überführung zwischen je zwei der drei mentalen Repräsentationen, z. B.

- beim Schreiben von Zahlen oder Zahlwörtern nach Diktat,
- beim Benennen der Größe einer Punktmenge oder
- beim Zugriff auf die numerische Quantität einer auditiv oder visuell dargebotenen Zahl.

## 7.2.4 Rechnen

Die drei Zahlencodes sind in unterschiedlicher Weise und Kombination beim mündlichen oder schriftlichen Rechnen beteiligt.

- Das kleine Einmaleins etwa ist hoch überlernt. Bei der Vorgabe von z. B. „ $7 \times 8$ “ wird üblicherweise die Aufgabe intern in eine *verbale Repräsentation* überführt („sieben mal acht“), welche den *Abruf des gespeicherten Ergebnisses in sprachlicher Form* („sechsfünfzig“) ermöglicht.
- Aufgaben in den Grundrechenarten mit größeren arabischen Zahlen nutzen die einzigartigen Möglichkeiten des „*Position-mal-Wert*“-*Notationssystems*, um entsprechende, meist auch hoch überlernte Rechenalgorithmen (z. B. „ $342 - 189$ “; „ $342 \times 189$ “) zur Lösung auf diese Zahlen anzuwenden.
- Die *abstrakte Größenrepräsentation* wird beim numerischen Größenvergleich (welche von zwei/mehreren Zahl ist die größere/größte?) eingesetzt, mit schnelleren und weniger mit Fehlern behafteten Entscheidungen bei weiter auseinander liegenden Zahlen (sog. Distanzeffekt) – was anhand der angenommenen quantitativen numerischen Größenrepräsentation auf einem analogen Zahlenstrahl gut erklärbar ist.

Bei komplexeren Aufgabenstellungen im Umgang mit Zahlen und beim Rechnen werden zusätzlich mehr oder weniger starke Anforderungen an das (sprachliche) Arbeitsgedächtnis und an (sprachliche) Aufmerksamkeits- und Exekutivfunktionen gestellt.

Rechnen erfordert eine Vielzahl von Teilprozessen:

- Zahlen (und Rechenzeichen) müssen in der jeweiligen Notation erkannt, verstanden und produziert werden.
- Im Gedächtnis gespeicherte Rechenfakten müssen abgerufen werden.
- Im Gedächtnis gespeicherte Rechenprozeduren müssen als eine Sequenz von Rechenschritten abgerufen werden.  
Die (mentale) Ausführung von Transkodierungs- und Rechenprozessen erfordert kognitive Ressourcen wie Aufmerksamkeits-, Arbeitsgedächtnis- und Problemlöseprozesse.

## 7.3 Klinik

Die Symptome einer Akalkulie lassen sich grob unterteilen in:

1. *Störungen des Transkodierens* (d. h. der Zahlenverarbeitung), die etwa das (auditive) Verständnis für Zahlen oder das (laute) Lesen und Schreiben von Zahlen betreffen,
2. *Störungen der quantitativen Größenrepräsentation* (d. h. der mentalen Verarbeitung von numerischen Quantitäten), wie etwa beim numerischen Größenvergleich und
3. *Störungen des (mündlichen oder schriftlichen) Rechnens*, einschließlich der *Verarbeitung der Rechenzeichen*.

### 7.3.1 Störungen des Transkodierens

Für die drei symbolischen Repräsentationen „*arabische Zahlen*“, „*gesprochene Zahlwörter*“ und „*geschriebene Zahlwörter*“ gibt es insgesamt 6 verschiedene Transkodierungswege, die alle in neuropsychologischen Studien untersucht worden sind (Noel, 2000). Beim exemplarisch genauer erläuterten (*lauten*) *Lesen von arabischen Zahlen*, welches sich wesentlich auf die (linke) sprachdominante Hemisphäre stützt, sind drei sequenzielle Verarbeitungsschritte erforderlich:

1. die Identifizierung der Ziffernkette (Enkodierung),
2. die (mentale) Überführung in eine Abfolge von Wörtern und
3. deren Äußerung.

#### Identifizierung von Ziffern

Störungen in der initialen (Enkodierungs-)Phase findet man bei *reiner Alexie*. Trotzdem sind diese Patienten in der Lage, auch mehrstellige Zahlen hinsichtlich ihrer numerischen Größe miteinander zu vergleichen (da die rechte Hemisphäre ebenfalls arabische Zahlen enkodieren und den Größenvergleich anhand der quantitativen Größenrepräsentation ausführen kann).

#### Überführung in ein Zahlwort

Bei der Transkodierung in ein Zahlwort treten unterschiedliche Arten von Fehlern auf:

- Bei sog. *lexikalischen Fehlern* wird ein lexikalisches Element durch ein anderes Element aus derselben lexikalischen Zahlwortklasse (Einer: 0–9; „Teens“: 11–19, Dekaden: 10–90) ersetzt, während die gesamte morphosyntaktische Struktur (sog. Zahlwortrahmen) des Zielzahlworts erhalten ist (z. B. „56“ = „sechundsiebzig“ oder „411“ = „vierhundertzwölf“).
- *Syntaktische Fehler* sind dadurch charakterisiert, dass ein falscher syntaktischer Rahmen erzeugt wird und in diesen entsprechend der Ziffern der arabischen Zahl das „richtige“ Zahlwort eingesetzt wird (z. B. „56“ = „fünfhundertsechs“).

- In Sprachen wie dem Deutschen treten zudem als charakteristische Fehler *Inversionsfehler bei zweistelligen Zahlen* oder *Fehler bei Zehner- und Einerstellen in mehrstelligen Zahlen* auf (z. B. „56“ = „fünfundsechzig“). Beim Lesen mehrstelliger Zahlen werden u. U. Zahlwortmorpheme – insbesondere sog. Multiplikatorwörter („hundert“, „tausend“, „million“) – ausgelassen (z. B. „30160“ = „dreißig hundertsechzig“).

Beim „umgekehrten“ Transkodierungsweg des *Schreibens von arabischen Zahlen nach Diktat* kommt neben den zuvor beschriebenen lexikalischen und syntaktischen Fehlern häufiger folgender Fehlertyp vor: „viertausenddreihundertachtundsechzig“ = „400030068“. Das Zahlwort wird dabei abschnittsweise („term-by-term“) transkodiert, und die sog. Überschreibungsregeln für die Nullen werden nicht beachtet; d.h. das *additive Kompositionsprinzip mehrstelliger Zahlen* wird nicht korrekt angewendet.

Trotz gravierender Transkodierungsprobleme, z. B. beim lauten Lesen selbst einstelliger Zahlen, kann ein gutes *Verständnis* für dieselben Zahlen vorliegen. Neben der quantitativen Bedeutung der Zahlen kann u. U. auch semantisches deklaratives Wissen aktiviert und statt des Zahlwortes geäußert werden (z. B. „1945“ – „Hitler weg“). Patienten mit schwereren Benennstörungen benutzen vorwiegend bei kleineren Zahlen häufiger das besser erhaltene *automatisierte Aufwärtszählen*, um bis zur richtigen Zahl hoch zu zählen. Bei diesem Hochzählen kommt es ganz überwiegend nicht zu Fehlern; insbesondere wird nicht über die Zielzahl hinaus weiter gezählt. Alternativ werden als Kompensationsstrategie auch die Finger zum Zeigen der Anzahl oder der Zeigefinger zum „imaginären“ Schreiben der arabischen Zahl auf einer Unterlage oder in der Luft eingesetzt.

Diese Strategien sind nicht nur beim Transkodieren zu finden, sondern auch dann, wenn in einer Aufgabenstellung mit Zahlen eine mündliche Äußerung als Antwort gefragt ist, sprachlich expressive Probleme aber den lexikalischen Zugriff verhindern.

### Äußerung des Zahlwortes

Für die letzte Phase der (laut-)sprachlichen Äußerung eines Zahlwortes werden generelle Sprachverarbeitungsprozesse angenommen, obwohl auch hier Leistungsdissoziationen beobachtet werden können.

### Klinische Beispiele

Akalkulie und Aphasie treten häufig assoziiert auf. Dennoch sind Zahlenverarbeitungsprobleme (und Rechenstörungen) von Aphasikern nicht unbedingt auf die Sprachstörung zurückzuführen (Basso et al., 2005) – auch wenn bei Aphasien oft Störungen der rezeptiven wie produktiven Zahlenverarbeitung auftreten (Überblick bei Claros Salinas u. Willmes, 2000), bei vielen Patienten in Kombination mit einer generellen Lese- und Schreibstörung.

