



## Altersbezogene Änderungen kognitiver Fähigkeiten – kompensatorische Prozesse und physiologische Kosten

S. A. Schapkin

**Forschung  
Projekt F 2152**

S. A. Schapkin

**Altersbezogene Änderungen  
kognitiver Fähigkeiten –  
kompensatorische Prozesse und  
physiologische Kosten**

Dortmund/Berlin/Dresden 2012

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „Kompensation altersbezogener Änderungen kognitiver Fähigkeiten – physiologische Kosten“ – Projekt F 2152 – der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Autor: Dr. phil. Sergei A. Schapkin  
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Titelfoto: Uwe Völkner, Fotoagentur FOX, Lindlar/Köln

Umschlaggestaltung: Rainer Klemm  
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herstellung: Bonifatius GmbH, Paderborn

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin  
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund  
Telefon 0231 9071-0  
Fax 0231 9071-2454  
poststelle@buaa.bund.de  
www.buaa.de

Berlin:  
Nöldnerstr. 40 – 42, 10317 Berlin  
Telefon 030 51548-0  
Fax 030 51548-4170

Dresden:  
Fabricestr. 8, 01099 Dresden  
Telefon 0351 5639-50  
Fax 0351 5639-5210

Alle Rechte einschließlich der fotomechanischen Wiedergabe und des auszugsweisen Nachdrucks vorbehalten.  
Aus Gründen des Umweltschutzes wurde diese Schrift auf chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt.

ISBN 978-3-88261-141-0

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>Kurzreferat</b>	<b>5</b>
<b>Abstract</b>	<b>6</b>
<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>1 Kompensation kognitiver Beeinträchtigungen bei älteren Erwerbstätigen</b>	<b>8</b>
<b>2 Elektrophysiologische Methoden zur Erfassung der Kompensationsprozesse und physiologischer Kosten bei älteren Erwerbstätigen</b>	<b>11</b>
2.1 Elektroenzephalogramm und Ereigniskorrelierte Potentiale	11
2.2 Herz-Kreislauf-Parameter	12
2.2.1 Herzrate	12
2.2.2 Herzratenvariabilität	13
2.2.3 Blutdruck und Baroreflexsensitivität (BRS)	15
2.2.4 Zusammenhang zwischen unterschiedlichen kardiovaskulären Indikatoren	16
2.2.5 Zusammenhang zwischen neurophysiologischen und kardiovaskulären Indikatoren der kognitiven Belastung	16
<b>3 Altersassoziierte Veränderungen des Arbeitsgedächtnisses und exekutiver Funktionen</b>	<b>18</b>
3.1 Arbeitsgedächtnis und dessen Veränderungen mit dem Alter und Arbeitsanforderungen	18
3.1.1 Experimenteller Ansatz zur Untersuchung des Arbeitsgedächtnisses	19
3.2 Exekutive Funktionen und deren Veränderungen mit dem Alter und den Arbeitsanforderungen	20
3.2.1 Experimenteller Ansatz zur Untersuchung der exekutiven Funktionen	21
3.3 Motorische Vorbereitung und ihre Veränderungen mit dem Alter und den Arbeitsanforderungen	23
3.3.1 Experimenteller Einsatz zur Untersuchung motorischer Vorbereitung	24
<b>4 Hypothesen der Studie</b>	<b>25</b>
4.1 Einfluss des Alters auf die kognitive Leistungsfähigkeit	25
4.2 Einfluss der Arbeitsanforderungen auf die kognitive Leistungsfähigkeit	25
4.3 Einfluss der Aufgabengestaltung auf die kognitive Leistungsfähigkeit	25
4.4 Zusammenhänge zwischen neuronalen und Herz-Kreislauf-Prozessen bei jüngeren und älteren Erwerbstätigen	25
<b>5 Methode</b>	<b>26</b>
5.1 Stichprobe	26
5.2 Kognitive Tests	27
5.2.1 N-Back-Aufgabe zur Untersuchung des Arbeitsgedächtnisses	27
5.2.2 Switch-Aufgabe zur Untersuchung der exekutiven Funktionen	28
5.2.3 Clock-Aufgabe zur Untersuchung der motorischen Vorbereitung	30

5.3	Registrierung physiologischer Parameter	31
5.3.1	EEG-Ableitung und Erfassung von EKP-Komponenten	31
5.3.2	Erfassung der Herz-Kreislauf-Parameter	32
5.4	Versuchsablauf	33
5.5	Datenanalyse	35
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>37</b>
6.1	N-Back-Aufgabe	37
6.1.1	Leistungsdaten	37
6.1.2	Ereigniskorrelierte Potentiale	38
6.1.3	Kardiovaskuläre Parameter	42
6.1.4	Korrelation zwischen den ereigniskorrelierten Potentialen und kardiovaskulären Parametern	45
6.1.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	47
6.2	Switch-Aufgabe	47
6.2.1	Leistungsdaten	47
6.2.2	Ereigniskorrelierte Potentiale	50
6.2.3	Kardiovaskuläre Parameter	57
6.2.4	Korrelation zwischen den ereigniskorrelierten Potentialen und kardiovaskulären Parametern	57
6.2.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	58
6.3	Clock-Aufgabe	59
6.3.1	Leistungsdaten	59
6.3.2	Ereigniskorrelierte Potentiale	60
6.3.3	Kardiovaskuläre Parameter	60
6.3.4	Korrelation zwischen den ereigniskorrelierten Potentialen und kardiovaskulären Parametern	61
<b>7</b>	<b>Diskussion</b>	<b>62</b>
7.1	N-Back-Aufgabe	62
7.2	Switch-Aufgabe	68
7.3	Clock-Aufgabe	73
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse</b>	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>Anwendungsaspekte</b>	<b>81</b>
<b>10</b>	<b>Allgemeine Schlussfolgerungen</b>	<b>82</b>
	<b>Publikationen im Rahmen des Projekts</b>	<b>84</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>86</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>97</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>98</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>99</b>
	<b>Anhang</b>	<b>100</b>

# **Altersbezogene Änderungen kognitiver Fähigkeiten – kompensatorische Prozesse und physiologische Kosten**

## **Kurzreferat**

Im Mittelpunkt der vorliegenden Studie standen Untersuchungen zum Vergleich der kognitiven Leistungsfähigkeit von jüngeren und älteren Erwerbstätigen mit flexiblen oder routinierten Arbeitsanforderungen. Die Kompensation altersassoziierter Beeinträchtigungen kognitiver Funktionen wurde jeweils auf der Leistungs-, Gehirn- und Herz-Kreislauf-Ebene analysiert. Die neuronalen Prozesse exekutiver Kontrolle, des Arbeitsgedächtnisses und der motorischen Vorbereitung wurden mittels ereigniskorrelierter Potentiale (EKPs) untersucht. Darüber hinaus wurden physiologische Kosten der Leistung anhand von kardiovaskulären Parametern (Blutdruck – BD, Herzrate – HR, Herzratenvariabilität – HRV und Baroreflex-Sensitivität – BRS) ermittelt. Zwei Gruppen von 60 jüngeren und 50 älteren Erwerbstätigen (20-35 bzw. 50-65 Jahre alt) führten Aufgaben zur kognitiven Flexibilität, zum Arbeitsgedächtnis und zur motorischen Vorbereitung/Anstrengung durch. Es zeigte sich, dass Ältere im Vergleich zu Jüngeren Schwierigkeiten damit haben, handlungsrelevante Informationen im Gedächtnis zu aktualisieren, wie auch damit, sich auf die sich ständig wechselnden Handlungsanweisungen einzustellen. Diese Defizite gehen mit der verzögerten N2- und der verringerten P3b-Komponente des EKP einher. Dagegen waren bei Älteren andere EKP-Komponenten wie die N1, P2 und CNV erhöht. Das weist auf die kompensatorische Umverteilung der Verarbeitungskapazitäten zugunsten anderer Prozesse (u. a. Reizidentifikation, Aufmerksamkeitsfokussierung und motorische Vorbereitung) hin. Die kompensatorischen Veränderungen auf der zentralnervösen Ebene waren jedoch bei Älteren mit erhöhten physiologischen Kosten im Sinne des erhöhten systolischen BDs, verringerter HRV und BRS verbunden. Ältere versuchten, die Aufgabenanforderungen durch erhöhte Anstrengung zu bewältigen. Jüngere dagegen waren besser in der Lage, ihr Arbeitsgedächtnis für die Anpassung an Arbeitsbelastungen zu nutzen anstatt die Anstrengung zu erhöhen. Die routinierten Arbeitsanforderungen sind im höheren Erwerbsalter mit eingeschränkten exekutiven Kontrollfunktionen und einer verringerten kardiovaskulären Erholung nach kognitiver Belastung verbunden.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Plastizität des Gehirns älterer Erwerbstätiger hinreichende Kompensationsmöglichkeiten bietet, um altersbezogene Leistungsdefizite zumindest teilweise auszugleichen. Dadurch können gleichbleibende Leistungen erbracht werden, was allerdings mit einer gleichzeitigen Erhöhung physiologischer Kosten auf der Herz-Kreislauf-Ebene verbunden ist.

## **Schlagwörter:**

Alter, kognitive Leistungsfähigkeit, Kompensation, Gehirn, Herz-Kreislauf-System

# **Age-related changes in cognitive capacity – Compensatory processes and physiological costs**

## **Abstract**

The study aimed to examine the cognitive capacity in younger and older employees who have to do work with flexible or repetitive requirements. Performance, brain functions and cardiovascular activity were analysed to investigate compensatory processes for age-related cognitive deficits. Event-related potentials (ERPs) were used to examine neuronal processes underlying executive functioning, working memory, motor preparation and mental effort. Blood pressure (BP), heart rate variability (HRV), and baroreflex sensitivity (BRS) were registered to assess the physiological costs of performance. Sixty younger (20-35 years) and 50 older (50-65 years) employees had to perform tasks assessing executive functioning, working memory, motor preparation and mental effort. Older employees had problems with the updating task-relevant information in working memory and coordinating multiple task sets. The deficits were accompanied by a delayed N2 and reduced P3b ERP components. On the contrary, the N1, P2, and CNV components were larger in older than in younger participants. The result suggests a compensatory re-allocation of processing resources to stimulus encoding, focussed attention and motor preparation. The compensatory changes in brain activity were associated with an increase of cardiovascular costs in terms of a heightened systolic BP as well as reduced HRV and BRS. Older participants increased effort as task demands increased. On the contrary, younger participants could efficiently use working memory to cope with demanding tasks instead to increase effort. Repetitive work requirements were related to a diminished executive control and reduced cardiovascular recovery after cognitive load in the older group.

The results suggest that brain plasticity enables compensation for cognitive impairments in older employees, at least to a certain extent. Although they can maintain performance by compensatory effort, which may cause enhanced physiological costs at the cardiovascular level.

## **Key words:**

ageing, cognitive capacity, compensation, brain, cardiovascular system

## Einleitung

Die moderne Arbeitswelt stellt hohe Anforderungen an die kognitiven Fähigkeiten der Beschäftigten. Insbesondere für Ältere ist die rasante Entwicklung von Informations- und Kommunikationstechnologien mit einer großen Herausforderung an ihre kognitive Leistungsfähigkeit verbunden. Diese Gruppe gewinnt jedoch aufgrund des demographischen Wandels in unserer Gesellschaft immer mehr an Bedeutung.

Zahlreiche Studien belegen einen Rückgang an kognitiver Leistungsfähigkeit mit zunehmendem Alter. Betroffen davon sind vor allem die Geschwindigkeit und Flexibilität der Informationsverarbeitung sowie die Merkfähigkeit, die mit biologischen Abbauprozessen in Verbindung gebracht werden (Hedden & Gabrieli, 2004). Die Plastizität des menschlichen Gehirns bietet auch im höheren Berufsalter die Möglichkeit, kognitive Defizite oder Verluste zu kompensieren. Die Kompensationsprozesse führen zum Ausgleich von Leistungsdefiziten und laufen auf der Leistungsebene (z. B. Verlängerung der Reaktionszeit, um die Fehlerrate gering zu halten), auf der Gehirnebene (z. B. Aktivierung zusätzlicher Hirnareale) und auf der Herz-Kreislauf-Ebene (z. B. Erhöhung der Herzrate und des Blutdrucks) ab (Schapkin & Freude, 2006).

Experimentalpsychologische Ansätze ermöglichen eine Objektivierung arbeitsrelevanter Aspekte der Informationsverarbeitung und die Überprüfung darauf gerichteter Modellvorstellungen, die unter kontrollierten Versuchsbedingungen realisiert werden. Außerdem können im Laborexperiment moderne psychophysiologische Methoden genutzt werden, die eine objektive Messung der Prozesse, die der kognitiven Leistungsfähigkeit sowie ihrer Kompensation bei älteren Erwerbstätigen zugrunde liegen, ermöglichen. Somit stellen die experimentalpsychologischen Ansätze eine gute Ergänzung zu epidemiologischen Untersuchungen und Feldstudien dar, die in der Arbeitsforschung traditionell angewendet werden.

Das Ziel des vorliegenden Projekts besteht darin, die Einflüsse des Alters und der Arbeitsanforderungen auf die kognitive Leistung, auf neuronale Prozesse der Informationsverarbeitung und auf die kardiovaskuläre Aktivität experimentell zu untersuchen. Erkenntnisse über die Kompensation kognitiver Defizite und physiologische Kosten können zur Erarbeitung von Konzepten der Intervention und Gesundheitsförderung genutzt werden.



# 1 Kompensation kognitiver Beeinträchtigungen bei älteren Erwerbstätigen

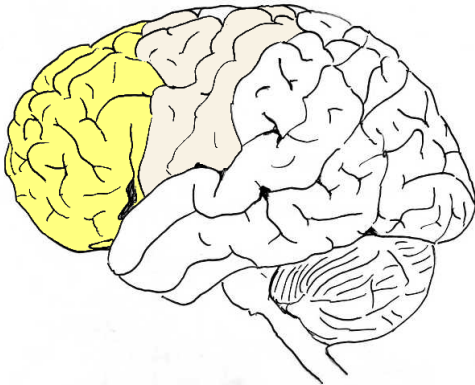
Die zunehmende Variabilität kognitiver Fähigkeiten mit dem Alter (Schaie & Baltes, 1996) kann durch eine Vielzahl konfundierender Faktoren erklärt werden, die als Kompensationsressourcen betrachtet werden können. Dazu gehören u. a. das allgemeine Intelligenzniveau (als Intelligenzquotient (IQ) objektivierbar), ein gesundheitsbewusster Lebensstil (physische Fitness, gesunde Ernährung, Verzicht auf Rauchen), chronische Erkrankungen etc. Der Einfluss dieser Faktoren wurde in unterschiedlichen Studien untersucht: Ältere mit einem höheren IQ, einem höheren Grad physischer Aktivität, einer erhöhten Beteiligung an Weiterbildungsmaßnahmen und diejenigen, die länger im Beruf verbleiben, weisen bessere kognitive Leistungen auf (Colcombe et al., 2004; Potter et al., 2006; Shikhman et al., 2008; Gordon et al., 2008). Die Kompensationsprozesse bei Älteren werden von Baltes et al. (1989) in ihrem „Selektiven Optimierungs- und Kompensationsmodell“ (SOK) konzeptualisiert. Unter Kompensation verstehen die Autoren eine bewusste oder unbewusste Reaktion auf Defizite, bei der die erworbenen Fertigkeiten und Strategien zur Aufrechterhaltung des bestehenden Leistungsniveaus oder des psychosozialen Status genutzt werden. Das SOK-Modell lässt jedoch keine Aussagen über spezifische Veränderungen physiologischer Systeme zu, die eine kognitive Kompensation begleiten. Dazu sind Befunde aus der Hirnforschung zu berücksichtigen, die Hinweise auf kompensatorische Umstrukturierungen von Informationsverarbeitungsprozessen bei Älteren geben (Cabeza et al., 2002, Reuter-Lorenz & Sylvester, 2005). Die Alterung des Gehirns geht mit einem Verlust von Dendriten an den Nervenzellen und einer Reduktion der synaptischen Dichte einher. Das kann für die Übertragung von Informationen zwischen den Hirnregionen kritisch sein. Insbesondere sind frontale Hirnbereiche betroffen, die die exekutive Kontrolle sicherstellen und dazu beitragen, dass Informationsverarbeitung und Handlungsteuerung reibungslos ablaufen (z. B. der 20-jährige Mensch verliert in jeder folgenden Dekade im Durchschnitt ca. 5 % seiner Dendriten im Frontalhirn: Hedden & Gabrieli, 2004). Diese Defizite können durch kompensatorische Prozesse teilweise ausgeglichen werden.

## Kompensation auf der Verhaltensebene

Im Vergleich mit Jüngeren nutzen Ältere in der Regel im höheren Maße auf Genauigkeit orientierte Handlungsstrategien. Sie versuchen, Fehler zu vermeiden und arbeiten daher vorsichtiger und langsamer (De Jong, 2001). So zeigte sich beispielsweise bei älteren Sekretärinnen trotz der üblichen Verlangsamung der Reaktionsgeschwindigkeit im psychometrischen Test keine Verlangsamung der Schreibgeschwindigkeit (Salthouse, 1984). Beim Tippen waren die Sekretärinnen in der Lage, aufgrund ihrer Erfahrung vorausschauend zu arbeiten und damit den Geschwindigkeitsverlust zu kompensieren. In Laboruntersuchungen neigen sie dazu, ihre Konzentration noch vor dem Eintritt des Reizes zu erhöhen, um den Reiz deutlicher wahrzunehmen (Yordanova et al., 2004). Sie profitieren stark davon, wenn ihnen Zeit gegeben wird, eine Reaktion vorzubereiten (Kramer et al., 1999; Kray, 2006) und wenn sie die Informationsverarbeitungsregeln bei sich ständig wechselnden Handlungsanweisungen vorsprechen dürfen (Kray et al., 2008).

### Kompensation auf neuronaler Ebene

Änderungen kognitiver Strategien verbindet man mit einer Aktivierung zusätzlicher Hirnareale. Man findet z. B. mit zunehmender Aufgabenschwierigkeit eine zunehmende Aktivierung des präfrontalen Kortex, die im Zusammenhang mit der Verstärkung exekutiver Kontrolle und Anstrengung betrachtet wird (zum Überblick: Rösler, 2001).



**Abb. 1.1** Der präfrontale Kortex, gelb markiert, nach Karnath und Thier (2006)

Dieser Effekt wurde auch in mehreren Studien mit unterschiedlichen kognitiven Aufgaben anhand ereigniskorrelierter Potentiale (EKPs) demonstriert (Pfefferbaum et al., 1980; Hillman et al., 2006; Daffner et al., 2010). Die sog. P3-Komponente des EKP, auf die im Abschnitt 2.1. eingegangen wird, ist bei Älteren in frontalen Gehirnarealen gleich oder sogar stärker ausgeprägt als in den parietalen Bereichen, während die P3 bei Jüngeren ein parietales Maximum hat. Vermutlich ist die P3-Frontalisierung auf die verringerte Fähigkeit von Älteren zurückzuführen, Ressourcen für die Verarbeitung relevanter Reize zur Verfügung zu stellen (Wickens et al., 1983), Informationen von einem Zielreiz zu extrahieren (Johnson, 1986), den Inhalt des Gedächtnisses zu aktualisieren (Donchin & Coles, 1988), einen Reiz als relevant zu kategorisieren (Kok, 2001) oder eine Entscheidung bezüglich des relevanten Reizes zu treffen (Verleger et al., 2005). Die Unterschiede in den angewendeten experimentellen Paradigmen lassen jedoch keinen direkten Vergleich zwischen diesen Studien zu und somit auch keine Favorisierung einer von den o. g. Interpretationen.

Cabeza et al. (2002) stellten mittels Kernspintomografie fest, dass Ältere beim Memorieren von Informationen teilweise andere Hirnareale nutzen als Jüngere. So erbrachten diejenigen Senioren in einer Gedächtnisaufgabe eine bessere Leistung, bei denen zusätzliche Hirnareale aktiviert wurden. Ältere, bei denen die in Hinsicht auf die aktivierten Areale festgestellte Hirnaktivität mit der von Jüngeren vergleichbar war, wiesen dagegen deutlich schlechtere Leistungen auf. Szaflarski et al. (2006) wiesen nach, dass sich die Lokalisation der Sprachverarbeitung im Gehirn mit fortschreitendem Alter verändert. Beim Vergleich der verschiedenen Altersgruppen zeigte sich, dass sich bei Jüngeren die sprachbezogenen Hirnareale weitestgehend auf der linken Seite konzentrierten, sich jedoch mit zunehmendem Alter allmählich gleichmäßig auf beide Gehirnhälften verteilten.

Eine weitere Besonderheit kognitiver Strategien Älterer ist eine weniger effiziente Fehlererkennung auf neuronaler Ebene (Falkenstein et al., 2001). Es kann angenommen werden, dass die verringerte Fehlerverarbeitung bei Älteren auf unterschiedliche Lernstrategien zurückgeführt werden kann. Jüngere korrigieren ihre Stra-

tegie kontinuierlich, um eine optimale Lösung zu finden. Daher sind sie beim Lernen auf eine ständige Fehlerüberwachung angewiesen. Im Gegensatz dazu haben Ältere nicht genug Kapazität, Fehler zu überwachen, was eine flexible Anpassung ihrer Strategie bei weiteren Durchgängen verhindert. Obwohl Ältere die Fehler wahrnehmen, verarbeiten sie diese anders: Möglicherweise ist die Fehlerverarbeitung nicht auf die Korrektur der kognitiven Strategie, sondern auf die Steigerung der Konzentration und Anstrengung gerichtet.

#### Kompensation auf der vegetativen Ebene

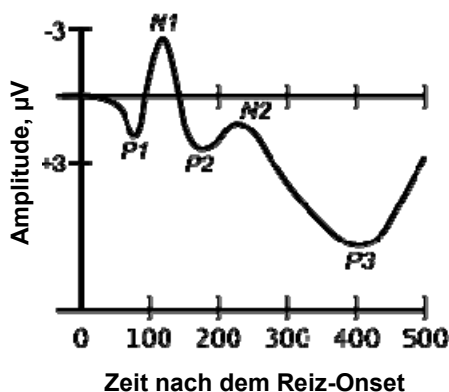
Erhöhte Anstrengung wird von erhöhter Aktivierung des Herz-Kreislaufsystems begleitet. Um sich der erhöhten Belastung (physisch oder psychisch) anzupassen, wird z. B. über eine Steigerung des Blutdrucks (BD) zusätzlich Blut zu den beanspruchten Organen transportiert. Das Gehirn erhält ständig Rückmeldungen von den Barorezeptoren darüber, ob die Organe ausreichend mit Blut versorgt werden. Diese Information wird an das Herz weitergeleitet. Darauf reagiert das Herz mit fein abgestimmten Änderungen des Rhythmus, welche sich in der Herzratenvariabilität (HRV) widerspiegeln. Je größer die HRV ist, desto flexibler passt sich das Herz an die Belastung an. Je länger die HRV reduziert bleibt, desto länger arbeitet das Herz im „Alarmzustand“. Nach dem Konzept der „allostatic load“ (McEwen, 2002) zeigt sich eine flexible Anpassung an kognitive Belastung sowohl in einer erhöhten Reaktivität beim Beginn der Belastung (d. h. Anstieg des Blutdrucks, Verringerung der HRV und Erhöhung der Herzrate (HR) als auch in der schnellen Rückstellung der Reaktion nach der Beendigung der Belastung. Diese Annahmen fanden Unterstützung durch Ergebnisse aus der Studie mit Büroangestellten (Siegrist & Klein, 1990). Diejenigen, die sich unter chronischem Arbeitstress fühlten, zeigten eine verringerte Reaktivität des BDs und der HR auf kognitive Belastung. Bei Älteren wurde im Vergleich zu Jüngeren eine reduzierte HRV und ein erhöhter BD während der Bearbeitung kognitiver Aufgaben (Wood et al., 2002) sowie eine verringerte Reaktivität des Herz-Kreislauf-Systems (Steptoe, 2005) gefunden. Auch emotionale Faktoren können bei Älteren zu erhöhten vegetativen Reaktionen führen. Im Durchschnitt reagieren Ältere in psychologischen Tests und in Lernsituationen unsicherer als Jüngere, da sie befürchten, den Anforderungen nicht gerecht zu werden. Eine erhöhte Anzahl von fehlenden Antworten in Lern- und Gedächtnistests weist auf die Unsicherheit und Ängstlichkeit in Testsituationen hin (Weinert et al., 1990). Außerdem scheinen Strategien der Stressbewältigung mit zunehmendem Berufsalter weniger effektiv zu sein. Schaarschmidt und Fischer (2001) fanden bei älterem Pflegepersonal einen größeren Anteil vom sog. Bewältigungstyp „A“ im Vergleich zu ihren jüngeren Kollegen (der Typ „A“ ist durch erhöhtes Arbeitsengagement und Erholungsunfähigkeit charakterisiert und wird als Risikofaktor für Herz-Kreislauf-Erkrankungen betrachtet).

Zusammenfassend stellt sich die Kompensation kognitiver Beeinträchtigungen als eine komplexe, auf unterschiedlichen Ebenen ablaufende Reaktion dar. In der arbeitsmedizinischen Forschung sind verstärkt Untersuchungen zu Kompensationsprozessen erforderlich, die auf Verhaltens-, Gehirn-, und Herz-Kreislauf-Ebene ablaufen. Es ist insbesondere dann wichtig, wenn kognitive Ressourcen „überfordert“ und Kompensationsprozesse auf Herz-Kreislauf-Ebene aktiviert werden. Obwohl derartige Kompensationsprozesse teilweise Leistungseinbußen kompensieren können, können sie langfristig zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen beitragen (Kilander et al., 2000; Kuo et al., 2004; Steptoe et al., 2005).

## 2 Elektrophysiologische Methoden zur Erfassung der Kompensationsprozesse und physiologischer Kosten bei älteren Erwerbstätigen

### 2.1 Elektroenzephalogramm und Ereigniskorrelierte Potentiale

Die Untersuchung der beschriebenen Kompensationsvorgänge ist unter Anwendung psychophysiologischer Untersuchungsansätze möglich. Kognitive Prozesse gehen mit der bioelektrischen Hirnaktivität einher, die mittels Elektroenzephalogramm (EEG) objektivierbar sind. Auf Basis des EEGs können sog. ereigniskorrelierte Hirnpotentiale (EKPs) extrahiert werden, die eine elektrophysiologische Manifestation von Informationsverarbeitungsprozessen des Gehirns darstellen (Abb. 2.1).



**Abb. 2.1** Das ereigniskorrelierte Hirnpotential

Das EKP wird durch Mittelung reizbezogener EEG-Abschnitte gewonnen und stellt eine Reihe von negativ-positiven Schwankungen dar, die eine Aktivität in einem neuroanatomischen Modul repräsentieren, wenn eine spezifische kognitive Operation durchgeführt wird (Luck, 2005). Einzelne Komponenten des EKP lassen Rückschlüsse darüber zu, wann, wo und mit welcher Effizienz kognitive Prozesse ablaufen (s. Rösler, 2001 zur Übersicht). Daher lassen sich Kompensationsprozesse bei Älteren mittels unterschiedlicher EKP-Komponenten objektivieren. Jede EKP-Komponente wird als Korrelat eines psychologischen Prozesses angesehen wobei die Amplitude und die Latenz Hinweise zum zeitlichen Ablauf dieses Prozesses widerspiegeln. Anzahl, Form und Topographie der Komponenten in einem EKP sind stark von dem Reiztyp und der kognitiven Aufgabe abhängig. In den Aufgaben mit visuellen Stimuli, die im vorliegenden Projekt benutzt wurden, werden folgende Komponenten in Betracht gezogen:

- Die negative N1(N100)-Komponente mit der Gipfellatenz von ca. 150 ms und einem Maximum im okzipitalen Kortex (Ableitung Oz) wird mit der frühen Verarbeitung des Reizes in Verbindung gebracht (Hillyard & Anllo-Vento, 1998).
- Die positive P2 (P200)-Komponente mit der Gipfellatenz von ca. 200 ms und einem Maximum im frontalen Kortex (Ableitungen Fz und Fcz) gilt als Ausprägung der Aufmerksamkeitsfokussierung für die Reize, die ein relevantes Merkmal beinhalten (Luck & Hillyard, 1994).
- Die negative N2 (N200)-Komponente mit der Gipfellatenz von ca. 250 ms und einem Maximum im frontozentralen Bereich (Ableitung Fcz) stellt die Prozesse

der Handlungsüberwachung bzw. Erkennung des Reiz-Reaktion-Konflikts dar (Mathalon et al., 2003; Folstein & Van Petten, 2008).

- Die positive P3b (P300)-Komponente mit der variablen Gipfellatenz von 300-800 ms und einem Maximum im parietalen Kortex (Ableitung Pz) gilt als Index der Kategorisierung eines Reizes, der von hoher Handlungsrelevanz ist (Kok, 2001) und deshalb eine Aktualisierung des Arbeitsgedächtnisses (AG) erfordert (Donchin & Coles, 1988; Polich, 2007). Im weiten Sinne spiegelt sie einen Prozess wider, der die Umsetzung der handlungsrelevanten Informationen in eine Reaktion kontrolliert: je größer die P3-Amplitude ist, desto effizienter funktionieren exekutive Kontrollprozesse (Verleger et al., 2005).
- Die negative reaktionsbezogene Ne (ERN)-Komponente mit der Gipfellatenz ca. 100 ms nach einer falschen Reaktion und einem Maximum im fronto-zentralen Bereich (Ableitung Fcz) wird als Korrelat der Fehlererkennung betrachtet (Falkenstein et al., 2001). Diese Komponente ist dann besonders groß, wenn Fehler gut erkannt und intensiv verarbeitet werden.
- Die negative Komponente (FRN) mit der Gipfellatenz von ca. 100 ms nach einem Leistungsfeedback sowie die positive feedbackbezogene Komponente (FRP) mit der Gipfellatenz von ca. 200 ms und einem Maximum im fronto-zentralen Bereich (Ableitung Fcz) gelten als Indikatoren der Feedbackverarbeitung (Holroyd et al., 2008).
- Die negative reaktionsbezogene Contingent Negative Variation (CNV) erreicht ihr Maximum im prämotorischen Kortex (Ableitungen C3-C4) ca. 50 ms vor einer Reaktion und ist in der Regel an jener Ableitung größer, die kontralateral zur ausführenden Hand liegt (Walter et al., 1964). Die CNV spiegelt den Ressourcenaufwand für die Reaktionsvorbereitung wider (Rohrbaugh et al., 1977; Freude et al., 1999) und wird dadurch auch als Ausprägung psychischer Anstrengung interpretiert (Willd-Wall et al., 2007).

## 2.2 Herz-Kreislauf-Parameter

### 2.2.1 Herzrate

Die Anpassung des Herz-Kreislauf-Systems an kognitive Belastungen stellt sich als Interaktion zwischen sympathischen und parasympathischen Systemen dar, die sich in unterschiedlichen Konstellationen kardiovaskulärer Parameter niederschlägt. Der am häufigsten verwendete Indikator für das kardiovaskuläre Geschehen ist die Herzrate (HR). Sie gibt die Anzahl der Herzschläge pro Minute an, wobei die Herzschläge typischerweise von R-Zacke zu R-Zacke (R-R Intervall) in einem Elektrokardiogramm (EKG) gemessen und anschließend in die HR überführt werden.