Störungen des Zahlenlesens und -schreibens treten vorwiegend zusammen auf, können aber auch dissoziiert sein: Ein Patient mit *Jargon-Aphasie* (Benson u. Denkla, 1969), der über ein gutes Zahlenverständnis (d. h. eine korrekte Zuordnung mündlich vorgegebener Zahlwörter zu schriftlichen Zahlen oder Punktmengen) verfügte, produzierte beim Benennen arabischer Ziffern und Zahlen nur Paraphasien. Häufiger zu beobachten ist der Fall, dass ein Aphasiker bei einem schriftlich vorgegebenen ein- oder mehrstelligen Zahlenpaar richtig die größere Zahl zeigen kann, ohne dass das für geschriebene bzw. auditiv vorgegebene Zahlwörter auch der Fall wäre.

*Broca-Aphasiker* zeigen häufiger syntaktische als lexikalische Transkodierungsfehler; bei *Wernicke-Aphasikern* findet man keine deutlichen Unterschiede zwischen diesen Fehlerarten.

Auch bei *neuropsychologischen Patienten ohne Aphasie* findet man verschiedene Arten von Störungen der Zahlenverarbeitung.

- Typisch für eine *ingeschränkte Zahlenmerkspanne* ist beim Diktat-Schreiben von mehrstelligen Zahlen – besonders mit ausschließlich von Null verschiedenen Ziffern – ein Abbruch nach wenigen Ziffern.
- Bei Zahlen mit „eingebetteten“ Nullen werden bei Patienten mit *räumlich-konstruktiven Problemen* bisweilen als vorwiegende Fehlerart Nullstellen ausgelassen oder hinzugefügt.
- *Visuelle Wahrnehmungsstörungen* (Hemianopsie) oder ein *visueller Neglect* können sich als Vernachlässigungen von Ziffern im rechten Teil mehrstelliger Zahlen oder (seltener) am Anfang zeigen (Hécaen et al., 1961), ohne dass semantisch gehaltvolleres Sprachmaterial ebenfalls betroffen sein müsste.
- Ein vermutlich auf mangelhafte kognitive Kontrollmechanismen zurückgehender Transkodierungsfehler, der bislang vorwiegend für die Zahlenverarbeitung bei *Alzheimer-Patienten* beschrieben worden ist (Kessler u. Kalbe, 1996), beinhaltet, dass Teile der Zielzahl in der Notation des Quellcodes geschrieben werden, z. B.: „2457“ = „2 tausendvierhundert57“. Empirisch begründete Kritik an der Verwendung dieser Fehlerart als Diagnosekriterium für eine beginnende Alzheimer-Demenz äußern Della Sala et al. (2000).
- *Räumlich-visuelle* bzw. *räumlich-konstruktive Störungen* sind beim schriftlichen Rechnen in den Grundrechenarten hinderlich. Dort ist es erforderlich, Zahlen nach bestimmten Regeln anzuordnen (Hartje, 1987): Beim Addieren mehrerer Zahlen gelingt es nicht, diese exakt auf den Stellenwert bezogen anzuordnen, und es kommt zum „Verrutschen“ in den Spalten. Beim schriftlichen Multiplizieren kann die Anordnung der Zwischenergebnisse z. B. durch fehlendes oder falsches Einrücken fehlerhaft sein.

### 7.3.2 Störungen der quantitativen Größenrepräsentation

Im Unterschied zu den leichter festzustellenden sprachbezogenen Fehlern sind *Probleme mit der mentalen Verarbeitung der abstrakten numerischen Größe* weniger stark beachtet worden; zumal die bilaterale Repräsentation der quantitativen Größenrepräsentation diese vermutlich weniger anfällig für umschriebene Hirnschädigungen macht.

Es sind nur wenige Patienten beschrieben worden, die bei erhaltenen sprachlichen Fähigkeiten Fehler im Umgang mit abstrakten Quantitäten zeigten (Dehaene u. Cohen, 1997; Delazer u. Benke, 1997; Lemer et al., 2003). Diese Patienten hatten Läsionen in der intraparietalen Region der sprachdominanten Hemisphäre. Sie konnten Zahlen laut lesen und andere numerische Symbole (wie Punktmuster von Würfeln) transkodieren sowie automatisierte Reihen von Zahlwörtern (wie beim Hochzählen oder Aufsagen von Multiplikationsreihen) produzieren. Beim *Größenvergleich von arabischen Zahlen* kam es aber zu Fehlern, und auch sog. *Zahlenbisektionsaufgaben* („Welches ist die numerische Mitte zwischen zwei vorgegebenen Zahlen?“) konnten nicht gelöst werden. Weiterhin konnten selbst einfachste Subtraktionsaufgaben nicht gelöst werden, von denen man nicht annimmt, dass sie im Gedächtnis gespeichert sind. Diese Patienten können auch nicht überschlagsmäßig rechnen. Semantische Probleme traten häufiger notationsunabhängig auf, etwa auch beim Größenvergleich von Punktmengen.

Sehr eindrucksvoll ist der von Delazer und Mitarbeitern (2005) untersuchte Fall einer Patientin mit bilateraler, stärker rechtshemisphärisch ausgeprägter, posteriorer kortikaler Atrophie, die ein Symptommuster zeigte, das gut mit einer parietalen Degeneration vereinbar war:

- In Aufgabenstellungen zur numerischen Kognition, die zunehmende *visuo-spatiale Fähigkeiten* erforderten, kam es zu vielen Fehlern: z. B. beim *Abzählen von Punktmengen* im Bereich von 11 bis 30 und bei einer sog. *Zahlenstrahl-Aufgabe*, bei der die Patientin die ungefähre Position einer vorgegebenen Zahl auf einer Strecke von 0–100 bzw. 0–50 markieren musste.
- Fehler traten auch bei den Aufgabenstellungen auf, in denen der *Zugriff auf eine quantitative Größenrepräsentation* erforderlich war: So z. B. bei der *Zahlenbisektionsaufgabe*, bei der die numerische Mitte zwischen zwei vorgegebenen anderen Zahlen angegeben werden soll (Produktionsvariante) oder ein vorgegebenes Zahlentripel daraufhin beurteilt werden soll, ob die in der Mitte des Tripels angeordnete Zahl auch die numerische Mitte ist (rezeptive Variante; z. B. 22–25–28 vs. 21–23–28).
- Viele Fehler traten auch beim *approximativen Rechnen* auf, bei dem aus zwei falschen Ergebnissen einer arithmetischen Rechnung schnell die besser passende Lösung ausgewählt werden musste; sowie bei *numerischen Schätzaufgaben* (Größe, Gewicht, Anzahl, Zeitdauer) und *Aufgaben zum semantischen deklarativen numeri-*

*schen Wissen* (Anzahlen, Preise von alltäglichen Dingen). Die Beeinträchtigung des semantischen Wissens war dabei auf numerisches Wissen beschränkt.

### 7.3.3 Störungen des Rechnens und der Verarbeitung von Rechenzeichen

Probleme beim Rechnen im engeren Sinn lassen sich einteilen in:

1. *Störungen des arithmetischen Faktenabrufs* und
2. *Störungen der Fähigkeit, Rechenoperationen auszuführen* (vgl. Warrington, 1982).

Beide Funktionen können auf Grund ihrer angenommenen Modularität unabhängig voneinander beeinträchtigt sein (Caramazza u. McCloskey 1987; McCloskey et al., 1991).

#### **Störungen des arithmetischen Faktenabrufs**

Störungen des Abrufs von Rechenfakten umfassen Fehler beim einfachen Addieren und Subtrahieren (im Zahlenraum unter 20), beim einfachen Multiplizieren (kleines Einmaleins) und evtl. beim einfachen Dividieren durch kleine einstellige Zahlen. Normalerweise führt man für solche Aufgaben keine schrittweisen Berechnungen aus, sondern ruft im Langzeitgedächtnis gespeicherte Ergebnisse ab (wie bei anderen, stark überlernten Fakten). Multiplikationen mit Null oder Eins gehören eher zum Regelwissen und können selektiv besser oder schlechter erhalten sein als das Rechnen mit anderen Zahlen (Überblick bei Pesenti et al., 2000). Fehlerhafte Ergebnisse bei einfachen Multiplikationen stammen häufiger aus derselben Multiplikationsreihe (z. B. „ $7 \times 9 = 54$ “; sog. Tafel-Fehler) als aus anderen Reihen oder nicht aus dem kleinen Einmaleins.

Probleme des Faktenabrufs können sich auch (ausschließlich) in *deutlich erhöhten Lösungszeiten* ausdrücken (Warrington, 1982), was auf den Einsatz von Rechenstrategien bei erschwertem oder nicht möglichem Gedächtnisabruf hinweist.

#### **Störungen der Fähigkeit, Rechenoperationen auszuführen**

Störungen der Durchführung mehrschrittiger Rechenoperationen oder der Beherrschung arithmetischer Prozeduren sind durch die *inkorrekte* oder *unvollständige Anwendung von Lösungsalgorithmen* gekennzeichnet. Bei schriftlichen Additionsvorgängen werden häufig die Zehnerüberträge nicht berücksichtigt; ebenso wird bei schriftlicher Subtraktion das Zehnerborgen ausgelassen oder fehlerhaft ausgeführt. Weitere Fehlerarten sind bei Claros, Salinas und Willmes (2000) zusammengefasst.

## Klinische Beispiele

### Gestörte Verarbeitung von Rechenzeichen, gestörte Zählfähigkeit

Bei Aphasikern kann sich eine *gestörte Verarbeitung von Rechenzeichen* so äußern, dass auditiv vorgegebene Rechenzeichen nicht verstanden oder mit anderen Rechenzeichen verwechselt werden. Derartige Probleme können auch selektiv, ohne Beeinträchtigungen bei der Verarbeitung anderer visueller Symbole auftreten (Ferro u. Botelho, 1980).

*Beeinträchtigungen der Zählfähigkeit* als entwicklungspsychologischem Vorläufer von Additions- und Subtraktionsvermögen (Wynn, 1998) sind bei aphasischen Patienten häufig zu beobachten. Allerdings beginnen die Probleme in den meisten Fällen erst bei zwei- oder mehrstelligen Zahlen (neologistische oder paraphasische Veränderungen sowie Auslassen einzelner oder mehrerer Zahlen). Beim wenig automatisierten *Rückwärtszählen* kommen Beeinträchtigungen des verbalen Arbeitsgedächtnisses hinzu. Als spezieller Fehler wird beim Übergang zum nächst kleineren Zehner oft die nächst kleinere oder eine andere falsche Zehnerzahl geäußert (z. B. „23, 22, 21, 10“).

### Rechenstörung im engeren Sinne

Die Fähigkeit zu rechnen kann komplett oder auch selektiv, für einzelne Grundrechenarten ausfallen. Patienten mit schwerer Aphasie können häufig selbst einfache Grundrechenaufgaben nicht mehr lösen oder nur einfache Additionsaufgaben bei visueller Vorgabe. Bei weniger schweren Aphasien ist die Fähigkeit zu addieren und zu subtrahieren meist deutlich besser erhalten, auch wenn z. B. das Zehnerborgen bei Subtraktionsaufgaben konsistent fehlerhaft sein kann (Girelli u. Delazer, 1996). Das Multiplizieren kann häufiger selektiv stark beeinträchtigt sein, da hier – mehr als bei den anderen Rechenarten – ein direkter Abruf aus dem Gedächtnis erfolgt. Pesenti und Mitarbeiter (1994) berichten über einen Fall mit selektiv erhaltener Subtraktionsleistung.

Delazer und Mitarbeiter (1999) untersuchten in einer größeren Gruppenstudie aphasische Patienten bei Transkodier- und Rechenaufgaben. Die Gesamtzahl an Fehlern korrelierte mit dem Schweregrad der aphasischen Sprachstörung.

- Patienten mit *Broca-Aphasie* waren besonders beim Abruf der Ergebnisse einfacher Multiplikationen beeinträchtigt (vermutlich wegen der erforderlichen verbalen Mediierung), während Patienten mit *globaler* oder *Wernicke-Aphasie* eher Fehler bei den Rechenprozeduren unterliefen.
- Patienten mit *Broca-Aphasie* machten mehr sog. *syntaktische Fehler* beim lauten Lesen arabischer Zahlen (z. B. „406“ = „sechsendvierzig“; allerdings in italienischer Sprache; falsch angelegter syntaktischen Zahlwortrahmen, aber korrekte lexikalische Elemente).
- *Wernicke-Aphasiker* hingegen begingen mehr sog. *lexikalische Fehler* (z. B. „24“ = „vierunddreißig“; in italia-

nischer Sprache; korrekt angelegter syntaktischer Rahmen und fehlerhaft ausgewähltes lexikalisches Element für die Dekadenzahl).

Nach Interpretation der Autoren weisen diese Befunde insgesamt auf eine Assoziation zwischen den Störungen von Sprache und Zahlenverarbeitung hin.

Ein Fall mit *posteriorer kortikaler Atrophie* von Delazer und Mitarbeitern (2005) ist bezüglich des unterschiedlichen Status der verschiedenen Grundrechenarten sehr interessant. Einfache Kopfrechenaufgaben zu hoch überlernten Additions- und Multiplikationsfakten konnten (nahezu) fehlerfrei beantwortet werden, ganz im Gegensatz zu einfachen Subtraktions- und Divisionsaufgaben.

Nach neueren modelltheoretischen Überlegungen von Lemer et al. (2003) sowie Dehaene et al. (2004) stützen sich einfache Addition und Multiplikation auf sprachliche Prozesse und einen sprachlich medierten Gedächtnisabruf von überlernten Rechenfakten, während sich die Subtraktion wie das approximative Rechnen und Abschätzen auf die (beeinträchtigte) quantitative Größenrepräsentation stützt.

Die wichtigsten Symptome einer Akalkulie betreffen:

- die Zahlenverarbeitung beim Überführen einer Zahlennotation in eine andere (Transkodieren), wie etwa das auditive Verständnis für Zahlwörter und das Lesesinnverständnis für Zahlen und Zahlwörter sowie das (laute) Lesen und Schreiben von Zahlen,
- die mentale Verarbeitung von numerischen Größen, wie beim numerischen Größenvergleich,
- das mündliche oder schriftliche Rechnen, wie den Abruf von Rechenfakten, das Anwenden von Rechenprozeduren und Strategien,
- das konzeptuelle Verständnis von arithmetischen Regeln und Prinzipien.

### 7.3.4 Exkurs: Zum Zusammenhang von Aphasie und Akalkulie

Auch wenn gesunde Probanden sprachliche Funktionen beim Rechnen und Verarbeiten von Zahlen einsetzen, stellt sich die wichtige Frage, in welchem Ausmaß Zahlenverarbeitung und Rechnen funktionell unabhängig von Sprache sind.

Basso et al. (2000) haben auf Grund einer größeren retrospektiven Studie argumentiert, dass sprachliche Funktionen und Rechnen voneinander unabhängig sind und bei linkshemisphärischer Läsion selektiv eine Akalkulie vorliegen kann; umgekehrt war bei einem beträchtlichen Prozentsatz von Aphasikern (50% der Broca- und 39% der Wernicke-Aphasiker) bei Einsatz der EC 301 R Akalkulie-Testbatterie keine Akalkulie zu diagnostizieren. Auch die sprachlichen Beeinträchtigungen bei Patienten mit und ohne Akalkulie waren weder qualitativ noch quantitativ auf Gruppenebene verschieden.

Zu einem anderen Ergebnis kamen Basso et al. (2005) anhand einer vergrößerten Datenbasis, die eine „signifikante Assoziation“ bei 36 von 61 rechtshändigen Patienten mit ausschließlich linkshemisphärischer Läsion feststellten. Andererseits zeigten von den restlichen 25 Patienten 19 ausschließlich eine Aphasie und 6 ausschließlich eine Akalkulie. Die Autoren weisen in ihrer Diskussion der Ergebnisse darauf hin, dass diese Assoziation auch lediglich ein Artefakt der Vaskularisation des Gehirns sein kann, bei der benachbarte Hirnareale (besonders im Versorgungsgebiet des hinteren Astes der A. cerebri media) gemeinsam von einer Läsion betroffen sein können, auch wenn anatomisch eine Separierbarkeit der die sprachlichen und rechnerischen Funktionen unterstützenden Areale gegeben ist.

Die Frage nach einer Assoziation zwischen Aphasie und Akalkulie spiegelt ein wichtiges Thema der kognitiven Neurowissenschaften wider: *In welchem Umfang stützen sich höhere kognitive Funktionen auf Sprache?*

Exaktes Rechnen vollzieht sich vermutlich unter Einsatz des sprachlichen Codes, und mathematisches Faktenwissen ist zumindest teilweise in sprachlicher Form im Langzeitgedächtnis gespeichert (z. B. das kleine Einmaleins). Das Spektrum der Annahmen reicht von einer notwendigen Mediiierung mathematischer Berechnungen durch lexikalische und syntaktische sprachliche Prozesse hin zu der Behauptung, dass im entwickelten Zustand des Erwachsenenalters das Rechnen unabhängig von Sprache sein kann.