Die HR wird wie andere kardiovaskuläre Parameter von unterschiedlichen Konstellationen der sympathischen und parasympathischen (vagalen) Einflüsse moduliert, die vom Gehirn gesteuert werden. Die Ergebnisse von Mulder et al. (2003) sowie Iani et al. (2004) weisen darauf hin, dass die Veränderung der HR eher einer allgemeinen Aktivierungsreaktion entspricht und dass es sich dabei weniger um ein spezielles Maß für kognitive Anstrengung handelt. Um von der HR-Änderung Rückschlüsse auf verschiedene Aspekte kognitiver Beanspruchung ziehen zu können, ist es deshalb erforderlich, Bedingungen zu schaffen, die den Einfluss anderer Parameter, z. B. motorischer (Lee & Park, 1990) oder emotionaler (Stemmler, 1989), so gering wie möglich halten. In einer neueren Studie konnten Lenneman und Backs (2009) mithilfe

einer Arbeitsgedächtnisaufgabe (N-Back-Aufgabe) die Zunahme der HR unter Zunahme der AG-Belastung zeigen. Eine Kombination aus einer N-Back- und einer simultanen Fahraufgabe zeigte einen weiteren HR-Anstieg, was für die Sensitivität dieses Parameters im Hinblick auf kognitive Anforderungen sprechen könnte. Die Autoren wiesen jedoch darauf hin, dass die HR durch andere kardiovaskuläre Parameter ergänzt werden soll, um eine präzisere Belastungsdiagnostik zu ermöglichen. Deshalb werden in Studien zur Untersuchung der kognitiven Leistungsfähigkeit zunehmend auch andere Parameter verwendet, die im Vergleich zur HR mehr Information über die Anpassung des kardiovaskulären Systems an die Belastung bringen. Dazu gehören in erster Linie die Herzratenvariabilität (HRV) und die Baroreflexsensitivität (BRS). Außerdem werden auch traditionelle Maße wie systolischer und diastolischer Blutdruck (SBD, DBD) dank technischem Fortschritt verfeinert und erfolgreich eingesetzt (z. B. kontinuierliche Blutdruckmessung).

### 2.2.2 Herzratenvariabilität

Die HRV kennzeichnet die Veränderungen des zeitlichen Abstandes zwischen zwei benachbarten Herzschlägen, die im EKG als R-R-Intervalle messbar sind. Eine scheinbare Unregelmäßigkeit dieser Abstände bei Gesunden ist Ausdruck einer gut funktionierenden physiologischen Anpassung an aktuelle Erfordernisse (Abb. 2.2).

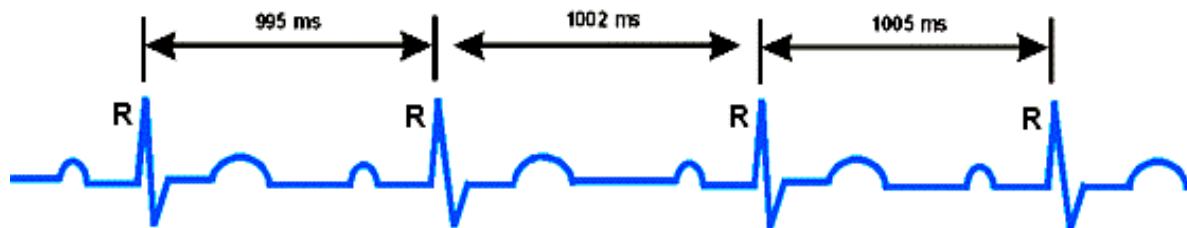


Abb. 2.2 Die Herzratenvariabilität

Jede Belastungsart geht mit einer Verringerung der HRV einher und nimmt nach der Belastung wieder zu (Mulder & Mulder, 1987). Zur Erfassung der HRV können zeit- und frequenzanalytische Methoden zur Anwendung kommen. Zeitanalytische Methoden basieren auf deskriptiver Beschreibung der Streuung der R-R Intervalle.

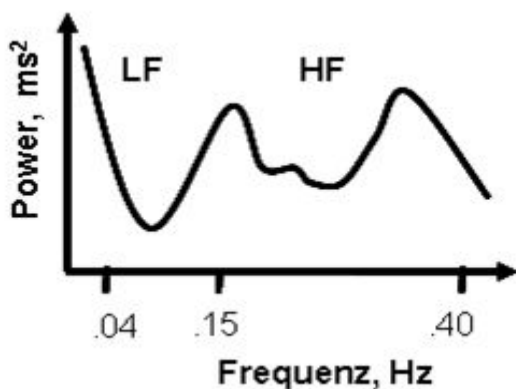


Abb. 2.3 Frequenzbänder der HRV

Durch spektralanalytisches Verfahren (Abb. 2.3) unterscheidet man schnelle Veränderungen des Herzrhythmus (Hochfrequenzband, HF-HRV) und langsame Oszillationen des Herzrhythmus (Niedrigfrequenzband, LF-HRV). Die HF-HRV erstreckt sich über einen Frequenzbereich von 0.15-0.40 Hz wogegen sich das LF-HRV innerhalb von 0.04-0.15 Hz bewegt. Von der HF-HRV wird angenommen, dass diese ausschließlich vagale Einflüsse widerspiegelt, die vor allem durch die spontane Atmung beeinflusst werden (sog. „respiratorische Sinusarrhythmie“). Dagegen repräsentiert das LF-Band eine Mischung von sympathischen und vagalen Einflüssen (Berntson et al., 2007). Als kardiovaskulärer Indikator mentaler Beanspruchung scheint die HRV gegenüber der HR dennoch von größerer Bedeutung zu sein, da eine differenziertere Abbildung der an der Aufgabenbewältigung beteiligten Prozesse möglich ist (Schapkin et al., 2007; 2011)<sup>1</sup>.

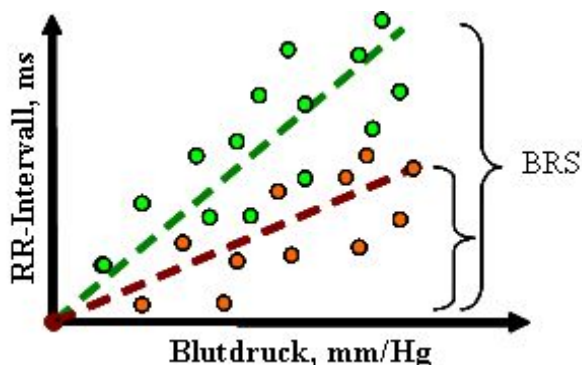
Somatische Erkrankungen und Altern führen zur Verminderung der HF-HRV, die als intergraler Index der kardiovaskulären Fitness genutzt wird. Da dieses Maß fast ausschließlich der parasympathischen Kontrolle unterliegt (Berntson et al., 2007), wird die HRV-Senkung bei einer Erkrankung bzw. mit zunehmendem Alter als Zeichen einer uneffektiven parasympathischen Regulation interpretiert (de Meersman & Stein, 2007).

---

<sup>1</sup> Das Frequenzband von 0.07-0.14 Hz (die sog. 0.10 Hz-Komponente) wird von einigen Autoren als besonders sensitiv gegenüber mentaler Beanspruchung angesehen (Mulder & Mulder, 1981). Zu diesem Maß gibt es jedoch kontroverse Befunde, die es in den letzten 10 Jahren aus der Mode gebracht haben (Nickel, et al, 2002). Dies ist darauf zurückzuführen, dass 0.10 Hz-Komponente stark mit der Atmungsaktivität konfundiert und dadurch die Sensitivität dieser HRV-Komponente gegenüber mentaler Belastung verringert. Jorna (1992) gibt einen Überblick über verschiedene Faktoren, die mit diesem Frequenzbereich konfundieren können und deshalb kontrolliert bzw. bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden sollten. Dazu zählen u. a. die Atmung, Muskelaktivität, Körperposition, physische Fitness, das Alter, Charakteristik der Aufgabe und Umgebungseinflüsse, die z. B. Zeitdruck erzeugen oder emotional belastend sind.

### 2.2.3 Blutdruck und Baroreflexsensitivität (BRS)

Nach Birbaumer und Schmidt (2003) bezeichnet man als Blutdruck den Druck, gegen den die linke Kammer des Herzens das Blut in die Aorta auswerfen muss. Er wird mit jedem Herzschlag auf einen systolischen Wert gebracht und sinkt zwischen den Herzschlägen auf einen diastolischen Wert ab. Hjortskov et al. (2004) zeigten einen erhöhten Blutdruck unter Einwirkung von sozial induziertem Stress im Vergleich zur Baseline. Dieser blieb aber auch in der nachfolgenden Kontrollbedingung erhöht und stieg für den DBD sogar weiter an, wobei die HRV unter Belastung niedriger als unter der Kontrollbedingung war. Yasumasu et al. (2006) zeigten den gleichzeitigen Anstieg von SBD und HR bei arithmetischen Tests unter moderatem Zeitdruck. Diese Konstellation gilt als „Alarmreaktion“ und spiegelt die forcierte Ressourcenmobilisierung wieder, die jedoch langfristig schädigend für das kardiovaskuläre System sein kann (Mulder et al., 2003). Daher muss die „Alarmreaktion“ schnell abgebrochen werden, wenn die stressauslösende Situation bewältigt werden soll. Dies wird durch den Baroreflex gewährleistet. Das Gehirn erhält ständig Rückmeldungen von den Barorezeptoren über den aktuellen Blutdruck. Übersteigt der BD unter Stress einen Sollwert, kommt es zu einer Gegenregulation, bei der die Herzperiode (R-R-Intervall) erhöht wird, was zur Abnahme des BD führt. Die Baroreflexsensitivität (BRS) stellt sich als Neigung der Regressionskurve zwischen den SBD und R-R-Intervall dar, die zeigt, um wie viel Millisekunden sich das R-R-Intervall vergrößert, wenn der BD um 1 mm/Hg ansteigt (Abb. 2.4).



**Abb. 2.4** Beispiele der BRS für Ältere (braun) und Jüngere (grün)

Die BRS gibt an, wie gut ein Organismus in der Lage ist, kurzfristige Blutdruckregulationen durch eine Anpassung an aktuelle Erfordernisse vorzunehmen. Dagegen spiegeln Herzraten- und Blutdruckvariabilitäten eher die spontane autonome Aktivität wieder (Zwiener et al., 2002). Die BRS ist unter kognitiver Belastung reduziert, was auf eine vorübergehende Abnahme des vagalen Einflusses zurückzuführen ist (Mulder, 2003, Yasumasu et al., 2006). Im klinischen Bereich gilt die BRS inzwischen als ein bedeutender Risikoparameter bei der Abschätzung schwerwiegender Komplikationen nach einem Myokardinfarkt. In einer prospektiven Studie an 122 Patienten konnte die BRS die nachfolgenden arrhythmischen Ereignisse im Vergleich zu anderen Indikatoren, z. B. HRV oder Funktion des linken Ventrikels, besser vorhersagen (Farrell et al., 1992). Eine erniedrigte BRS wird mit dem höchsten Risiko für das Auftreten eines plötzlichen Herztodes in Verbindung gebracht (Hohnloser, 1999).



Der BD steigt und die BRS sinkt mit zunehmendem Alter (Farrell et al., 1992; Nürnberger et al., 2003; Steptoe et al., 1996; Mukai et al., 2003; de Meersman & Stein, 2007). Durch die abnehmende Gefäßelastizität im Alter kommt es zu einer Erhöhung der Pulswellengeschwindigkeit, was dazu führt, dass deren Reflexion sich frühzeitig mit der retrograden Pulswelle überlagert. Dieses Phänomen ist maßgeblich mitverantwortlich für die Entstehung des erhöhten SBD im Alter (Nürnberger et al., 2003). Ist der Blutdruck jedoch ständig erhöht, kann es zu einem reduzierten, durch den Baroreflex vermittelten gegenregulatorischen Effekt (Dilatation der Arteriolen und Verminderung der Herzminutenleistung) führen. Somit kann ein höherer BRS-Sollwert eingependelt werden, so dass der gegenregulatorische Baroreflex erst verzögert und bei einem relativ höheren BD ausgelöst wird (Schandry, 1996). Auffallend sind nicht nur die abnehmenden BRS- Mittelwerte mit zunehmendem Alter, sondern auch die Abnahme der intraindividuellen BRS-Variabilität (Mukai et al., 2003). Die o. g. Ursachen können zu einer eingeschränkten Anpassung an kognitive Anforderungen bei Älteren führen.

#### **2.2.4 Zusammenhang zwischen unterschiedlichen kardiovaskulären Indikatoren**

Ergebnisse vieler Studien zeigen ein konsistentes übereinstimmendes Reaktionsmuster unterschiedlicher kardiovaskulärer Parameter auf kognitive Belastung. Dazu gehören der Anstieg von HR und BD, die Verringerung von HRV und oft die Abnahme der BRS (Van Roon et al., 1995). Diese Befunde beziehen sich allerdings häufig auf kurze (fünfminütige) Laborexperimente. Lange Zeit ging man von einer reziproken Aktivierung der sympathischen und parasympathischen Anteile des autonomen Nervensystems (ANS) aus: Die Aktivierung des einen war immer verbunden mit dem Rückgang des anderen Anteils (Mulder & Mulder, 1981). Neuere Studien zeigen jedoch einen komplexeren Zusammenhang zwischen den beiden Systemen. Backs et al. (2009) benutzten visuelle und auditive Überwachungsaufgaben einzeln und in Kombination mit einer visuellen Tracking-Aufgabe. Sie fanden in Abhängigkeit von der Aufgabe verschiedene Reaktionsmuster des ANS. Neuere Ansätze gehen eher von einer multidimensional determinierten Aktivität des ANS - „The doctrine of autonomic space“- aus (Berntson et al., 1994). Zusätzlich zur reziproken Aktivierung könnte es eine Ko-Aktivierung oder Ko-Inhibition der sympathischen und parasympathischen Anteile des ANS geben bzw. diese könnten sogar unabhängig voneinander arbeiten, d. h. eine Aktivierung des einen Anteils ist nicht an eine Veränderung des anderen Anteils gebunden.

#### **2.2.5 Zusammenhang zwischen neurophysiologischen und kardiovaskulären Indikatoren der kognitiven Belastung**

Obwohl die zentralnervöse Regulation des Herz-Kreislauf-Systems seit langem im Mittelpunkt der Forschung steht, gibt es heutzutage wenig Studien, die sich mit dem Zusammenhang zwischen hirnelektrischen und kardiovaskulären Prozessen unter kognitiven Belastungen befassen. Frühere Läsionsstudien sowie Tierversuche zeigen einen positiven Zusammenhang zwischen der Aktivierung des Frontalkortex und dem Auftreten der pathologischen Aktivierung des Herz-Kreislauf-Systems, die in einigen Fällen sogar lebensbedrohlich sein kann (Skinner & Reed, 1981; Lane & Schwartz,

1987; Oppenheimer et al., 1991; Kamarck & Jennings, 1991). Die Aktivierung des Frontalhirns kann auch in den Laborexperimenten durch Induktion negativer Emotionen bewirkt werden. Eine Erinnerung an negative Lebensereignisse führt zur Abnahme des frontalen Alpha-Rhythmus (d. h. Aktivierung des Frontalkortex), die von einer Erhöhung der HR begleitet wurde (Foster & Harrison, 2004). Eine spätere Studie dieser Autoren zeigte positive Korrelationen der frontalen Aktivierung (gemessen als Abnahme des Alpha-Rhythmus) und dem diastolischen BD (Foster & Harrison, 2006). Eine verringerte Aktivierung des Frontalkortex, gemessen als Erhöhung des Theta-Rhythmus, geht mit der Abnahme der sympathischen Aktivierung einher (Kubota et al., 2001). Studien mit bildgebenden Verfahren konnten einen Zusammenhang zwischen erhöhter belastungsindizierter neuronaler Gehirnaktivität und erhöhtem Blutdruck zeigen, speziell in Gebieten, die an der Kontrolle des Herz-Kreislauf-Systems beteiligt sind (Gianaros et al., 2007). In dieser Studie sollten 46 ältere gesunde Frauen ( $68 \pm 1,35$  Jahre) einen Test zur mentalen Interferenz (sog. „Stroop-Test“) ausführen. Die Autoren fanden, dass eine aufgabenbezogene Erhöhung des Blutdrucks mit einer erhöhten Aktivität der Gehirnareale einherging, die mit der exekutiven Kontrolle von kognitiven, emotionalen und kardiovaskulären Prozessen in Zusammenhang gebracht werden: Im posterioren Cingulärkortex, dem orbitofrontalen Cortex, im anterioren Insularkortex und dem Cerebellum. Die Aktivitätswerte in diesen Gehirnarealen sagten das Ausmaß der aufgabeninduzierten Blutdruckänderung vorher. In einer PET-Studie wurde gezeigt, dass die emotionsgeladenen Filme die Aktivierung des medialen präfrontalen und insulären Kortex hervorrufen, die mit einer verringerten HF-HRV (d. h. verringerte vagale Kontrolle) einhergeht (Lane et al., 2001). Der Insularkortex, der in unmittelbarer Nähe des präfrontalen Kortex liegt, spielt eine zentrale Rolle bei der Interorezeption, d. h. bei der Wahrnehmung und Integration von viszeralen Informationen, die wiederum bei der Regulation homöostatischer Prozesse im Organismus von kritischer Bedeutung sind (Critchley, 2009). Der Insularkortex hat zahlreiche anatomische und funktionelle Verbindungen mit Regionen, die in die Verarbeitung von Emotionen involviert sind (Amygdala, ventrales Striatum und orbitofrontaler Kortex). Eine direkte Stimulation des rechten Insularkortex bei Epilepsiepatienten führte zur Erhöhung des BD und der HR (Oppenheimer et al., 1992) während die Schlaganfälle im Insularkortex mit erhöhter sympathischer Aktivität (Meyer et al., 2004), Hypertension (Cereda et al., 2002) und reduzierter HRV (Colivicchi et al., 2004) verbunden sind. Die jüngste bildgebende Studie von Shidharan et al. (2008) weist auf die wichtige Rolle des Insularkortex für das Umschalten zwischen den Hirnstrukturen, die bei einer „exekutiven“ Aufgabe aktiviert werden (sog. „executive network“) und den Strukturen, die im passiven Wachzustand aktiv bleiben (sog. „default-mode network“) hin.