In einer viel beachteten Studie wurden von Varley et al. (2005) drei Patienten mit ausgedehnten Läsionen im Versorgungsbereich der A. cerebri media unter Einschluss perisylvischer temporaler, parietaler und frontaler Kortextareale und klinisch schweren chronischen Aphasien vorgestellt. Die Aphasien waren durch schwere rezeptive und expressive sprachliche syntaktische Probleme charakterisiert (Agrammatismus). Trotzdem konnten die Patienten in Arithmetikaufgaben syntaktische Prinzipien wie Rekursivität und den Umgang mit Klammerausdrücken (z. B. „ $50 - ((4 + 7) \times 4)$ “), die eine Abweichung von einer linearen Abarbeitung von links nach rechts erforderten, korrekt beachten. Bei sonstigen sprachlichen Äußerungen und Anforderungen standen den Patienten diese Operationen im rein sprachlichen Kontext nicht oder nur deutlich eingeschränkt zur Verfügung.

## 7.4 Diagnostik

Spezifische Verfahren zur Untersuchung einer Akalkulie gibt es – auch international – nur wenige. Gängige *Intelligenztestverfahren* enthalten oft einzelne Untertests mit Rechenanforderungen; darüber hinaus gibt es eine größere Zahl von nach Klassenstufen gestaffelten *Schulleistungstests*. Doch werden hier die verschiedenen beim Rechnen und in der Zahlenverarbeitung beteiligten Komponenten und Prozesse nicht hinreichend genau und differenziert erfasst.

### 7.4.1 Klinisch-neuropsychologische Diagnostik

#### Screening-Verfahren: ZRT und EC 301 R

Für die klinisch-neuropsychologische Anwendung sind zwei umfangreichere Screening-Verfahren geeignet:

- der *Zahlenverarbeitungs- und Rechentest (ZRT)*; Kalbe et al., 2002) in Verbindung mit dem *Test für Kognitives Schätzen (TKS)*; Brand et al., 2002) und
- die deutsche Fassung der in einem EU-Projekt entwickelten *EC 301 R* (Claros Salinas, 1994).

Beide Verfahren orientieren sich explizit an den aktuellen kognitiv-neuropsychologischen Modellen. Mit ihnen kann man in 30–60 Minuten die wichtigsten Komponenten rechnerischer bzw. allgemein auf Zahlen bezogener rezeptiver und expressiver Fähigkeiten erfassen. Der Test beinhaltet: Zählelemente in korrekter Abfolge äußern, Zahlen transkodieren, Mengen durch Abschätzen erfassen, Zählen und Abzählen. Ferner werden geprüft: Kenntnisse des einfachen Rechnens, einschließlich des Zugangs zu arithmetischem Faktenwissen; prozedurale Kenntnisse über die Grundrechenarten; die Verfügbarkeit semantischer Mengenrepräsentationen (durch numerische Größenvergleiche, Abschätzen der Größenverhältnisse bildlicher Stimuli, z. B. der Höhe einer abgebildeten Pflanze, und kontextuelles Mengenschätzen, z. B. „Zwanzig Seiten für einen Brief; ist das viel, mittel oder wenig?“).

Beide Screening-Verfahren erlauben eine Einschätzung, ob eine Leistung im Vergleich zu einer Stichprobe nicht hirngeschädigter Personen als normal oder als beeinträchtigt einzustufen ist. Der *ZRT* sieht im Störungsbereich zusätzlich eine grobe Abstufung nach 3 Schweregraden vor, ohne jedoch eine Differenzierung nach Bildungsstufen vorzunehmen. Bereits bei den recht einfachen Aufgaben zum schriftlichen Rechnen in der Testbatterie *EC 301 R* ist der Trennwert zur Beeinträchtigung abhängig von der Schulbildung.

#### Neuere Testbatterie: Die NPC

Eine neue, ebenfalls eng an den kognitiven Verarbeitungsmodellen orientierte Testbatterie mit dem Kürzel *NPC (Number Processing and Calculation Battery)*; Delazer et al., 2003) enthält insgesamt 35 Aufgabenstellungen zum Zählen, zum (semantischen) Verständnis von Zahlen, zum Transkodieren, zum exakten Kopfrechnen, zum schriftlichen sowie zum approximativen Rechnen. Über die anderen Testbatterien hinausgehend gibt es Textaufgaben und Aufgabenstellungen zum Verständnis mathematischer Prinzipien bei der Addition und Multiplikation – was für eine detailliertere Untersuchung der genauen Störungsform und auch für eine gezielte Planung von spezifischen Therapiemaßnahmen hilfreich ist. Für die *NPC* liegen auch Trennwerte vor (bei Prozentrang 10), separat für vier Alters- und zwei Bildungsgruppen. Die Durchführung dauert ca. 90 Minuten.

## 7.4.2 Berufsbezogene Diagnostik

### **Münchener Akalkulie-Prüfung**

Für Patienten mit leichter Akalkulie, deren berufliche Rehabilitation ansteht, gibt es mit der *Münchener Akalkulie-Prüfung* (Claros Salinas, 1993) eine Sammlung von Aufgabenstellungen, in der numerische Leistungsdefizite für komplexere, im beruflichen Alltag relevante Anforderungen erfasst werden.

- Im *Teil Zahlenverarbeitung* geht es um lautes Lesen, Schreiben nach Diktat und stellenwertbezogenes Anordnen von unterschiedlich komplexem Zahlenmaterial.
- Im *Arithmetik-Teil* sind es einfache und – auch für Personen ohne Hirnschädigung nicht fehlerfrei beherrschte – komplexere Aufgaben zu den vier Grundrechenarten, in den Modalitäten:
  - Kopfrechnen auf auditive oder visuelle Aufgabenpräsentation und
  - schriftliches Rechnen.

Bei der Auswertung werden qualitative Aspekte berücksichtigt, z. B. inwieweit inkorrekte Ergebnisse auf ihre Plausibilität hin kontrolliert werden.

### **Intelligenztests und Schulleistungstests**

Gängige *Intelligenztests* enthalten einzelne, u.U. bereits nach Bildungsgruppen und Alter gut normierte Untertests.

Weiterhin gibt es nach Schulstufen differenzierte *Schulleistungstests* zum Rechnen. Die Aufgaben in diesen Tests sind aber oft nicht nach kognitionspsychologischen Gesichtspunkten ausgewählt, sondern nach psychometrischen Gütekriterien und an den Rahmen-Lehrplänen für die einzelnen Klassenstufen orientiert. Deshalb sind diese Verfahren nur sehr bedingt für eine differenziertere neuropsychologische Diagnostik geeignet. Die zu einem Rohwert zusammengefassten Items bilden häufig sehr unterschiedliche Verarbeitungsprozesse ab.

Wenn aber bezüglich eines Patienten Empfehlungen über einen möglichen Wiedereintritt ins Berufsleben ausgesprochen werden sollen, eignet sich der aufwändig nach Bildungsabschlüssen normierte *Mathematiktest* (Ibrahimovic et al., 2002) gut. Mit ihm ist eine Aussage darüber möglich, ob das zum Ende der 9. Klassenstufe erwartete schulische Wissen in Arithmetik und Geometrie weiterhin verfügbar ist, und ob der Umgang mit Textaufgaben, mit Tabellen und Grafiken gelingt.

## 7.4.3 Differenzialdiagnose

Wie bereits dargestellt, sollte eine orientierende klinische und klinisch-neuropsychologische Untersuchung sowohl sprachliche wie nichtsprachliche Aspekte der Zahlenverarbeitung und des Rechnens enthalten. Die konkreten Vorschläge verschiedener Autoren variieren jedoch hinsichtlich der Anzahl und Art der empfohlenen Aufgabenstellungen, dem Schweregrad der Anforderungen und der Anzahl der Items je Aufgabenstellung beträchtlich.

Generell wird empfohlen, stets auch sprachliche Funktionen, Lesen und Schreiben, visuo-spatiale Verarbeitung, verschiedene Aufmerksamkeitsfunktionen (Alertness, selektive, geteilte und Daueraufmerksamkeit), das sprachliche und nichtsprachliche Arbeitsgedächtnis sowie exekutive Funktionen zumindest orientierend zu untersuchen.

Ardila und Rosselli (2002) geben einen guten klinisch-neuropsychologisch orientierten Überblick mit klinischen Beschreibungen der verschiedenen Formen von Akalkulie und einer Darstellung von Problemen bezüglich der Zahlenverarbeitung und dem Rechnen bei anderen Störungsbildern.

### **Gerstmann-Syndrom**

In den letzten Jahren ist im Zusammenhang mit Zahlenverarbeitungs- und Rechenstörungen die ursprünglich von Gerstmann beschriebene Symptomkombination verstärkt beachtet worden (Akalkulie, Rechts-Links-Orientierungsstörung, Agraphie und Fingeragnosie als Ausdruck einer Störung des Körperschemas, mit besonderer Beteiligung von Fingern und Händen). Gerstmann vermutete, dass die Verbindung zur Akalkulie über die wichtige Rolle gestiftet wird, die die einzelnen Finger sowie deren Lateralität für den Erwerb der Rechenfähigkeit spielen. Die Annahme eines einzigen zu Grunde liegenden Defizits wird ganz überwiegend bestritten (Benton 1992). Man nimmt vielmehr eine zufällige Assoziation verschiedener Störungen an, wegen ihrer anatomisch-funktionellen Nähe in benachbarten Regionen des inferioren Parietallhirns. Von der Arbeitsgruppe um Dehaene wird diskutiert, dass eine funktionelle Gemeinsamkeit in der Stützung genereller räumlicher und sensomotorischer Funktionen durch das Parietallhirn zu sehen ist. Dies stützt sich auf verschiedene fMRT-Studien (etwa Simon et al., 2002) zu Aktivierungen im und um den intraparietalen Kortex bei Rechenaufgaben, Zeige- und Greifbewegungen von Fingern und Hand, sowie bei der räumlichen Aufmerksamkeitsausrichtung.

Insbesondere die Form der Akalkulie bei Vorliegen eines „reinen“ Gerstmann-Syndroms ohne Aphasie ist vereinbar mit einem semantischen Defizit in der Verarbeitung numerischer Größeninformation, die sich nach vielen funktionell bildgebenden Studien auf Regionen im horizontalen Anteil des intraparietalen Sulkus (HIPS; Dehaene et al., 2003) stützt. Auch die anatomische Nähe zu inferior parietalen Spracharealen sowie zu superior parietalen Arealen der Raumverarbeitung macht komplexere Muster bei Störungen der Zahlenverarbeitung plausibel.

Die *neuropsychologische Diagnose einer Akalkulie* sollte sich stets auf eine standardisierte Aufgabensammlung mit Angabe von Trennwerten stützen (oder zusätzlich auf ein normiertes Testverfahren mit der Berücksichtigung von Bildungsgruppen).

Die Aufgabensammlung sollte sich an einem (kognitiv-)neuropsychologischen Verarbeitungsmodell orientieren. Geprüft werden sollten:

- die wichtigsten mentalen Repräsentationen von Zahlen (quantitative approximative Größe in numerischen Größenvergleichen, exakte sprachlich kodierte Größe),
- die wichtigsten Transkodierungswege (Schreiben von arabischen Zahlen nach auditiver Vorgabe, (lautes) Lesen von arabischen Zahlen),
- die wichtigsten arithmetischen Grundrechenarten,
- das Zählen,
- die Zahlenmerkspanne vorwärts und rückwärts.

Für eine orientierende klinische Untersuchung im akuten Krankheitsstadium reichen in der Regel wenige, zu den einfacheren Aufgaben der standardisierten Aufgabensammlungen analoge Items.

## 7.5 Pathophysiologie

Störungen beim einfachen Umgang mit Zahlen, beim Rechnen sowie beim konzeptuellen Umgang mit Zahlen und mathematischen Formeln unterschiedlicher Art und Schwere sind bei allen Formen und Ätiologien erworbener Hirnschädigungen fokaler und diffuser Art zu beobachten. Einen aktuellen Überblick über die häufigen akalkulischen Probleme (oft frühes Zeichen einer Demenz) geben Girelli und Delazer (2001).

Je nach Art, Lage und Ausmaß der Schädigung treten die Störungen eher isoliert oder (häufiger) in Kombination mit anderen Störungen sprachlicher oder anderer höherer kognitiver Funktionen auf (z. B. Aufmerksamkeit, Arbeitsgedächtnis, visuo-spatiale, visuo-konstruktive, exekutive Funktionen). Dies ist auch nicht anders zu erwarten; denn bereits recht einfache, häufig geübte schriftliche Aufgaben zu den Grundrechenarten erfordern die korrekte Ausführung und Sequenzierung einer Vielzahl von Teilprozessen, mit unterschiedlicher Beanspruchung von Aspekten des Arbeitsgedächtnisses und der mentalen Kontrolle und Überwachung.

Gut gesicherte epidemiologische Daten über die Häufigkeit von Akalkulien liegen nicht vor (Girelli u. Seron, 2001). Man muss aber davon ausgehen, dass wegen der recht häufigen Assoziation von Aphasie und Akalkulie bei links-hemisphärischen Läsionen und den anderen Assoziationen von kognitiven Funktionsstörungen und Akalkulie ein ähnlicher Prozentsatz an Patienten initial oder auch dauerhaft mehr oder weniger ausgeprägte Probleme im Umgang mit Zahlen und dem Rechnen hat, wie es für Aphasien berichtet worden ist.

## 7.6 Anatomie

Bereits Henschen (1919) hat verschiedene kortikale Zentren postuliert, die mit verschiedenen Komponenten des Rechnens in Zusammenhang stehen: ein motorisches Zentrum in der linken dritten Frontalwindung, zuständig u. a. für das (laute) Zählen und die lautsprachliche Produktion von Zahlwörtern sowie das Schreiben von Ziffern und Zahlen, und den Gyrus angularis und Teile des Parietalhirns für die Steuerung des Lesens und Schreibens von Zahlen. Bei sehr großen Läsionen der linken Hemisphäre sollte die rechte Hemisphäre kompensatorisch gewisse Rechenfunktionen übernehmen können.

Frontale, temporale, parietale (Gyrus angularis, intraparietaler Sulcus), temporo-parietale sowie parieto-okzipitale Läsionen, vorwiegend der linken Hemisphäre, aber auch Regionen in der rechten Hemisphäre und subkortikale Strukturen wurden nach dem historischen Überblick von Kahn u. Whitaker (1991) mit Rechenstörungen in Verbindung gebracht. Grafman (1988) stellt zusammenfassend fest, dass bei einer Akalkulie typischerweise eine *links-hemisphärische Läsion* vorliegt, meist unter Einbeziehung der Region um den *Gyrus angularis*. Bei Problemen mit dem Lesen und Schreiben von Zahlen sind *links temporo-parietale Läsionen* häufig. Rechenstörungen im engeren Sinne sind in den meisten Fällen mit *links posterioren Läsionen* verbunden.

Auch wenn neuere Läsionsstudien und funktionell bildgebende Gruppenstudien bei gesunden Probanden und einzelnen hirngeschädigten Patienten noch kein vollständig schlüssiges Bild ergeben, haben sie doch eine erhebliche Differenzierung und Klärung des Störungsbildes bewirkt. Nachfolgend werden die relevanten Hirnareale angeführt, auf die sich die wichtigsten Repräsentationen und Prozesse im Umgang mit Zahlen und beim Rechnen vermutlich stützen können. Eine Einzelfallstudie von Cohen et al. (2000a) zeigt exemplarisch, wie die Kombination einer auf ein Verarbeitungsmodell bezogenen Erklärung und einer funktionell-anatomischen Erklärung in Verbindung mit dem Wissen über fMRT-Aktivierungsmuster sowie Annahmen zur kortikalen Plastizität zu einer plausiblen Begründung des beim einzelnen Patienten gefundenen Aktivierungsmusters führen können.

### 7.6.1 Wichtige kortikale Repräsentationen

#### Repräsentation von Zahlwörtern

Da Zahlwörter eine eigenständige Wortklasse darstellen und komplexe Zahlwörter nach spezifischen morpho-syntaktischen Kombinationsregeln gebildet werden, sollten Zahlwörter in den klassischen (*perisyllvischen*) Sprachregionen im Versorgungsgebiet der A. cerebri media der sprachdominanten (linken) Hemisphäre auditiv und schriftsprachlich verarbeitet werden.

Eine entscheidende Rolle für den Abruf von sprachlich gespeicherten Rechenfakten (besonders das kleine Einmaleins) und sich auf Sprache stützende exakte Berechnungen scheint der *Gyrus angularis* links zu spielen (Cohen et al., 2000a; Delazer et al., 2003a). Am Abruf von hoch überlernten Rechenfakten des kleinen Einmaleins sind weiterhin vermutlich *kortiko-subkortikale Schleifen*, die mit kortikalen Spracharealen verknüpft sind, beteiligt (Dehaene u. Cohen, 1997; Delazer et al., 2004).

### Repräsentation von arabischen Zahlen

Wie die Identifikation und Kategorisierung von visuellen Objekten generell und von geschriebenen Zahlwörtern speziell, stützt sich die Identifikation von arabischen Zahlen auf *Areale des okzipito-temporalen Kortex*, insbesondere des *Gyrus fusiformis* (Cohen et al., 2000b), mit einer vermutlich bilateralen Repräsentation.