Diese Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass emotionale und/oder kognitive Belastungen zur Aktivierung der frontalen Hirnbereiche und des Insularkortex führen können. Dies kann wiederum einen erhöhten BD, eine erhöhte HR und verminderte HRV bewirken. Altersassoziierte Beeinträchtigungen exekutiver Funktionen und des Arbeitsgedächtnisses müssen näher betrachtet werden, denn die kompensatorische Aktivierung des Frontalhirns kann eine erhöhte Aktivierung des Herz-Kreislauf-Systems und damit ein erhöhtes kardiovaskuläres Erkrankungsrisiko bei Älteren zur Folge haben.

### **3 Altersassoziierte Veränderungen des Arbeitsgedächtnisses und exekutiver Funktionen**

#### **3.1 Arbeitsgedächtnis und dessen Veränderungen mit dem Alter und Arbeitsanforderungen**

Baddely und Hitch (1994) bezeichnen das AG als System, in welchem die handlungsrelevanten Informationen kurzfristig gespeichert und gleichzeitig verarbeitet werden. Das AG wurde als inhaltsunabhängiges System mit begrenzter Speicherkapazität für nichtautomatisierte Prozesse dargestellt und enthält die zentrale exekutive Komponente („central executive“), die zwei weitere Komponenten koordiniert und kontrolliert. Dazu gehören die sog. phonologische Schleife („phonological loop“), die für die kurzzeitige Speicherung von phonologisch-sprachlichem Material zuständig ist, und der visuell-räumliche Pfad („visuo-spatial scratchpad“), welcher visuelle und räumliche Informationen speichert. In der phonologischen Schleife werden die relevanten Informationen u. a. durch internes Vorsprechen aktiv gehalten. Im visuell-räumlichen Pfad werden die Visualisierung relevanter Objekte und deren räumlichen Verhältnisse für aktive Aufrechterhaltung im Arbeitsgedächtnis benutzt.

In einer Vielzahl von Studien wurde die Abnahme der AG-Leistungen mit zunehmendem Alter gefunden (zum Überblick: West, 1996, Verhaeghen & Cerella, 2002). Als mögliche Ursache für altersbedingte Unterschiede in der AG-Leistung wird die verringerte Fähigkeit angesehen, relevante Informationen im AG zu aktivieren und die nicht mehr relevante Informationen zu inhibieren (Hasher & Zacks, 1988, Knight & Grabowecy, 1995, Verhaeghen & Basak, 2005). Diese Annahme geht mit mehreren Studien einher, welche eine erhöhte Ablenkbarkeit von Älteren belegen (e. g. West, 1999). Borella et al. (2008) konnten in ihrer Untersuchung mit 304 Probanden im Alter zwischen 20 und 86 Jahren zeigen, dass die Inhibitionsdefizite 43 % der Varianz von Altersunterschieden bei Arbeitsgedächtnisleistungen erklärt.

Der präfrontale Kortex ist für die AG-Prozesse von zentraler Bedeutung. Die bildgebenden Studien zeigen einen linearen Anstieg der Aktivierung im lateralen präfrontalen Kortex mit steigender AG-Belastung (Braver et al., 1997). Außerdem ist die Verbindung zwischen dem Prefrontalkortex und parietalen Hirnbereichen unter AG-Belastung stärker, was vor einigen Jahren zum Begriff „frontal-parietales Netzwerk“ (frontal-parietal network) führte (Honey et al., 2002; Wager, 2003; Kiss et al., 2007; Chen et al., 2008). Mattay et al. (2006) berichten von einem ähnlichen Anstieg der frontalen Aktivierung bei Jüngeren und Älteren, wenn die kognitive Belastung mäßig ist. Dabei unterscheidet sich die Leistung von Älteren und Jüngeren nicht, was als Kompensation angesehen wird. Wird jedoch die Belastung erhöht, nimmt die Aktivierung des Frontalkortex bei Jüngeren weiter zu, wobei bei Älteren eine Deaktivierung zu verzeichnen ist, die mit den erheblichen Leistungseinbußen einhergeht.

Die Leistungsunterschiede innerhalb der Gruppe von Älteren sind sehr groß, denn bei manchen Älteren lassen die AG-Leistungen schneller nach als bei anderen. Nagel und Mitarbeiter (2009) teilten die Probanden innerhalb jeder Altersgruppe in Leistungsstärkere und Leistungsschwächere und stellten eine bessere Leistung bei leistungsstärkeren Älteren als bei leistungsschwächeren Jüngeren fest. Außerdem zeigten Ältere mit hohen Leistungen ähnlich wie Jüngere mit hohen Leistungen eine schwierigkeitsbedingte Zunahme der Hirnaktivität. Die Älteren mit niedrigen Leistungen zeigten hingegen insbesondere bei den schwierigsten Aufgaben häufiger eine

Abnahme der Hirnaktivität. Dieses Ergebnis zeigt deutlich, dass die neuronalen Netzwerke bei manchen Älteren intakt bleiben können und dadurch eine Kompensation der altersassoziierten AG-Beeinträchtigungen ermöglichen. Es handelt sich jedoch um eine partielle Kompensation, weil die leistungsstärkeren Älteren in der zitierten Studie das Niveau der leistungsstärkeren Jüngeren trotz zusätzlicher Aktivierung nicht erreichen konnten. Das kann an einer uneffektiven Ressourcenallokation liegen, denn die leistungsstärkeren Älteren wiesen die frontale Aktivierung bereits unter niedriger Belastung auf, was wiederum einen exzessiven Ressourcenverbrauch bedeuten kann. Dagegen nahmen Jüngere den präfrontalen Kortex nur unter hoher Belastung in Anspruch.

### **3.1.1 Experimenteller Ansatz zur Untersuchung des Arbeitsgedächtnisses**

Das N-Back-Paradigma (Gevins et al., 1990) zählt zu den meist benutzten experimentellen Ansätzen für die Untersuchung des AGs. In einem N-Back Experiment wird eine Abfolge von Items (z. B. Buchstaben) sequentiell dargeboten und der Proband muss entscheiden, ob das Item in der Sequenz „n“ Positionen vorher auftrat. Ist „n“ z. B. gleich zwei, wird das neue Item mit dem Item verglichen, welches zwei Präsentationen zurückliegt. Der Pb muss also die zuletzt dargebotenen Reize im Gedächtnis aktiv aufrechterhalten (maintenance) und gleichzeitig den Inhalt des Arbeitsgedächtnisses kontinuierlich aktualisieren (updating) (Braver et al., 1997; Cohen et al., 1997). Diese Aufgabe unterscheidet sich von AG-Aufgaben, in denen die sog. „manipulative“ Komponente im Vordergrund steht. Dabei werden zwei unterschiedliche mathematische Operationen nacheinander durchgeführt, wobei das Zwischenergebnis vorübergehend abgespeichert wird (Wager, 2003).

Unsere Modifikation der N-Back-Aufgabe erzielte eine angemessene AG-Belastung, bei der die Aufgabe nicht zu leicht und nicht zu schwierig für ältere Pb war. Mit der Einführung eines Antwortzeitfensters von 1500 ms sollte ein moderater Zeitdruck entstehen. Die Gesamtsequenz wurde in Subsequenzen aufgeteilt, die einen Zielreiz gepaart mit einem identischen Reiz zwei Positionen zuvor beinhalteten. Die gute Trennbarkeit der Subsequenzen ist eine Voraussetzung für die sinnvolle Nutzung der FB-Bedingung, die eine weitere Modifikation der Aufgabe darstellte. Die Einführung einer Feedbackbedingung kann zur Verbesserung der kognitiven Leistung führen (zum Überblick: Balzer et al., 1989). In der FB-Bedingung bekamen die Pbn durch die Darbietung von Tönen unterschiedlicher Frequenzen Rückmeldung über ihre Leistungen, d. h. über korrekte und falsche Antworten. Der Hinweisreiz half den Probanden ihre volle Konzentration auf die nachfolgenden Trials zu richten, da es nicht länger nötig war, die alte Information im Arbeitsgedächtnis aufrecht zu erhalten (s. Abschnitt 5.2.1). Die Belastung für das Arbeitsgedächtnis war damit geringer. Die Pbn wurden explizit auf die Bedeutung des FBs hingewiesen, so dass sie diesen Hinweisreiz für die Entlastung des AGs nutzen konnten.

### 3.2 Exekutive Funktionen und deren Veränderungen mit dem Alter und den Arbeitsanforderungen

Mit exekutiven Funktionen werden in der Neuropsychologie die Funktionen gekennzeichnet, die der Handlungsinitiierung, -aufrechterhaltung, -wechsel, und -hemmung zugrunde liegen (zum Überblick: Pawlik, 2006). Miyake und Mitarbeiter haben in ihrer Studie die Vielzahl der exekutiven Funktionen drei Bereichen zugeordnet (Miyake et al., 2000):

- *Inhibition of pre-potent responses*. Damit bezeichnet man die Fähigkeit, spontane Reaktionen willentlich zu unterdrücken.
- *Mental set shifting*. Darunter versteht man die Fähigkeit, einen Wechsel zwischen konkurrierenden Aufgaben oder Operationen zu vollziehen.
- *Information monitoring and updating*. Dies beschreibt die Fähigkeit, die handlungsrelevanten Informationen aufrecht zu erhalten und ständig zu aktualisieren. Diese Funktion wird auch als „exekutive“ Komponente des Arbeitsgedächtnisses betrachtet, die sich von der Speicherkomponente unterscheidet (s. Abschnitt 3.1).

Die exekutiven Funktionen sind als höhere Kontrollfunktionen zu verstehen, die die „untergeordneten“ kognitiven Funktionen überwachen, koordinieren und damit einen reibungslosen Ablauf einer Handlung gewährleisten. Wenn z. B. beim Autofahren eine Strecke wegen Bauarbeiten plötzlich gesperrt wird, sorgt die exekutive Kontrolle dafür, eine alternative Route aus dem Langzeitgedächtnis abzurufen. Beim komplexen Kopfrechnen ist z. B. ein exekutiver Kontrollprozess nötig, um die Zwischenergebnisse im AG aktiv zu halten.

Als neuronale Basis exekutiver Funktionen gilt der präfrontale Kortex, dessen Läsion zu einem partiellen oder kompletten Ausfall der zielgerichteten Verhaltenssteuerung führt (Luria, 1948, 1964). Die Zunahme kognitiver Belastung geht mit einer erhöhten Aktivierung des präfrontalen Kortex einher, was auf eine erhöhte Beteiligung exekutiver Funktionen hindeutet. In den bildgebenden Studien wurde eine mit einer erhöhten Aktivität in den frontalen Hirnbereichen einhergehende Reduktion der Aktivität in der okzipitalen Region bei Probanden im höheren Alter gezeigt (sog. „posterior-anterior shift“, Davis et al., 2007). Diese Veränderung der kognitiven Aktivität im Alter wird einer Funktion der kognitiven Kompensation zugeschrieben, weil sie mit einer höheren Leistung bei kognitiven Aufgaben assoziiert ist. Die Reorganisation der Hirnsysteme ist auch mit einer Aktivierung zusätzlicher Hirnareale verbunden, die die Aufrechterhaltung beeinträchtigter Funktionen zu unterstützen scheinen (Cabeza et al., 2002). Auch in den Studien auf Grundlage von ereigniskorrelierten Potentialen (EKPs) wurde bei Älteren eine erhöhte Aktivierung von frontalen Hirnbereichen beobachtet, wenn sie eine komplexe motorische Reaktion vorbereiten mussten. Dies wurde als Korrelat erhöhter Anstrengung und exekutiver Kontrolle gesehen (Wild-Wall et al., 2007). Im Experiment zur kognitiven Flexibilität (Switch-Aufgabe) wurde bei Älteren eine größere Beteiligung des präfrontalen Kortex gefunden, die mit einer verminderten parietalen Aktivität einherging (Hillman et al., 2006). Die meisten Studien, die diese Art der Aufgabe eingesetzt haben, zeigten eine eingeschränkte Fähigkeit bei Älteren, sich an den Wechsel der Informationsverarbeitungsregel anzupassen (Kramer et al., 1999; Smith et al., 2001; Kray, 2006).

Es gibt wenige Studien, die die Effekte der Arbeitsanforderungen auf exekutive Funktionen untersucht haben. Potter et al. (2008) zeigten, dass Personen, die einen Beruf mit höheren intellektuellen Anforderungen ausüben, leichte Verbesserungen ihres kognitiven Status über einen Zeitraum von 7 Jahren aufweisen. Dagegen zeigen diejenigen, deren Beruf mehr physische Anforderungen oder visuelle Aufmerksamkeit

verlangen, einen leichten Rückgang der kognitiven Leistung über denselben Zeitraum. Die kognitive Aktivität im Berufsleben wirkt sowohl auf die Gedächtnisleistungen als auch auf die alterskritische „fluide“ Intelligenz aus (Hultsch et al., 1999; Schooler et al., 1999). Nach Bosma et al. (2003) können komplexe Arbeitsbedingungen, die das Lernen unterstützen und Problemlösefertigkeiten abverlangen, den Altersabbau verringern. Schooler et al. (1999) zufolge nimmt der positive Einfluss der beruflichen Tätigkeit mit steigendem Alter sogar zu.

Im Rahmen unseres Kooperationsprojekts mit dem Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der Technischen Universität Dortmund (Gajewski et al., 2010, [www.pfiifonline.de](http://www.pfiifonline.de)) untersuchten wir, wie sich ältere von jüngeren Arbeitnehmern bezüglich ihrer kognitiven Funktionen unterscheiden und wie diese Funktionen durch langfristige Arbeitsanforderungen mit höherer vs. niedriger kognitiver Flexibilität beeinflusst werden. Die Arbeiter führten eine Aufgabe mit den sich ständig wechselnden Handlungsanweisungen aus (s. die Beschreibung im Abschnitt 3.2.1). Dabei zeigten ältere Fließbandarbeiter eine längere Reaktionszeit und eine höhere Fehlerrate als die älteren Arbeiter, die in der Instandhaltung tätig waren und dadurch flexiblere Arbeitsanforderungen hatten. Außerdem reagierten die „flexiblen“ Älteren zwar langsamer aber dafür genauer als Jüngere. Auf neuronaler Ebene zeigten ältere Fließbandarbeiter eine kleinere parietale P3 und Ne-Komponenten als andere Berufsgruppen, was auf Defizite im Abruf handlungsrelevanter Informationen vom Arbeitsgedächtnis sowie auf verminderte Fehlerverarbeitung hindeutet. Bemerkenswert ist, dass diese Komponenten bei älteren „flexiblen“ Arbeitern deutlich größer waren als bei den „routinierten“. Die Ergebnisse liegen den Schluss nahe, dass die flexiblen Arbeitsanforderungen dem Auftreten kognitiver Defizite dauerhaft entgegenwirken können.