### Repräsentation von numerischen Quantitäten

Der Kortex im Bereich des *horizontalen Segments des intraparietalen Sulcus (HIPS)* bilateral scheint die relevante Struktur für die nichtsprachliche quantitative Größenrepräsentation zu sein. Diese Aussage stützt sich vorwiegend auf sehr aktuelle funktionell bildgebende Studien (Dehaene et al., 2003; Pinel et al., 2004; Simon et al., 2002). Es zeigten sich relativ stärkere Aktivierungen bei größerer Beanspruchung quantitativ-numerischer Verarbeitungskomponenten, z. B. beim numerischen Größenvergleich zweier Zahlen mit kleinerer gegenüber größerer Distanz, bei approximativ gegenüber exakter Addition, bei Subtraktion gegenüber hoch überlerntem kleinem Einmaleins, bei nicht trainierten gegenüber massiv trainierten Rechenfakten so-

wie beim Rechnen mit größeren gegenüber kleineren Zahlen.

### 7.6.2 Das Triple-Code-Modell

In der anatomisch-funktionellen Formulierung des Triple-Code-Modells (Dehaene u. Cohen, 1995) wird eine (bidirektionale) Verbindung von links lateralisierten, an Sprache gebundenen Prozessen mit der linken intraparietalen Region und dem Ziffern-Identifikationssystem im linken Gyrus fusiformis angenommen (Abb. 7.1). Letzterer bildet mit dem homologen Areal rechts, verbunden über das Splenium, eine funktionale Einheit. In ähnlicher Weise wird eine funktionelle Verbindung zwischen den inferior parietalen Größenrepräsentationsarealen über einen weiter vorn gelegenen Abschnitt des Corpus callosum angenommen (Cohen u. Dehaene, 1996).

Erst die Spezifizierung eines expliziten kognitiv-neuropsychologischen Verarbeitungsmodells wie des Triple-Code Modells von Dehaene (1992), in Verbindung mit seiner funktionell-neuroanatomischen Einbettung (Dehaene u. Cohen, 1995; Dehaene, 1997) hat ein vertieftes Verständnis von Leistungsdissoziationen bei Patienten mit Akalkulie ermöglicht. Dies gilt insbesondere in Kombination mit Befunden aus Studien mit funktionell bildgebenden Verfahren an gesunden Probanden, die die *Existenz mehrerer funktionaler Netzwerke* der Zahlenverarbeitung und des Rechnens nahe legten.

Ein instruktives Beispiel stammt von Stanesco-Cosson et al. (2000): Hier sollten Additionsaufgaben mit variierender Problemgröße (Summanden von 1–5 bzw. von 5–9) entweder approximativ oder exakt gelöst werden. Unter beiden Bedingungen musste per Tastendruck angegeben wer-

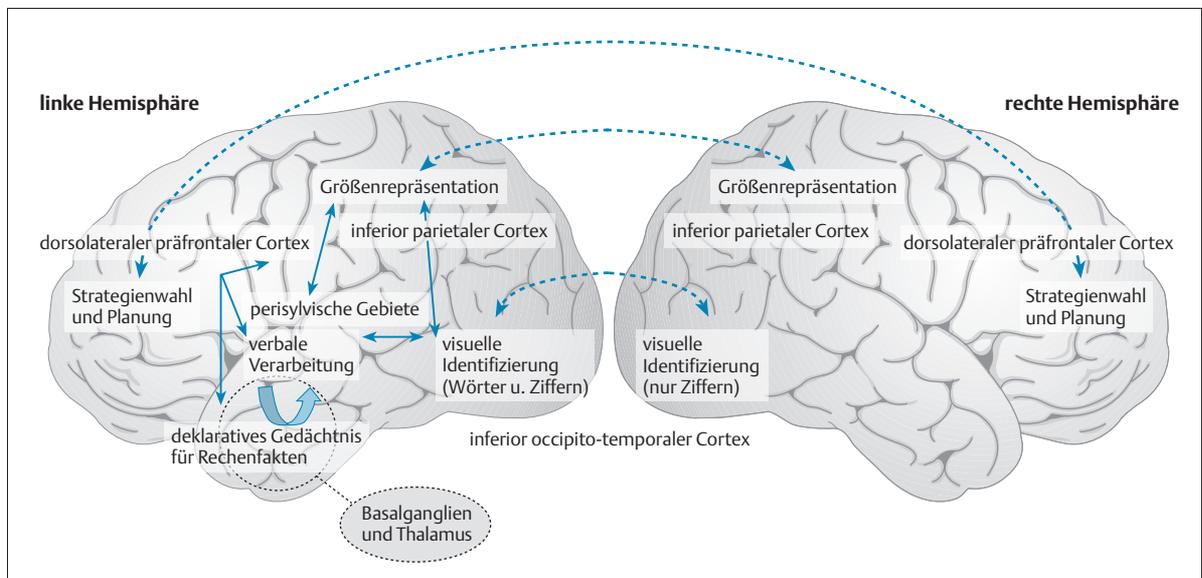


Abb. 7.1 Funktionell-anatomisches Modell der Zahlenverarbeitung und des Rechnens (nach Dehaene, 1997).

den, welches von 2 Ergebnissen zutreffend war. In der approximativen Bedingung waren beide Ergebnisse falsch, aber eines hatte eine geringere numerische Distanz zu dem exakten Ergebnis. Unter der exakten Bedingung bildete eine der beiden präsentierten Ergebniszahlen das exakt richtige Resultat. Bilaterale intraparietale, präzentrale, dorsolateral und superior präfrontale Areale zeigten stärkere Aktivierungen beim *approximativen Rechnen*, während bilaterale Aktivierungen im Gyrus angularis und links inferior präfrontal charakteristisch für die *exakten Berechnungen* waren. Bei exakten Berechnungen mit kleinen Summanden (also leichten Aufgaben) schien eine weitgehende Stützung auf linkshemisphärische Regionen, mit vermutlich verbaler mentaler Kodierung vorzuliegen; approximative Berechnungen generell und exakte Rechnungen bei größeren Problemen führten bilateral zu (inferior) parietalen Aktivierungen, die eine Enkodierung in eine nichtverbale, quantitative Größenrepräsentation wahrscheinlich machten.

Die *Annahme zweier benachbarter Regionen* mit verbaler (Gyrus angularis) vs. quantitativer Zahlenrepräsentation (intraparietale Region) ist für das Verständnis doppelter Dissoziationen bei verschiedenen Patienten mit Akalkulie sehr hilfreich geworden. Auch nach klassischen Läsionsstudien ähnliche Patienten mit parietalen Läsionen können ganz unterschiedliche Störungsmuster zeigen – je nachdem, welche parietalen Areale von der Hirnläsion betroffen sind. Dieses Modell erklärt etwa auch, dass Patienten mit Akalkulie nach linkshemisphärischer parietaler Läsion weiterhin nonverbal die approximativen Größenrelationen zwischen Zahlenstimuli, vorwiegend in nichtsprachlicher Notation, verarbeiten können.

Von Dehaene et al. (2003) ist noch ein *weiteres posteriores superior parietales Netzwerk* mit Bedeutung für die Zahlenverarbeitung postuliert worden, welches, nicht nur für Zahlen, spezifisch die (mentale) Ausrichtung von Aufmerksamkeit regelt.

### 7.6.3 Weitere beteiligte Hirnregionen

Es ist wichtig festzuhalten, dass Hirnareale, auf die sich Aufmerksamkeits-, Gedächtnis- und Exekutivfunktionen stützen, in unterschiedlichem Ausmaß zu allen Rechenanforderungen beitragen und je nach Lage einer natürlichen Hirnschädigung mit betroffen sein können. Auf die Beteiligung visuo-spatialer und (sprachlicher) Arbeitsgedächtnisfunktionen, gestützt auf parietale (im posterioren superioren Parietallappen) und (prä-)frontale Regionen, sei ebenfalls hingewiesen (Dehaene et al., 2003).

In einigen Fällen führen auch rechtshemisphärische oder frontale Läsionen zu Problemen beim Rechnen. Bei Störungen räumlicher Aspekte des Rechnens und der Zahlenverarbeitung sind sowohl rechts- wie linkshemisphärische Läsionen berichtet worden.

Die funktionelle Anatomie von Zahlenverarbeitung und Arithmetik ist komplex und umfasst mehrere Netzwerke.

- Zahlwörter werden in *perisylvischen Sprachregionen der linken Hemisphäre* auditiv und schriftsprachlich verarbeitet.
- Für den Abruf von sprachlich gespeicherten Rechenfakten (kleines Einmaleins) und für exakte Berechnungen ist der *Gyrus angularis links* entscheidend.
- Der Abruf hoch überlernter Rechenfakten schließt mit kortikalen Spracharealen verbundene *kortiko-subkortikale Schleifen* ein.
- Die Identifikation arabischer Zahlen erfolgt bilateral okzipito-temporal, im ventralen Pfad der visuellen Objektverarbeitung, insbesondere im *Gyrus fusiformis*.
- Zentral für die semantische Verarbeitung quantitativer numerischer Größeninformation ist bilateral das *Areal um den horizontalen Abschnitt des intraparietalen Sulkus (HIPS)*.
- *Posterior superior parietal* wird ein drittes Netzwerk postuliert, das für die mentale (räumliche) Aufmerksamkeitsausrichtung auf bestimmte Abschnitte des mentalen Zahlenstrahls verantwortlich ist (Kodierung quantitativer Größeninformation).

## 7.7 Spontanverlauf und Prognose

Der Spontanverlauf von Akalkulien in den ersten Monaten nach einem Schlaganfall ist im Unterschied zum Spontanverlauf von Aphasien kaum untersucht worden. Die umfangreichste (retrospektive) Studie wurde in Mailand an 92 rechtshändigen Patienten mit unilateraler, linkshemisphärischer, vaskulär bedingter Läsion durchgeführt (Basso et al., 2005).

Patienten wurden nur dann eingeschlossen, wenn sie in einer Größenvergleichsaufgabe (12-mal Auswahl der größten Zahl aus einem Tripel von Zahlen) höchstens zwei Fehler machten. Die Untersuchung auf Akalkulie selbst bestand aus 6–7 schriftlichen Aufgaben zu den 4 Grundrechenarten mit steigendem Schwierigkeitsgrad. Gewertet mit jeweils einem Punkt wurden korrekt bestimmte Ziffern des Endresultats; bei der Multiplikation die korrekten Ziffern der Einzelmultiplikationen. Anhand einer großen Kontrollgruppe ohne Hirnschädigung (n = 302) wurde ein nach Alter und Bildung korrigierter Punktwert unter dem Trennwert 74 (maximal 101) als Hinweis auf eine Akalkulie ermittelt. Die erste Untersuchung auf Akalkulie erfolgte im Mittel 2 Monate nach dem Ereignis (Bereich 1–5 Monate), die Verlaufsuntersuchung im Mittel 5 Monate später (Bereich 3–11 Monate). Es kam zu einer *hoch signifikanten spontanen Leistungsverbesserung* mit einem geringeren Ausmaß an Verbesserung bei initial schlechterer Leistung. Diese substanzielle, aber interindividuell hoch variable Verbesserung (im Mittel 24 Punkte; Bereich -16 bis +66), allerdings selten über den Trennwert hinaus, erscheint den

Autoren nicht leicht zu interpretieren: Ihrer Einschätzung nach rechnet Italiener wenig spontan im Kopf und würden eher einen Taschenrechner einsetzen. Wie diese partielle Verbesserung ohne intensivere Stimulation von Rechenfunktionen und -prozeduren zu Stande kommt, sei es durch Nutzung periläsionaler und anderer Areale in der betroffenen linken Hemisphäre oder über die Rekrutierung homologer kontraläsionaler Areale, kann auf Grund der Verhaltensdaten nur spekuliert werden.

## 7.8 Therapie

Die Therapie von Akalkulien erscheint als ein besonders geeigneter Trainingsbereich, da sich auf den Umgang mit Zahlen bezogene Anforderungen wegen ihrer relativen Begrenztheit gut in systematische Übungseinheiten umsetzen lassen. Erst in den letzten Jahren findet man aber verstärkt kontrollierte Studien zu spezifischen Behandlungsmethoden. Eine frühe Einzelfall-Therapiestudie mit einem *erfolgreichen systematischen Training* zum Transkodieren von Zahlen stammt von Deloche et al. (1989). Hier wurde aphasischen Patienten die Umformung eines Zahlworts in eine Ziffernsequenz und umgekehrt vermittelt, mit in der Aphasiebehandlung gebräuchlichen Hilfestellungen und Auswahlhilfen und anschließender schrittweiser Reduzierung dieser Hilfen.

### 7.8.1 Unterschiedliche Therapieansätze

Prinzipiell werden – wie in anderen Bereichen neuropsychologischer Rehabilitation auch – Therapieansätze, die auf *Restitution* der geschädigten Funktion abzielen, solchen Ansätzen gegenübergestellt, die eine *Reorganisation* unter kompensatorischer Nutzung anderer intakter kognitiver Funktionen anstreben.

#### **Restitution der geschädigten Funktion**

Restitution wird üblicherweise durch massives Üben angestrebt, durch das man den Wiedererwerb verloren gegangenen Wissens, sowohl für das Transkodieren als auch für den Abruf von gespeichertem arithmetischem Faktenwissen, erwartet. Die Übungen sollen eine stabile Assoziation zwischen (Rechen-)Problem und richtiger Antwort neu etablieren. Da auch der Ersterwerb im Kindes- und Schulalter sich auf einen lang andauernden und strukturierten Lernprozess gründet, wird Ähnliches für den Therapiefall nach Hirnschädigung vermutet.

Girelli und Seron (2001) geben einen ausführlichen Überblick zu diesen Methoden. Sie nennen empirische Studien bezüglich der erfolgreichen Rehabilitation von Transkodierungsleistungen, von arithmetischem Faktenwissen, von arithmetischen Prozeduren und von arithmetischem Problemlösen in Textaufgaben – letzteres allerdings mit nur geringen und kurzfristigen Erfolgen. Die Autoren weisen darauf hin, dass in der Therapiephase weitgehend das-

selbe oder sehr ähnliches Material wie zur Diagnostik eingesetzt wurde. Da aber viele Anforderungen des täglichen Lebens, wie der Umgang mit Geld (z. B. beim Herausgeben von Wechselgeld), der Umgang mit Maßeinheiten und deren Umrechnen sowie der Umgang mit Brüchen und Prozentzahlen (z. B. beim Modifizieren von Angaben in Rezepten) ebenfalls gute arithmetische Kenntnisse erfordern, betonen Girelli und Seron die Notwendigkeit der Entwicklung von stärker alltagspraktisch ausgerichteten Übungen. Ähnliche Forderungen lassen sich für eine stärker individualisierte berufsbezogene Rehabilitation formulieren (Claros Salinas, 2003).

#### **Reorganisation/Kompensation**

Die Reorganisation arithmetischer Fertigkeiten anhand des Einsatzes von Strategie-Methoden und der Vermittlung von arithmetischen Prinzipien ist bisher noch weniger untersucht worden. Girelli et al. (2002) geben einen Überblick über die Literatur und stellen eine erfolgreiche Einzelfall-Therapiestudie zum Wiedererwerb von Multiplikations-Faktenwissen vor. Das Vermitteln von Strategien und von Wissen über arithmetische Prinzipien (z. B. Kommutativität der Multiplikation, Rechnen mit Klammerausdrücken) soll einen flexiblen Umgang mit neuen Rechenproblemen ermöglichen (z. B. „ $6 \times 8$ “ = „ $(6 \times 10) - (6 \times 2)$ “).

### 7.8.2 Ausblick

Umfangreiche Übungsmaterialien in deutscher Sprache zur Behandlung verschiedener Teilfunktionen der Zahlenverarbeitung und des Rechnens, unter Einschluss alltagsrelevanter Aufgabenstellungen (wie dem Ablesen von Uhrzeiten und dem Umgang mit Geld) wurden von Hüttemann (1998) vorgelegt.

Eine systematische Vermittlung von Trainings- und Therapieansätzen bei Akalkulie fehlt noch weitgehend in der klinisch-neuropsychologischen und in der logopädischen Ausbildung.

Der Spontanverlauf von Akalkulien ist nur grob bekannt; eine Verbesserung ist über 5–6 Monate nach dem Ereignis zu erwarten.

Obwohl sich Zahlenverarbeitung und Rechnen sowie andere elementare numerische Kognitionen als wohl definierte Bereiche darstellen, sind bisher nur relativ wenige systematische Einzelfall- und Gruppen-Therapiestudien durchgeführt worden. Grob lassen sich Therapieansätze mit massivem Üben der geschädigten Funktionen (Drill) und Ansätze mit dem Einsatz von Ersatz-Strategien und der Vermittlung arithmetischer Prinzipien unterscheiden.