### **3.2.1 Experimenteller Ansatz zur Untersuchung der exekutiven Funktionen**

Arbeitsanforderungen mit sich ständig wechselnden Handlungsanweisungen lassen sich mit der sog. Switch-Aufgabe objektivieren. Eine solche Aufgabe erfordert, dass die Versuchsperson beim gleichbleibenden Stimulusmaterial unterschiedliche Verarbeitungsregeln anwenden muss. Die Durchgänge (Trials), in denen zwischen den Regeln gewechselt wird, nennt man Wechseldurchgänge (Switches). Die Trials, in denen dieselbe Regel angewendet werden muss, sind Wiederholungsdurchgänge (Repeats). Durch den Wechsel zwischen verschiedenen Aufgaben im „gemischten“ Block entstehen Kosten bei Reaktionszeit und Fehlern gegenüber einem „konstanten“ Block, in dem nur eine von beiden Aufgaben bearbeitet wird (sog. globale Wechselkosten). Finden Wiederholungs- und Wechseldurchgänge innerhalb eines Blockes statt, spricht man von lokalen Wechselkosten (Differenz der Leistungsmaßen zwischen den Wechsel- und Wiederholungsbedingungen Bedingungen innerhalb des „gemischten“ Blocks).

Ein Ergebnis der Mehrzahl von Alterstudien ist, dass Ältere im Vergleich zu Jüngeren höhere globale Wechselkosten aufweisen, wobei die lokalen Wechselkosten altersunabhängig bleiben (Kramer et al., 1999; Mayr, 2001; Hillman et al., 2006; Kray, 2006). Das bedeutet, dass Ältere erhebliche Probleme haben, mehrere konkurrierende Reiz-Reaktion-Konstellationen im Arbeitsgedächtnis aktiv zu halten und zu koordinieren (globale Kosten). Dagegen scheinen Ältere genauso wie Jüngere beim Aufgabewechsel in der Lage zu sein, irrelevante Handlungsanweisungen zu inhibieren und die relevanten Handlungsanweisungen zu aktivieren (gleiche lokale Wech-

selkosten). Die meisten Studien konnten Alterseffekte auf die globalen Wechselkosten bei RZ jedoch nicht hinsichtlich der Fehlerrate zeigen (Mayr, 2001; Kray et al., 2005; Hillman et al. 2006; Friedman et al 2007; Eppinger et al, 2007; West & Travers, 2008; Karayanidis et al, 2011). Daraus kann man die Annahme ableiten, dass die Aufgabenschwierigkeit in diesen Studien nicht ausreichend hoch war, um die Altersunterschiede in den Wechselkosten zu indizieren. Es ist auch unklar, ob die Alterseffekte auch dann zu sehen sind, wenn die Aufgabe so komplex ist, dass beide Altersgruppen an ihre Kapazitätsgrenzen gebracht werden. Das kann der Fall sein, wenn das Arbeitsgedächtnis stark belastet oder keine Vorbereitungsmöglichkeit für einen Aufgabewechsel gegeben wird.

In der vorliegenden Studie wurde eine Switch-Aufgabe modifiziert, um eine hohe kognitive Belastung zu simulieren. Da die übliche Switch-Aufgabe zwei Informationsverarbeitungsregeln enthält, wurde in unserer Aufgabe eine dritte Regel hinzugefügt, was die Aufgabe für die Pbn erheblich erschwerte. Den Pbn wurden einstellige Zahlen (außer 5) dargeboten, die sie je nach Hinweis 1) numerisch mit der Zahl „5“ vergleichen, 2) bewerten, ob sie gerade oder ungerade war oder 3) sie nach der Schriftgröße einschätzen mussten, wobei zwei Schriftgrößen visuell gut unterscheidbar waren. Es wurde angenommen, dass die Bewertung der physischen Größe viel einfacher ist als die Bewertung der numerischen Größe oder Geradzahligkeit. Dabei soll die einfachere Aufgabe (d. h. der Vergleich der physischen Größe) jedes Mal eine schnellere Reaktion auslösen sowie eine stärkere Inhibition der Reaktion, wenn ein Aufgabewechsel gefordert wird. Unter diesen Bedingungen sollten sowohl größere globale als auch größere lokale Wechselkosten bei Älteren, und zwar nicht nur bei der RZ, sondern auch bei der Fehlerrate, bewirkt werden.

Eine weitere Modifikation der Aufgabe betraf die Hinweisdarbietung. Die üblichen Versionen dieser Aufgabe beinhalten entweder einen Wechsel der Verarbeitungsregel nach dem Hinweis in Zufallsreihenfolge (irregulärer Wechsel mit Hinweis, IWH) oder einen Wechsel ohne Hinweis, bei dem man nach vorgegebener Anzahl von Durchgängen gewechselt werden muss und die Durchgänge im Kopf mitgezählt werden müssen (regulärer Wechsel ohne Hinweis, RW). Der *Hinweiseffekt* (Hinweis vs. kein Hinweis) konnte jedoch aus dem Vergleich zwischen dem IWH- und RW-Block nur bedingt erfasst werden, denn dieser Effekt ist mit dem *Vorbereitungseffekt* (irreguläre vs. reguläre Trialsequenz) vermischt, wie es z. B. in der Studie von Kray (2006) der Fall war. Da beide Faktoren eine entgegengesetzte Wirkung auf die Leistung haben (die Hinweispräsentation verbessert sie, fehlende Vorbereitungsmöglichkeit verschlechtert sie), kann die Vermischung dieser Faktoren zu unzulässigen Schlussfolgerungen führen. Deshalb führten wir eine Bedingung mit regulärem Wechsel und Hinweis ein (RWH), um den Einfluss des Hinweises und der Vorbereitung auf die abhängigen Variablen zu separieren. Der Vergleich zwischen IWH und RWH lässt den Vorbereitungseffekt abschätzen, während der Vergleich zwischen RW und RWH die Abschätzung des Hinweiseffekts ermöglicht. Da der Hinweis in der RWH für den Wechsel redundant ist, sollte die Einführung dieser Bedingung auch klären, ob es Altersunterschiede in der Verarbeitung der redundanten Information gibt. Die redundante Information kann eine zusätzliche Hilfe für Ältere leisten. Alternativ dazu kann sie sich bei Älteren aber auch als störend auswirken, denn mehrere Autoren berichten eine erhöhte Ablenkbarkeit bei Älteren im Vergleich zu Jüngeren (West, 1999; Stevens et al., 2008; Vallesi et al, 2009). Dagegen sollte eine redundante Information die Leistung von Jüngeren nur geringfügig verbessern, denn sie sollten sich beim Aufgabewechsel vorwiegend auf ihr Gedächtnis stützen.

### 3.3 Motorische Vorbereitung und ihre Veränderungen mit dem Alter und den Arbeitsanforderungen

Die Geschwindigkeit und Präzision motorischer Reaktionen sowie sensomotorische Koordination spielen in zahlreichen Berufen eine wichtige Rolle. Die Reaktionsgeschwindigkeit nimmt jedoch mit dem Alter ab (Salthouse, 1996), was älteren Erwerbstätigen Probleme bereiten kann. Traditionell werden Defizite an „höheren“ kognitiven Funktionen (z. B. geteilte Aufmerksamkeit, Arbeitsgedächtnis und exekutive Kontrolle) als Hauptdeterminanten einer bei Älteren häufig auftretenden Verlangsamung angesehen (West, 1996; Cabeza et al., 2002; Reuter-Lorenz & Sylvester, 2005). Aber auch bei den einfachen Reiz-Reaktions-Aufgaben, an denen die „höheren“ Funktionen nur geringfügig beteiligt sind, sind Ältere langsamer als Jüngere (Falkenstein et al., 2006). In visuellen und auditiven Wahl-Reaktions-Aufgaben wurden die Ursachen dieser Verlangsamung untersucht (Yoradnova et al., 2004, Falkenstein et al., 2006). Die Autoren gingen der Frage nach, bei welchem Informationsverarbeitungsschritt Ältere am meisten Zeit verlieren, was sich in einer längeren Reaktionszeit niederschlägt. Es wurde davon ausgegangen, dass altersbedingte kompensatorische Prozesse existieren, u. a. eine verstärkte Aktivierung sensorischer oder motorischer Areale, um Defizite an „höheren“ kognitiven Funktionen auszugleichen. Es zeigte sich, dass die altersassoziierte Verlangsamung nicht durch Verzögerungen der Reizidentifikation oder der Reaktionswahl erklärt werden kann. Die Zuordnung einer bestimmten Reaktion zu einem bestimmten Reiz wird durch das Alter nicht signifikant verzögert, so dass Ältere genauso schnell wie Jüngere die Aktivierung der richtigen Reaktion beginnen können. Dagegen ist eine Veränderung der zentralen motorischen Aktivierung bei den Älteren für die Verlangsamung verantwortlich. Ältere benötigen eine längere und stärkere Aktivierung des kontralateralen motorischen Hirnrindensareals als Jüngere, um die gleiche Reaktion auf der Verhaltens-ebene zu realisieren. Das kann durch höhere Schwellen der motorischen Neurone bedingt sein, die ihrerseits an einer Abschwächung der Überleitung vom Zwischenhirn zum motorischen Kortex liegen können (Volkow et al., 1998). Eine andere mögliche Erklärung für die Schwellenerhöhung des motorischen Kortex kann auch rein psychologischer Natur sein. Ältere versuchen, Fehler zu vermeiden und arbeiten daher vorsichtiger und langsamer (De Jong, 2001). Das kann auch bedeuten, dass Ältere mehr Ressourcen in die Reaktionsvorbereitung investieren als Jüngere.

Als elektrophysiologisches Korrelat der Vorbereitungsprozesse dient die sog. Contingent Negative Variation (CNV) – eine langsame negative Komponente des ereigniskorrelierten Potentials, die sich nach der Vorankündigung einer mentalen oder motorischen Reaktion über mehrere Gehirnareale entwickelt und sich nach der Reaktionsausführung abbaut (Gaillard, 1977; Rohrbaugh et al., 1986). Als neuronale Basis der CNV wird ein Netzwerk aus kortikalen und subkortikalen Strukturen betrachtet. Dazu zählen der präfrontale Kortex, das supplementärmotorische Areal, der motorische Kortex und die Basalganglien (Hamano et al., 1997, Gomez et al., 2003). In den Studien zur physischen Fitness wurde gezeigt, dass unfitte Pbn eine größere CNV zeigen als fitte Pbn, was auf einen größeren Ressourcenaufwand bei unfitten Pbn hinweist (Kamijo et al., 2010). Wenn die Pbn dafür belohnt werden, sich mehr anzustrengen und schneller zu reagieren, wird die CNV größer als unter einer neutralen Bedingung (Falkenstein et al., 2003). Nach dieser Logik kann eine erhöhte CNV bei Älteren im Vergleich zu den Jüngeren in einer komplexen Suchaufgabe als Ausprägung erhöhter mentaler Anstrengung interpretiert werden (Wild-Wall et al., 2007). Außerdem wies eine positive Korrelation zwischen der CNV und der Leistung bei Äl-



teren darauf hin, dass die altersassoziierten kognitiven Defizite durch erhöhte Anstrengung kompensiert werden können.

Unserer Kenntnis nach gibt es bisher keine Studien, die die CNV im Zusammenhang mit unterschiedlichen Arbeitsanforderungen betrachtet haben. Eines der Ziele unseres Projekts ist es daher zu untersuchen, ob „routinierte“ Arbeitsanforderungen im Vergleich zu den „flexiblen“ Arbeitsanforderungen mit einem erhöhten Ressourcenaufwand für die motorische Vorbereitung einhergehen. Weiterhin soll geklärt werden, ob dieser Effekt altersabhängig ist.

### **3.3.1 Experimenteller Einsatz zur Untersuchung motorischer Vorbereitung**

Die sog. S1-S2-Aufgabe gehört zu den meistbenutzten für die Untersuchung der Vorbereitungsprozesse. Dabei treten zwei aufeinander folgende Reize auf, die durch ein bestimmtes Interstimulus-Intervall voneinander getrennt sind. Der erste Reiz übernimmt die Funktion eines Hinweisreizes und markiert den Beginn einer Vorwarnperiode. Der zweite Reiz, welcher nach einem festen Zeitintervall auf den ersten Reiz folgt, wird als ein imperativer Reiz verstanden, der den Probanden zu einer Antwort auffordert, die motorisch (z. B. Tastendruck) oder nicht-motorisch (z. B. Mitzählen relevanter Reize) erfolgt. Die zu beobachtende negative Potentialverschiebung in Form der CNV entwickelt sich nach dem Hinweisreiz und löst sich mit der Darbietung des imperativen Reizes wieder auf. Zur Auslösung der CNV wird nicht unbedingt eine motorische Reaktion gefordert, sondern sie tritt auch dann auf, wenn ein Urteil bezüglich des wahrgenommenen Reizes verlangt wird, wenn positive oder negative Verstärkung erwartet wird oder wenn eine Vorbereitung auf eine kognitive Anforderung erfolgt. Die Entwicklung der CNV hängt nur wenig von physikalischen Parametern der Reize, wie Modalität oder Intensität, und der zeitlichen Kontiguität ab. Es lassen sich hier eher Variationen in Abhängigkeit des informativen Inhalts der Reize, der Art der Antwortanforderungen sowie von individual-psychologischen oder situationsbedingten Einflüssen feststellen.

Die Clock-Aufgabe (Meißner-Pöthig & Michalak, 1997) ist eine Modifikation der klassischen S1-S2-Aufgabe, mit der sich arbeitsrelevante Aspekte der Informationsverarbeitung objektivieren lassen. Diese beziehen sich auf die Berufe, die kontinuierliche Überwachung und Kontrolle von bestimmten Parametern eines komplexen technischen Systems (z. B. eines Kraftwerkes) beinhalten. Bei solchen Berufen ist nicht nur eine Kontrolle gefordert, sondern auch eine Bereitschaft, rechtzeitig zu reagieren, wenn die Parameter des Systems von ihren Sollwerten plötzlich abweichen. Den Probanden wurde am Computer-Bildschirm eine analoge Uhr dargeboten. Bei jedem Trial startete der Zeiger bei der 12-Uhr-Position und sollte mittels des rechten Zeigefingers durch Knopfdruck nach 3 vollständigen Umdrehungen so genau wie möglich wieder auf 12 Uhr gestoppt werden. Freude et al. (1999) fanden bei der Ausführung der Clock-Aufgabe eine CNV, die sich vom Start bis zum Tastendruck erstreckte. Die CNV verringerte sich mit der Übung, was auf einen verringerten Aufwand für eine Reaktionsvorbereitung zurück zu führen ist. Somit ist dieser experimentelle Ansatz gut geeignet, mentale Anstrengung bei Vorbereitung motorischer Reaktionen bei jüngeren und älteren Erwerbstätigen reliabel zu messen.

## **4 Hypothesen der Studie**

### **4.1 Einfluss des Alters auf die kognitive Leistungsfähigkeit**

Kognitive Leistungen von älteren Erwerbstätigen unterscheiden sich nicht von denen Jüngerer, wenn weder eine Belastung des Arbeitsgedächtnisses noch eine Beteiligung exekutiver Funktionen vorliegen. Unter Belastung ist die Leistungsfähigkeit Älterer geringer als Jüngerer.

Diese altersassoziierten Leistungsdefizite sind mit spezifischen Veränderungen der neuronalen Prozessen verbunden, die die Umsetzung der handlungsrelevanten Informationen in eine Reaktion kontrollieren.

Ältere versuchen ihre kognitive Beeinträchtigungen durch erhöhte Anstrengung zu kompensieren, was zu einer Änderung der kognitiven Strategie auf der Leistungsebene, einer Umverteilung von Informationsverarbeitungsressourcen auf der Gehirnebene und erhöhten physiologischen Kosten auf der kardiovaskulären Ebene führt.

### **4.2 Einfluss der Arbeitsanforderungen auf die kognitive Leistungsfähigkeit**

Die kognitive Leistungsfähigkeit ist bei älteren Erwerbstätigen mit hohen Anforderungen an die kognitive Flexibilität bei der Arbeit höher als bei älteren Erwerbstätigen mit routinierten Arbeitsanforderungen. Das schlägt sich nicht nur in der besseren Leistung sondern auch in effektiveren neuronalen Prozessen nieder, die die Umsetzung der handlungsrelevanten Informationen in eine Reaktion kontrollieren. Außerdem weisen die älteren Erwerbstätigen mit flexiblen Arbeitsanforderungen niedrigere physiologische Kosten auf der kardiovaskulären Ebene auf.