## Literatur

- Ardila A, Rosselli M. Acalculia and dyscalculia. *Neuropsychol Rev.* 2002;12:179–231.
- Basso A, Burgio F, Caporali A. Acalculia, aphasia and spatial disorders in left and right brain-damaged patients. *Cortex.* 2000;36:265–280.
- Basso A, Caporali A, Faglioni P. Spontaneous recovery from aphasia. *J Int Neuropsychol Soc.* 2005;11:99–107.
- Benson DF, Denckla MB. Verbal paraphasia as a source of calculation disturbance. *Arch Neurol.* 1969;21:96–102.
- Benton A. Gerstmann's syndrome. *Arch Neurol.* 1992;49:445–449.
- Berger H. Über Rechenstörungen bei Herderkrankungen des Großhirns. *Archiv Psychiatrie Nervenkrankheiten.* 1926;78:238–263.
- Brand M, Kalbe E, Kessler J. Test zum kognitiven Schätzen (TKS). Weinheim: Beltz; 2002.
- Butterworth B. The development of arithmetic abilities. *J Child Psychology Psychiatry.* 2005;46:3–18.
- Caramazza A, McCloskey M. Dissociations of Calculation Processes. In: Deloche G, Seron X, eds. *Mathematical disabilities. A Cognitive Neuropsychological Perspective.* Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates; 1987:221–256.
- Claros Salinas D. Umgang mit Zahlen. In: D von Cramon, N Mai, W Ziegler, Hrsg. *Neuropsychologische Diagnostik.* Weinheim: VCH; 1993.
- Claros Salinas D. EC 301 R: Untersuchungsmaterial zu Störungen des Rechnens und der Zahlenverarbeitung. Konstanz: Kliniken Schmieder; 1994. (Deutsche Adaptation von: Deloche et al. The EC301 Assessment Battery for Brain Damaged Adults. 1993.)
- Claros Salinas D, Willmes K. Störungen der Zahlenverarbeitung. In: Sturm W, Hermann M, Wallesch C-W, Hrsg. *Lehrbuch der klinischen Neuropsychologie.* Lisse: Elsevier; 2000:521–538.
- Claros Salinas D. Therapie von Zahlenverarbeitung und Rechnen nach Hirnschädigung. *Aphasia verwandte Gebiete.* 2003;17:43–60.
- Cohen L, Dehaene S. Cerebral networks for number processing: Evidence from a case of posterior callosal lesion. *NeuroCase.* 1996;2:155–174.
- Cohen L, Dehaene S, Chochon F, Lehéricy S, Naccache L. Language and calculation within the parietal lobe: A combined cognitive, anatomical and fMRI study. *Neuropsychologia.* 2000a;38:1426–1440.
- Cohen L, Dehaene S, Naccache L, et al. The visual word form area: spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain.* 2000b;123:291–307
- Dehaene S, Cohen L. Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition.* 1995;1:83–120.
- Dehaene S. *The number sense: How the mind creates mathematics.* New York: Oxford University Press; 1997.
- Dehaene S, Cohen L. Cerebral pathways for calculation: Double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex.* 1997;33:219–250.
- Dehaene S, Piazza M, Pinel P, Cohen L. Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychol.* 2003;20:487–506.
- Dehaene S, Molko N, Cohen L, Wilson AJ. Arithmetic and the brain. *Curr Op Neurobiol.* 2004;14:218–224.
- Delazer M, Girelli L, Semenza C, Denes F. Numerical skills and aphasia. *J Int Neuropsychol Soc.* 1999;5:1–9.
- Delazer M, Benke T. Arithmetic facts without meaning. *Cortex.* 1997;33:697–710.
- Delazer M, Domahs F, Bartha L, Brenneis C, Lochy A, Trieb T, et al. Learning complex arithmetic – An fMRI study. *Cog Brain Res.* 2003a;18:76–88.
- Delazer M, Girelli L, Grana A, Domahs F. Number processing and calculation – Normative data from healthy adults. *Clin Neuropsychol.* 2003b;17:331–350.
- Delazer M, Domahs F, Lochy A, Karner E, Benke T, Poewe W. Number processing in basal ganglia dysfunction. *Neuropsychologia.* 2004;42:1050–1062.
- Della Sala S, Gentileschi V, Gray C, Spinnler H. Intrusion errors in numerical transcoding by Alzheimer patients. *Neuropsychologia.* 2000;38:768–777.
- Ferro J.M, Botelho MAS. Alexia for arithmetical signs. A cause of disturbed calculation. *Cortex.* 1980;16:175–180.
- Girelli L, Delazer M. Subtraction bugs in an acalculic patient. *Cortex.* 1996;32:547–555.
- Girelli L, Delazer M. Numerical abilities in dementia. *Aphasiology.* 2001;15:681–694.
- Girelli L, Seron X. Rehabilitation of number processing and calculation skills. *Aphasiology.* 2001;15:695–712.
- Grafman J. Acalculia. In: Boller F, Grafman J, eds. *Handbook of neuropsychology.* Vol. 1. Amsterdam: Elsevier; 1988:414–430.
- Grafman J, Rickard T. Acalculia. In: Feinberg TE, Farah MJ, eds. *Behavioral neurology and neuropsychology.* New York: McGraw-Hill; 1997:219–225.
- Hartje W. The effect of spatial disorders on arithmetic skills. In: Deloche G, Seron X, eds. *Mathematical disabilities. A cognitive neuropsychological perspective.* Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates; 1987:121–135.
- Hécaen H, Angelergues R, Houli lier S. Les variétés cliniques des acalculies au cours des lésions rétérorolandiques: Approche statistique du problème. *Revue Neurologique.* 1961;105:85–103.
- Henschen SE. Über Sprach-, Musik- und Rechenmechanismen und ihre Lokalisation im Großhirn. *Z Gesamte Neurol Psychiatr.* 1919;52:273–298.
- Hüttemann J. *Störungen der Zahlenverarbeitung.* Hofheim: NAT Verlag; 1998.
- Ibrahimovic N, Bulheller S, Häcker HO. *Mathematiktest: Grundkenntnisse für Lehre und Beruf.* Lisse: Swets Test Services; 2002.
- Kahn HJ, Whitaker HA. Acalculia: An historical review of localization. *Brain Cogn.* 1991;17:102–115.
- Kalbe E, Brand M, Kessler J. *Zahlenverarbeitungs- und Rechentest (ZRT).* Weinheim: Beltz; 2002.
- Kessler J, Kalbe E. Written numeral transcoding in patients with Alzheimer's disease. *Cortex.* 1996;32:755–761.
- Lemer C, Dehaene S, Spelke E, Cohen L. Approximate quantities and exact number words: Dissociable systems. *Neuropsychologia.* 2003;41:1942–1958.
- Lewandovsky M, Stadelmann E. Über einen bemerkenswerten Fall von Hirnblutung und über Rechenstörungen bei Herderkrankungen des Gehirns. *Z Gesamte Neurol Psychiatr.* 1908;2:249–265.
- McCloskey M, Aliminos D, Sokol, SM. Facts, rules, and procedures in normal calculation: Evidence from multiple single-patient studies of impaired arithmetic fact retrieval. *Brain Cogn.* 1991;17:154–203.
- Noel MF. Numerical cognition. In: Rapp B, ed. *The Handbook of Cognitive Neuropsychology.* Philadelphia: Psychology Press; 2000:495–518.
- Pesenti M, Seron X, van der Linden M. Selective impairment as evidence for mental organisation of arithmetic facts: BB, a case of preserved subtraction? *Cortex.* 1994;30:661–671.
- Pesenti M, Depoorter N, Seron X. Noncommutability of the  $N + 0$  arithmetical rule: A case study of dissociated impairment. *Cortex.* 2000;36:445–454.
- Pinel P, Piazza M, Le Bihan D, Dehaene S. Distributed and overlapping cerebral representations of number, size, and luminance during comparative judgements. *Neuron.* 2004;41:1–20.
- Simon O, Mangin JF, Cohen L, Le Bihan D, Dehaene S. Topographical layout of hand, eye, calculation, and language-related areas in the human parietal lobe. *Neuron.* 2002;33:475–487.
- Stanescu-Cosson R, Pinel P, van de Moortele P-F, Le Bihan D, Cohen L, Dehaene S. Understanding dissociations in dyscalculia: A brain imaging study of the impact of number size on the cerebral networks for exact and approximate calculation. *Brain.* 2000;123:2240–2255.
- Varley RA, Klessinger NJC, Romanowski CAJ, Siegal M. Agrammatic but numerate. *Proc Natl Acad Sci USA.* PubMed 2005;102:3519–24.
- Warrington, EK. The fractionation of arithmetical skills: A single case study. *Q J Exp Psychol.* 1982;34A:31–51.
- Wynn, K. Psychological foundations of number: numerical competence in human infants. *Trends Cogn Sci.* 1998;2:296–303.