### **4.3 Einfluss der Aufgabengestaltung auf die kognitive Leistungsfähigkeit**

Bei älteren Erwerbstätigen führen die Leistungsfeedbacks, externe Hinweise, sowie die Möglichkeit zur Vorbereitung der Aufgabe zur Verbesserung der Leistung, der neuronalen Informationsverarbeitungsprozesse und zur Verringerung von physiologischen Kosten auf der kardiovaskulären Ebene.

### **4.4 Zusammenhänge zwischen neuronalen und Herz-Kreislauf-Prozessen bei jüngeren und älteren Erwerbstätigen**

Unter kognitiver Belastung soll die Aktivierung der frontalen Hirnareale mit sympathischer Aktivierung auf der kardiovaskulären Ebene positiv und/oder mit der parasympathischen Aktivierung negativ korrelieren. Diese Korrelationen sollten in den komplexen Aufgaben stärker werden als in den einfachen Aufgaben, sowie stärker bei Älteren als bei Jüngeren.

## 5 Methode

### 5.1 Stichprobe

An der Studie nahmen 60 jüngere und 50 ältere erwerbstätige Personen teil. Die Gruppe der jüngeren war zwischen 24 und 35, die Gruppe der älteren Probanden zwischen 51 und 58 Jahre alt. Die Alters- und Geschlechtsangaben sind in der Tabelle 5.1 dargestellt.

**Tab. 5.1** Altersangaben der untersuchten Stichprobe

	Alter Mittelwert	Alter Min.	Alter Max.	N
<b>Jüngere</b>				
Frauen	29	24	35	33
Männer	29	21	35	27
<b>Ältere</b>				
Frauen	54	51	58	23
Männer	56	51	63	27
Gesamt				110

Die Pbn wurden durch Inserate in der Zeitung, auf der Webseite der BAuA und Plakate in der S-Bahn akquiriert. Im Telefoninterview wurden die Pbn nach Alter, Erwerbsstatus sowie nach Merkmalen des allgemeinen Status ihrer Gesundheit befragt.

Probanden mit folgenden Kriterien wurden zur Untersuchung eingeladen:

- Alter: 20 bis 35 J. oder 50 bis 65 J.
- Erwerbstätigkeit: mind. 20 Std/Woche oder selbstständig, Berufserfahrung mind. 6 Monate
- Sprachvermögen: Muttersprache Deutsch oder Deutsch als Fremdsprache fließend
- Hör-Sehvermögen: normal oder bis 100 % korrigiert
- Keine chronischen oder akuten Erkrankungen
- Keine Schädel-Hirn-Traumata in der Vorgeschichte
- Keine neurologische OPs in der Vorgeschichte
- Keine regelmäßige Einnahme von Medikamenten (exkl. Kontrazeptiva)
- Rechtshänder
- Blutdruck bei brachialer Messung: systolischer – zwischen 100 und 140 mmHg, diastolischer – zwischen 60 und 100 mmHg.

Von den Bewerbern wurde ein Fragebogen ausgefüllt, in dem die Berufsbezeichnung, die Regelmäßigkeit der Beschäftigung, die 3 wichtigsten Aufgaben sowie der prozentuale Anteil der Arbeitszeit, der im Durchschnitt für jede Aufgabe am Tag erforderlich ist, erfragt wurde. Anhand dieser Angaben haben 5 Experten beurteilt, ob die erforderliche Flexibilität bezüglich der Arbeitsaufgaben bzw. Arbeitstätigkeiten im Berufsalltag eher niedrig (Wert 1) oder eher hoch (Wert 2) ist (s. die Instruktion für

die Experten im Anhang 1). Nach Mittelung der Expertenbewertung wurden die Pbn auf die beiden Gruppen „routinierte“ bzw. „flexible“ Tätigkeiten aufgeteilt (Tab. 5.2).

**Tab. 5.2** Aufteilung der Pbn auf die Berufsgruppen

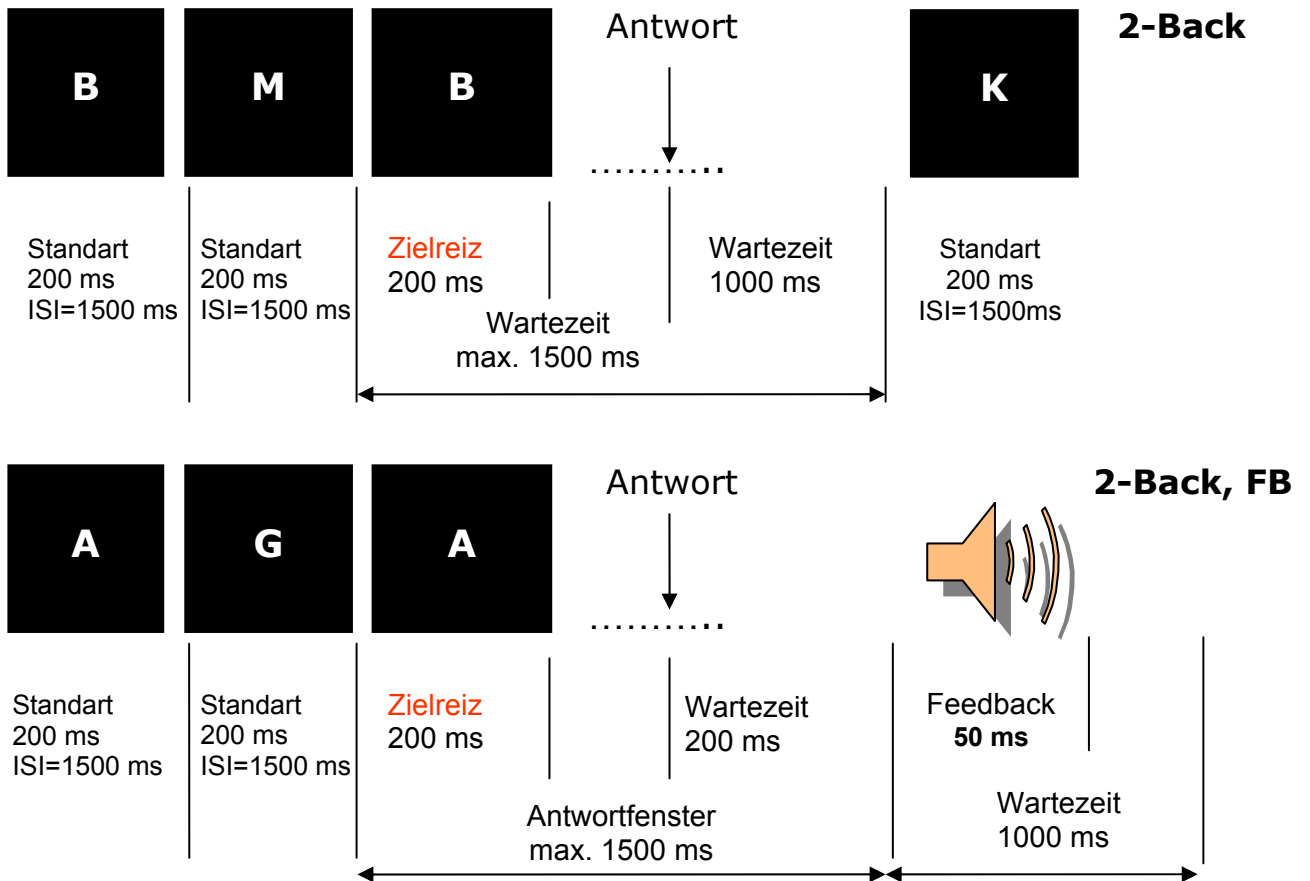
<b>Jüngere</b>	Arbeitsanforderungen	Anzahl
<i>Frauen</i>	routiniert	14
	flexibel	13
<i>Männer</i>	routiniert	15
	flexibel	18
<b>Ältere</b>		
<i>Frauen</i>	routiniert	11
	flexibel	16
<i>Männer</i>	routiniert	7
	flexibel	16
Gesamt		110

## 5.2 Kognitive Tests

### 5.2.1 N-Back-Aufgabe zur Untersuchung des Arbeitsgedächtnisses

Dem Pb wurde sequentiell eine Reihe von Großbuchstaben des deutschen Alphabetes dargeboten. In der 0-Back-Aufgabe ohne Feedback hatten die Teilnehmer lediglich auf das Erscheinen des Buchstaben X mit einem Tastendruck zu reagieren. In dieser Aufgabe wurden alle Buchstaben des deutschen Alphabetes als Stimulusmaterial eingesetzt. Die 2-Back-Aufgabe enthielt ebenfalls alle Buchstaben des deutschen Alphabetes, ausgenommen des Buchstaben X. In dieser Bedingung sollte der aktuell präsentierte Buchstabe mit demjenigen Buchstaben verglichen werden, der zwei Präsentationen zuvor auf dem Bildschirm erschien. Die 2-Back-Aufgabe wurde einmal mit und einmal ohne FB präsentiert. Das FB bestand aus 50 ms Tönen verschiedener Frequenzen. Bei korrekter Antwort erfolgte ein 1000 Hz Ton, bei verpasster Antwort (Omission) ein 2000 Hz Ton und bei „falscher Alarm“ ein 500 Hz Ton, bevor ein neuer Buchstabe nach 950 ms erschien. In der Bedingung ohne FB erschien 1000 ms nach erfolgter Antwort bzw. 200 ms nach dem Verstreichen des Antwortfensters bei verpasster Antwort jeweils ein neuer Buchstabe. Das Interstimulusintervall war damit variabel und betrug längstens 2500 ms. Der Ablauf der 2-Back-Aufgabe mit und ohne FB wird schematisch in Abb. 5.1 dargestellt.

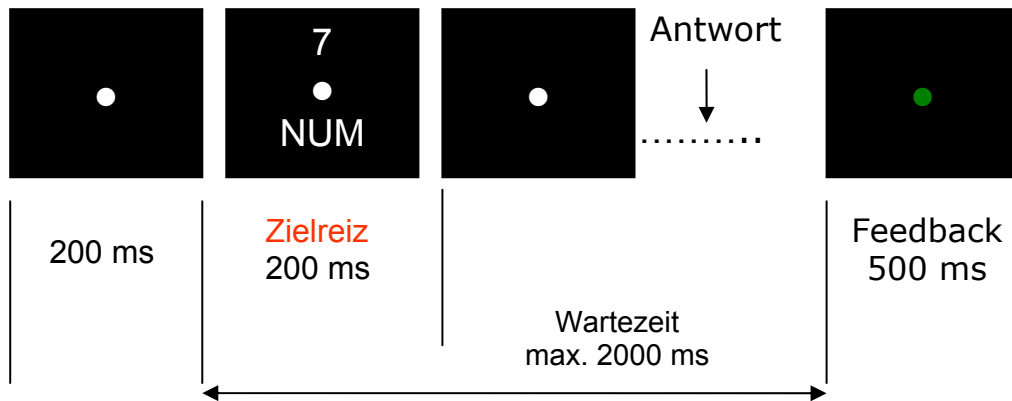
Der Testteil umfasste 3 Blöcke, jeweils 2 Blöcke (mit/ohne FB) für die 2-Back-Aufgabe zu je 388 Trials und 1 Block für die 0-back-Aufgabe mit je 189 Darbietungen. Die Auftrittswahrscheinlichkeit des Zielreizes lag bei 20 Prozent und wurde über alle Bedingungen konstant gehalten. Die unterschiedliche Anzahl der Trials in den beiden Aufgaben ergab sich aus einer Mindestanzahl von Trials, die für die EKP-Erhebung notwendig waren. Daraus resultierten in der 0-back-Aufgabe 30 Zielreize eingebettet in 189 Trials. Zusätzlich mussten nun die Minisequenzen der n-back Aufgabe ausbalanciert werden, um Abfolgeeffekte zu vermeiden. Darüber hinaus sollte gewährleistet werden, dass jeder Buchstabe gleich häufig als Zielreiz auftrat. Für einen N-back Block ergab sich daraus ein Minimum von 388 Trials.



**Abb. 5.1** Schematische Darstellung der 2-Back-Aufgabe ohne Feedback (oben) und der 2-Back-Aufgabe mit Feedback (unten). In diesem Beispiel musste der Pb auf „B“ (oben) und auf „A“ (unten) reagieren

## 5.2.2 Switch-Aufgabe zur Untersuchung der exekutiven Funktionen

Dem Pb wurden die Zahlen 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9 über einem Fixationskreis (10 mm im Durchmesser) dargeboten (Abb. 5.2). Unter dem Fixationskreis wurde ein Hinweis (16 x 32 mm) präsentiert, der eine Informationsverarbeitungsregel ankündigte. Der Hinweis „NUM“ signalisierte, dass die Zahl numerisch mit der Zahl „5“ zu vergleichen war. Der Hinweis „GER“ forderte den Pb auf zu entscheiden, ob die Zahl ungerade oder gerade sei. Beim Hinweis „SCH“ musste der Pb die Schriftgröße der Zahl einschätzen, während die Zahlengrößen voneinander gut unterscheidbar waren (klein: 7 x 10 mm, groß: 12 x 18 mm). Bei jedem Durchgang musste die Antwort so schnell wie möglich durch Drücken von Tasten mit dem linken bzw. rechten Zeigefinger abgegeben werden, wobei folgende Reiz-Reaktion-Konstellationen festgelegt wurden (Tab. 5.3).



**Abb. 5.2** Schematische Darstellung der Switch-Aufgabe

Während des Versuchs führten die Pbn drei konstante und drei gemischte Blöcke durch. Im konstanten Block musste nur eine Verarbeitungsregel angewendet werden (d. h. entweder numerischer Vergleich oder „Gerade/Ungerade“-Vergleich oder Schriftgrößenvergleich). In den gemischten Blöcken mussten die Pbn zwischen den Verarbeitungsregeln wechseln. Im Block mit regulärem Wechsel und Hinweis mussten sie die Regel nach jedem dritten Durchgang wechseln (NUM-GER-SCH), was den Wechsel für sie vorhersehbar machte. Insgesamt bestand der Block aus 180 Durchgängen, 33.3 % davon waren Wechsel- und 66.6 % Wiederholungsdurchgänge. Dasselbe Verhältnis hatte der Block mit regulärem Wechsel ohne Hinweis. Auch in diesem Block war der Wechsel für die Pbn vorhersehbar (NUM-GER-SCH). Es wurde jedoch anstelle des Hinweises die Maske „XXX“ dargeboten, so dass die Abfolge nur aus dem Gedächtnis abzurufen war. Insgesamt bestand der Block aus 225 Durchgängen. Um zu vermeiden, dass die Pbn vorzeitig „aussteigen“, wurde nach drei aufeinanderfolgenden Fehlern dreimal die Verarbeitungsregel angezeigt. Im Block mit irregulärem Wechsel und Hinweis war die Regel dagegen nicht vorhersehbar, weil die Wechsel- (45 %) und die Wiederholungsdurchgänge (55 %) in einer Zufallsabfolge dargeboten wurden. Der Block bestand aus 192 Durchgängen.

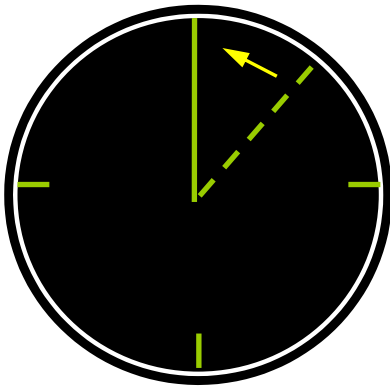
**Tab. 5.3** Reiz-Reaktion-Konstellationen in der Switch-Aufgabe

Aufgabe	numerischer Vergleich (NUM)		Gerade/Ungerade Vergleich (GER)		Schriftgrößenvergleich (SCH)	
<b>Reize</b>	1,2,3,4 1,2,3,4	6,7,8,9 6,7,8,9	1,3,7,9 1,3,7,9	2,4,6,8 2,4,6,8	1,2,3,4 6,7,8,9	1,2,3,4 6,7,8,9
<b>Ergebnis</b>	kleiner 5	größer 5	ungerade	gerade	klein	groß
<b>Reaktion</b>	linke Hand	rechte Hand	linke Hand	rechte Hand	linke Hand	rechte Hand

Für die Bearbeitung eines Durchgangs wurde ein Zeitfenster von 2000 ms gegeben. Erfolgte in dieser Zeit keine Reaktion durch den Pb, ertönte ein Signal von 2000 Hz für 50 ms.

### 5.2.3 Clock-Aufgabe zur Untersuchung der motorischen Vorbereitung

Die Clock-Monitoring-Task (Clock-Aufgabe) wurde in früheren Studien erfolgreich angewandt (Meißner-Pöthig & Michalak, 1997; Freude, Ullsperger & Erdmann, 1999). Die Probanden sahen in der Mitte des schwarzen Computer-Bildschirms eine analoge Uhr, die mit 4 Strichen und einem grünen Zeiger gekennzeichnet war. Der Zeiger bewegte sich entgegen des Uhrzeigersinns. Bei jedem Trial startete der Zeiger bei der 12-Uhr-Position und sollte per Knopfdruck mittels des rechten Zeigefingers nach 3 vollständigen Umdrehungen so genau wie möglich wieder bei 12 Uhr gestoppt werden (Abb. 5.3).



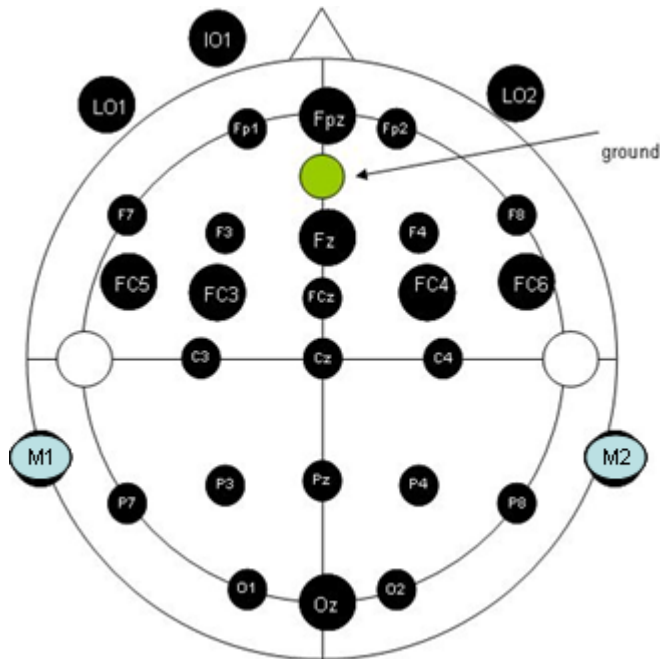
**Abb. 5.3** Schematische Darstellung der Clock-Aufgabe

Das Experiment bestand aus insgesamt 70 Trials und dauerte etwa 8 Minuten. Eine komplette Umdrehung des Zeigers dauerte 720 ms. Als Indikator für die Genauigkeit diente die Trefferzahl in der 12-Uhr-Position sowie die Abweichung des Zeigers zwischen der 12-Uhr-Position und der Position, die durch den Knopfdruck erreicht wurde. Alle Treffer, die sich im Segment von  $\pm 90^\circ$  in Relation zur 12-Uhr-Position befanden (d. h. zwischen „9 Uhr“ und „3 Uhr“), wurden in die weitere Auswertung einbezogen. Um die Genauigkeit der Treffer differenzierter zu beurteilen, erfolgte ebenfalls eine Auswertung der Treffer im Segment von  $\pm 20^\circ$  bezogen auf die 12-Uhr-Position. Da sich nicht nur die hohe Genauigkeit sondern auch die niedrige Reaktionsvariabilität als informativer Leistungsparameter darstellt, wurde die absolute und relative Abweichung von der 12-Uhr-Position gemessen. Die absolute Abweichung war unabhängig davon, ob vor oder nach der 12-Uhr-Position gestoppt wurde. Dagegen war die relative Abweichung „strategieabhängig“; der negative Wert bedeutete, dass die Antwort vor der 12-Uhr-Position abgegeben wurde, der positive Wert kennzeichnete die Reaktionen nach der 12-Uhr-Position.

## 5.3 Registrierung physiologischer Parameter

### 5.3.1 EEG-Ableitung und Erfassung von EKP-Komponenten

Das EEG wurde gegen Cz als Referenzelektrode von 23 aktiven Elektroden (Fpz, Fz, Fcz, Pz, Oz, Fp1, Fp2, F3, F4, F5, F6, Fc3, Fc4, C3, C4, P3, P4, P7, P8, O1, O2) nach dem internationalen 10/20-System mit der Zeitkonstante von 10 s und Tiefpassfilter von 70Hz abgeleitet (Abb. 5.4).



**Abb. 5.4** EEG-Montage

Das vertikale Elektrookulogramm (EOG) wurde an IO1-Fp1-Elektroden, das horizontale EOG an LO1-LO2-Elektroden abgeleitet.

Die Abtastrate der EEG-Ableitung betrug 1024 Hz, die Impedanzen wurden unter 5 k $\Omega$  gehalten. Nach dem Versuch wurde das EEG von Cz auf die verbundenen Mastoiden (M1-M2-Elektroden) re-referenziert, wobei die Cz wieder zur aktiven Elektrode gemacht und in der anschließenden Auswertung benutzt wurde. Alle EEG-Segmente, die außerhalb von  $\pm 100 \mu\text{V}$  lagen, wurden für die weitere Analyse nicht verwendet. Die Augenartefaktkorrektur erfolgte nach Gratton & Coles (1983). Nach der Artefaktkorrektur wurde das EEG je nach Fragestellung segmentiert und innerhalb eines Probanden gemittelt. Anschließend wurden die EKPs von den einzelnen Pbn gemittelt. Anhand der gemittelten EKPs wurden die aus der Literatur bekannten EKP-Komponenten extrahiert (Luck, 2005), die als negative oder positive Maxima an den folgenden Elektroden nach internationalen Handanweisungen gemessen wurden (Tab. 5.4).



**Tab. 5.4** Elektroden und Zeitfenster zur Bestimmung der EKP-Komponenten

EKP-Komponente	Elektrode	Zeitfenster, ms	Polarität	Art der Mittelung
N1	Oz	50 – 150	negativ	reizbezogen
P2	Fz, Fcz, Cz, Pz	100 – 250	positiv	reizbezogen
N2	Fz, Fcz, Cz, Pz	150 – 300	negativ	reizbezogen
P3	Fz, Fcz, Cz, Pz	300 – 700	positiv	reizbezogen
Ne	Fcz	0 – 100	negativ	reaktionsbezogen
CNV	C3, C4	-100 – 0	negativ	reaktionsbezogen
FRN	Fcz	0 – 150	negativ	feedbackbezogen
FPN	Fcz	100 – 250	positiv	feedbackbezogen

Für die EEG-Ableitung und Auswertung wurden die EEG-Verstärker sowie die Programme „Brain Recorder“ und „Brain Analyser 2.0“ der Firma „Brain Products GmbH“ (Deutschland) verwendet.

### 5.3.2 Erfassung der Herz-Kreislauf-Parameter

Das EKG und der Blutdruck wurden kontinuierlich über den gesamten Zeitraum der Aufgabenbearbeitung und während der Ruhebedingungen erhoben. Der BD wurde mit zwei Messgeräten erfasst. Zur Messung des brachialen BD wurde das Gerät der Firma Bosch & Sohn GmbH (Deutschland) benutzt. Die Luftmanschette wurde während der Messung am linken Oberarm angebracht und nach dem Riva-Rocci-Verfahren automatisch auf- und abgepumpt. Außerdem wurde der kontinuierliche BD vor, während und nach dem Versuch auf der Beat-to-Beat-Basis erfasst (Firma Ohmeda, USA). Die Luftdruckmanschette mit eingebauten Lichtsensoren wurde auf dem linken Mittelfinger platziert. Das EKG wurde von drei Ableitorten (linkes Schlüsselbein, linkes Brustbein, rechtes Schlüsselbein) mit dem Programm Suempathy 100 (Suess Medizintechnik GmbH, Deutschland) registriert und ausgewertet. Die Abtastrate bei der EKG-Ableitung betrug 512 Hz. Die Artefaktkorrektur erfolgte visuell. Supraventrikuläre Extrasystolen (SVES) und ventrikuläre Extrasystolen (VES) mit kompensatorischer Pause wurden von der Auswertung ausgeschlossen. Die Herzratenvariabilität und die Baroreflexsensitivität wurden rechnerisch aus den kontinuierlich erhobenen R-R-Intervallen und dem BD nach dem Verfahren von Rüdiger et al. (1999) ermittelt. Die R-R-Intervalle und der BD wurden während der Aufgabeeausführung sowie in den 90-Sekunden Vor- und Nachruhe-Messungen erhoben. Dabei wurden Zeitfenster von 30 s gebildet, die sich jeweils um 5 s überlappten. Die anschließende Abtastung erfolgte 15 s verzögert, so dass jeweils der Wert in der Mitte des 30 s Fensters für die weitere Berechnung benutzt wurde (die gleitende Zeitfenstermethode). Die so generierten Werte wurden über jede Versuchsbedingung gemittelt und statistisch ausgewertet.

## 5.4 Versuchsablauf

Die Erhebungen fanden an 2 separaten Untersuchungstagen statt. Am ersten Untersuchungstag erfolgte eine Vitalitätsdiagnostik nach Meißner-Pöthig & Michalak (1997). An diesem Tag füllten die Pbn auch die Fragebögen zur Erfassung der Händigkeit, des emotionalen Zustandes, der beruflichen Tätigkeit, der physischen Aktivitäten, der körperlichen Beschwerden sowie Gesundheitsfragebögen aus (s. Anhang). Danach wurden die Teilnehmer mit den kognitiven Aufgaben des Experimentes vertraut gemacht. Die Aufgaben waren identisch mit denen des eigentlichen Experimentes. Das Training der Aufgaben wurde jedoch mit einer verringerten Anzahl von Trials durchgeführt. Die Bedeutung des FB wurde den Pbn wie oben beschrieben erläutert. Beide Altersgruppen wurden solange trainiert, bis sie die Fehlerrate unter 10 % konstant halten konnten. Dadurch wurden vergleichbare Ausgangsbedingungen in Bezug auf die Leistung in beiden Altersgruppen erreicht. Somit sollten die altersbezogenen Belastungseffekte im Hauptversuch frei von Übungseffekten abgeschätzt werden können. Im Anschluss daran wurden die Teilnehmer über die Ergebnisse ihrer Vitalitätsdiagnostik informiert (Tab. 5.5).

**Tab. 5.5** Schematische Darstellung des Versuchablaufs

• Tag 1	• Tag 2
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Begrüßung, allgemeine Information</li> <li>• Fragebögen</li> <li>• Allgemeine Instruktion</li> <li>• Vitalitätsdiagnostik</li> <li>• Switch-Training</li> <li>• N-Back-Training</li> <li>• Clock-Training</li> <li>• Besprechung der Ergebnisse der Vitalitätsdiagnostik</li> <li>• Zu-/Absage für den Hauptversuch am Tag 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Begrüßung, allgemeine Information</li> <li>• Pb-Vorbereitung – EEG, EKG</li> <li>• EZ – Fragebogen</li> <li>• Ruhe-BD-Messung brachial</li> <li>• Ruhe-EKG-BD-Messung kontinuierlich</li> <li>• Switch-Hauptversuch</li> <li>• Ruhe-EKG-BD-Messung kontinuierlich</li> <li>• Pause (15 Min)</li> <li>• N-Back-Hauptversuch</li> <li>• Ruhe-EKG-BD-Messung kontinuierlich</li> <li>• Clock-Hauptversuch</li> <li>• Ruhe-EKG-BD-Messung kontinuierlich</li> <li>• Ruhe-EKG-BD-Messung brachial</li> <li>• EZ – Fragebogen</li> </ul>

Der Hauptversuch fand an einem zweiten Termin, in der Regel zeitnah zum ersten Versuchstermin, statt. Lagen zwischen beiden Terminen mehr als 14 Tage, wurde das Training wiederholt. Die EEG-Experimente erfolgten mit Beginn zwischen 9 und 11 Uhr am Vormittag und erstreckten sich über einen Gesamtzeitraum von ca. 4 bis 5 Stunden. Die Pbn wurden gebeten, gut ausgeschlafen zum Versuch zu erscheinen und zu Hause ein übliches Frühstück zu sich zu nehmen. Anschließend wurden die Pbn für die Erfassung der physiologischen Parameter (EEG, EKG, BD) präpariert (Elektrodenapplikation, Anschluss an die Geräte). Während des Versuchs saßen die Pbn in einem abgeschirmten Raum mit konstanten Licht- und Temperaturverhältnissen. Der Abstand zwischen dem Computerbildschirm und dem Pbn war ca. 70 cm, so dass die Reize auf dem Bildschirm für den jeweiligen Pb gut erkennbar waren.

Der Kontakt zwischen VL und Pb erfolgte während der Untersuchung über eine Sprechanlage und einer Videokamera. (Abb. 5.5).



**Abb. 5.5** Versuchsaufbau

Vor Beginn des eigentlichen Versuches hatte jeder Proband eine Eigenzustandsskala (EZ-Fragebogen) auszufüllen. Außerdem wurde auch hier der brachiale Blutdruck erfasst, um die Reliabilität der Einmalmessung am ersten Untersuchungstag zu erhöhen und um Hypotoniker oder Hypertoniker von der Untersuchung auszuschließen (Tab. 5.6).

**Tab. 5.6** Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) von kardiovaskulären Parametern der Stichprobe (brachiale Blutdruckmessung vor dem Hauptversuch). T – T-Wert, p – Signifikanz

Variable	Jüngere	Ältere	T	p
Herzrate, Schl./Min	69.98 (12.56)	68.58 (9.68)	.65	.52
Diastolischer Blutdruck, mmHg	70.85 (8.94)	77.70 (8.97)	-4.00	.001
Systolischer Blutdruck, mmHg	118.67 (15.38)	128.82 (15.04)	-3.88	.001

Die Instruktion der Testaufgaben wurde dem Probanden auf dem Bildschirm präsentiert. Zur Bearbeitung der Aufgaben stand dem Teilnehmer eine Tastatur mit zwei Antworttasten zur Verfügung, die mit den Buchstaben L für links und R für rechts gekennzeichnet waren (in Beziehung zur Testinstruktion). Nach Beendigung des ersten Aufgabenblockes (der aus einer Switch- oder einer N-Back-Aufgabe bestehen konnte) erfolgte eine fünfzehnminütige Pause, während der sich der Proband frei bewegen, essen und trinken konnte. Koffeinhaltige Getränke waren dabei nicht gestattet. Nach der Pause wurde der Versuch entsprechend der ausbalancierten Abfolge fortgesetzt. Nach Beendigung des Versuches wurde noch einmal der brachiale Blutdruck gemessen.

## 5.5 Datenanalyse

Die Reaktionszeiten schneller als 180 ms galten als voreilige Antworten und wurden von der Auswertung ausgeschlossen. Auch die RZ und Antworten des ersten Durchgangs in jedem Block wurden nicht ausgewertet. Um die Altersunterschiede in den RZ-Ausgangswerten bei der Abschätzung der Alterseffekte bei komplexen Aufgaben berücksichtigen zu können, wurden zusätzlich die logarithmierten RZs ausgewertet, da logarithmierte Werte in den Ausgangswerten weniger sensitiv gegenüber Altersunterschieden sind (Kliegl et al., 1994). Weiterhin werden nur die Effekte auf die RZs diskutiert, bei denen sich die Interaktion „Alter x Bedingung“ sowohl bei den Rohdaten als auch bei den logarithmierten Daten als signifikant erwies. Die Auswertung der Herz-Kreislauf-Daten folgte derselben Logik, denn Ältere hatten höhere Ausgangswerte beim BD und niedrigere Ausgangswerte bei der HRV und der BRS als Jüngere. Damit wurden nur die signifikanten Effekte auf die logarithmierten Werte diskutiert. Die Daten wurden mit der Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung im Programm SPSS 17 ausgewertet. Die abhängigen Variablen waren folgende:

### Leistungsvariablen:

*Nback-Aufgabe:* RZ und lnRZ auf korrekte Antworten, Fehlerrate (Omissionen und falsche Alarme);

*Switch-Aufgabe:* RZ und lnRZ auf korrekte Antworten für die Wiederholungs- und Wechseldurchgänge, Fehlerrate in Wiederholungs- und Wechseldurchgängen;

*Clock-Aufgabe:* Trefferanzahl +/- 20°, Trefferanzahl vor 12-Uhr-Position, Trefferanzahl nach 12-Uhr-Position, Trefferanzahl 12-Uhr-Position, absolute Abweichung (in Grad), relative Abweichung (in Grad);

### Kardiovaskuläre Variablen:

lnBRS, lnHF-HRV, lnLF-HRV, lnHR, lnSBD, lnDBD;

### EKP-Variablen:

- die Amplituden und Latenzen der N1, P2, N2, P3, FRN, FRP auf korrekte Antworten;
- die Amplituden und Latenzen der Ne, FRN, FRP auf falsche Antworten;
- die Amplituden und Latenzen der FRN, FRP auf korrekte Antworten;
- die CNV-Amplitude auf korrekte Antworten getrennt für die Ableitungen, die kontra und ipsilateral zur ausführenden Hand lagen.

### ANOVA-Designs

Die ANOVAs der abhängigen Variablen wurden mit „Altersgruppe“ (Jüngere, Ältere) und „Arbeitsanforderung“ (routiniert, flexibel) als Between-Subject-Faktoren durchgeführt.

Die Within-Subject-Faktoren waren folgende:

*N-Back-Aufgabe:* „Block“ (0-Back, 2-Back, 2-Back mit FB);

*Switch-Aufgabe, globale Wechselkosten, nur für die Wiederholungsdurchgänge:* „Block“ (konstant, regulärer Wechsel mit Hinweis, irregulärer Wechsel mit Hinweis, regulärer Wechsel ohne Hinweis).

*Switch-Aufgabe, lokale Wechselkosten:* „Block“ (regulärer Wechsel mit Hinweis, irregulärer Wechsel mit Hinweis, regulärer Wechsel ohne Hinweis) und Durchgang (Wiederholung, Wechsel).

Für die EKP-Daten wurde der Within-Subject-Faktor „Elektrode“ je nach EKP-Komponente (Tab. 5.4) zusätzlich eingeführt.

Für die Herz-Kreislauf-Daten wurden die Vorruhe- und Nachruhe-Bedingungen in den Within-Subject-Faktor „Block“ zusätzlich eingeführt.

Die Aufschlüsselung von Haupt- und Interaktionseffekten erfolgte mit den T-Tests für unabhängige und gepaarte Stichproben. Die Freiheitsgrade wurden ggf. nach Huynh-Feldt angepasst.

Aufgrund von Artefakten wurde ein Teil der Probanden aus der Auswertung ausgeschlossen. Je nach Aufgabe wurden folgende Datensätze ausgewertet und im Ergebnisteil präsentiert: für die N-Back-Aufgabe: 51 Jüngere, 45 Ältere; für die Switch-Aufgabe: 49 Jüngere, 45 Ältere; für die Clock-Aufgabe: 53 Jüngere, 49 Ältere.

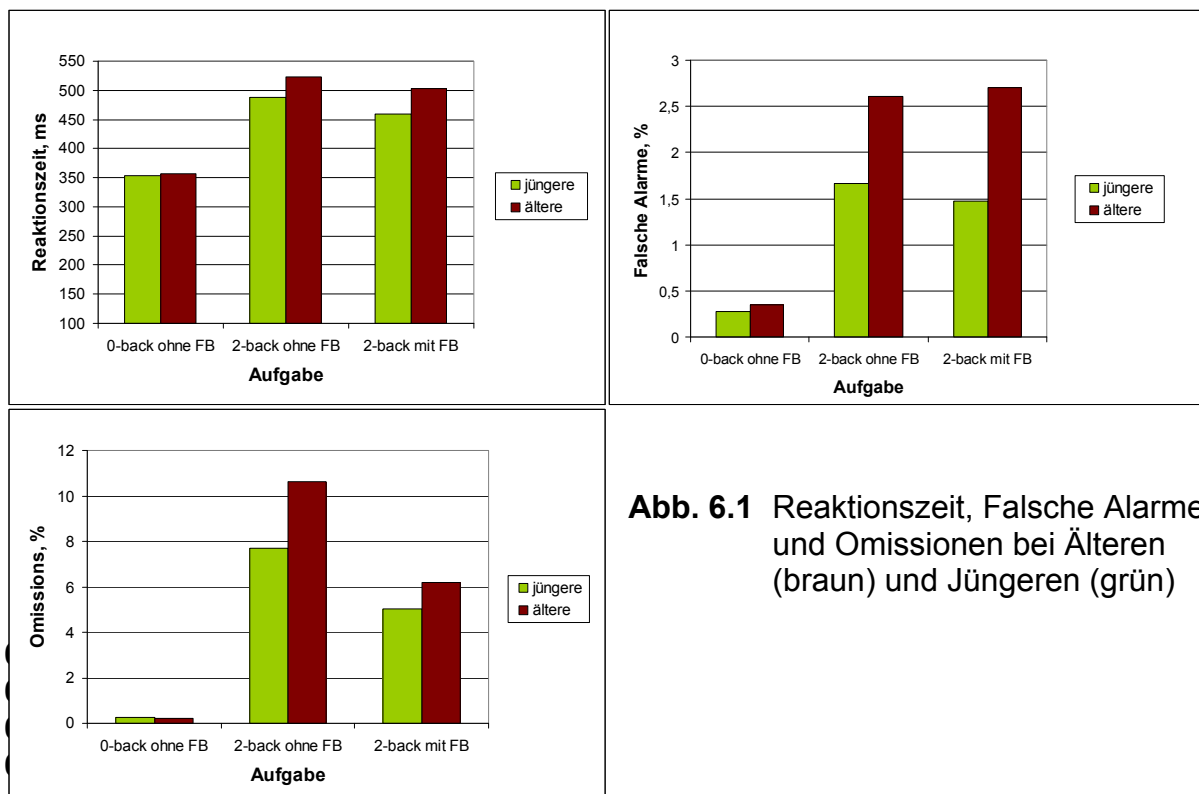
## 6 Ergebnisse

### 6.1 N-Back-Aufgabe

#### 6.1.1 Leistungsdaten

Die Mittelwerte und Standardabweichungen von Leistungsvariablen sind im Anhang 2 dargestellt.

Die Reaktionszeit und Fehlerrate stiegen mit der AG-Belastung, was sich in einer längeren RZ und höherer Fehlerrate unter 2-Back im Vergleich zum 0-Back niederschlug; das FB führte zur kürzeren RZ und weniger Omissionen unter 2-Back mit FB im Vergleich zum 2-Back ohne FB („Block“,  $\ln RZ: F(2, 184) = 295.67, p < .001, \eta = .77$ ; Falsche Alarme:  $F(2, 184) = 92.23, p < .001, \eta = .49$ ; Omissionen:  $F(2, 184) = 98.72, p < .001, \eta = .71$ ). Das FB zeigte keinen Effekt auf den Prozentwert der Falschen Alarme. Ältere waren langsamer und machten mehr Fehler als Jüngere („Altersgruppe“,  $\ln RZ: F(1, 92) = 8.02, p < .006, \eta = .08$ ; Falsche Alarme:  $F(1, 92) = 12.88, p < .001, \eta = .12$ ; Omissionen:  $F(1, 92) = 4.06, p < .05, \eta = .04$ ). Diese Effekte waren jedoch nur unter AG-Belastung (2-Back ohne FB und 2-Back mit FB) zu beobachten, während es ohne AG-Belastung (0-Back) keine Leistungsunterschiede zwischen den Altersgruppen gab („Altersgruppe“ \* „Block“,  $\ln RZ: F(2, 184) = 5.38, p < .01, \eta = .05$ ; Falsche Alarme:  $F(2, 184) = 7.79, p < .001, \eta = .08$ ). Der FB-Effekt wirkte sich besonders stark auf die Omissionen bei Älteren aus, so dass die Altersunterschiede nach diesem Parameter unter 2-Back mit FB ausgeglichen werden konnten (Abb. 6.1). Trotzdem waren Ältere auch in der FB-Bedingung langsamer und zeigten mehr falsche Alarme als Jüngere. Es gab weder Haupteffekte der Arbeitsanforderungen noch deren Interaktionen mit anderen unabhängigen Variablen.



**Abb. 6.1** Reaktionszeit, Falsche Alarme und Omissionen bei Älteren (braun) und Jüngeren (grün)

## 6.1.2 Ereigniskorrelierte Potentiale

### N1-Komponente

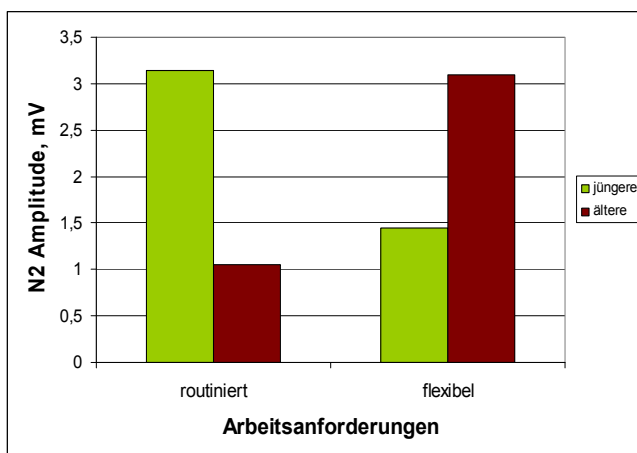
Die Amplitude der N1-Komponente an Oz (Abb. 6.5) war bei Älteren (-7.27  $\mu\text{V}$ ) größer als bei Jüngeren (-4.79  $\mu\text{V}$ ), „Altersgruppe“:  $F(1,92)=10.01$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.10$ ). Das FB und die Arbeitsanforderungen beeinflussten die N1 nicht.

### P2-Komponente

Die Amplitude der im frontalen Bereich (Abb. 6.5) am stärksten ausgeprägten P2-Komponente („Elektrode“:  $F(3,276)=44.56$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.33$ ) war bei Älteren (7.99  $\mu\text{V}$ ) in diesem Bereich größer als bei Jüngeren (6.50  $\mu\text{V}$ ), „Altersgruppe“ \* „Elektrode“:  $F(3,276)=9.33$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.09$ ). Das FB und Aufgabenanforderung hatten keine Effekte auf die P2-Komponente.

### N2-Komponente

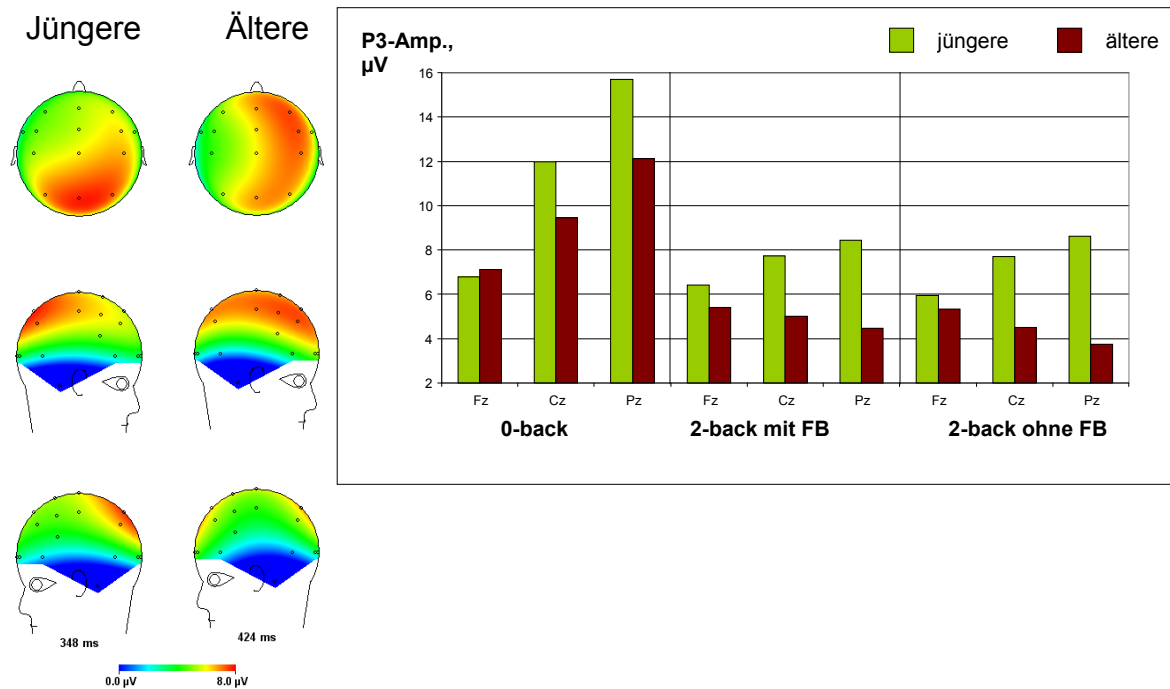
Die N2-Komponente mit der Gipfellatenz von ca. 250 ms (Abb. 6.5) war in frontozentralen Bereichen am stärksten ausgeprägt (Elektrode:  $F(3,276)=4.07$ ,  $p<.02$ ,  $\eta=.04$ ). Diese Komponente hatte bei Älteren (265 ms) eine spätere Latenz als bei Jüngeren (242 ms), „Altersgruppe“:  $F(1,92)=25.76$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.22$ ). Durch Überlagerung mit andauernden Positivierungen, die bei ca. 200 ms nach dem Reizansatz begannen, verschob sich die N2 in positive Richtung. Als Tendenz zeigte sich eine erhöhte (d. h. weniger positive) N2-Komponente bei „routinierten“ Älteren; dagegen war die N2 bei „flexiblen“ Älteren verringert (d. h. mehr positiv), „Altersgruppe \* Arbeitsanforderung“:  $F(1,92)= 3.63$ ,  $p<.06$ ,  $\eta=.04$ ), Abb. 6.2.



**Abb. 6.2** Altersbezogene Vergrößerung der N2 bei Pbn mit „routinierten“ Arbeitsanforderungen und altersbezogene Verkleinerung der N2 bei „flexiblen“ Arbeitsanforderungen

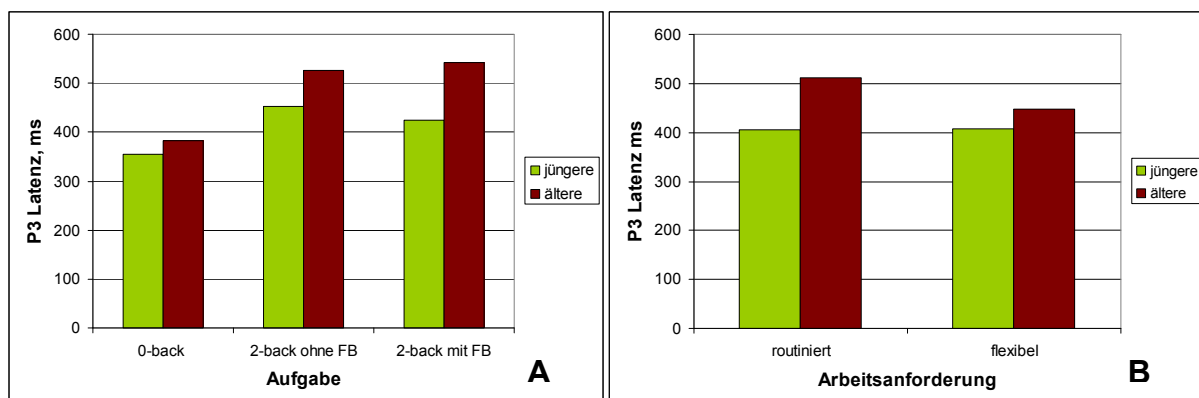
### P3 Komponente

In der 0-Back-Aufgabe zeigten beide Altersgruppen eine positive Komponente mit dem Maximum im parietalen Bereich und der Gipfellatenz von ca. 380 ms („Elektrode“:  $F(3,276)=40.18$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.31$ ). Die P3-Amplitude war bei Älteren (8.27  $\mu\text{V}$ ) kleiner als bei Jüngeren (11.19  $\mu\text{V}$ ), „Altersgruppe“:  $F(1,92)=11.13$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.14$ . Die Interaktion „Altersgruppe \* Elektrode“ war darauf zurückzuführen, dass Ältere eine kleinere P3 an Cz und Pz aufwiesen als Jüngere, während die Amplitude an Fz gleich war ( $F(3,276)=13.22$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.12$ ). Diese altersassoziierte P3-Frontalisierung war insbesondere unter AG-Belastung zu sehen (Abb. 6.3).



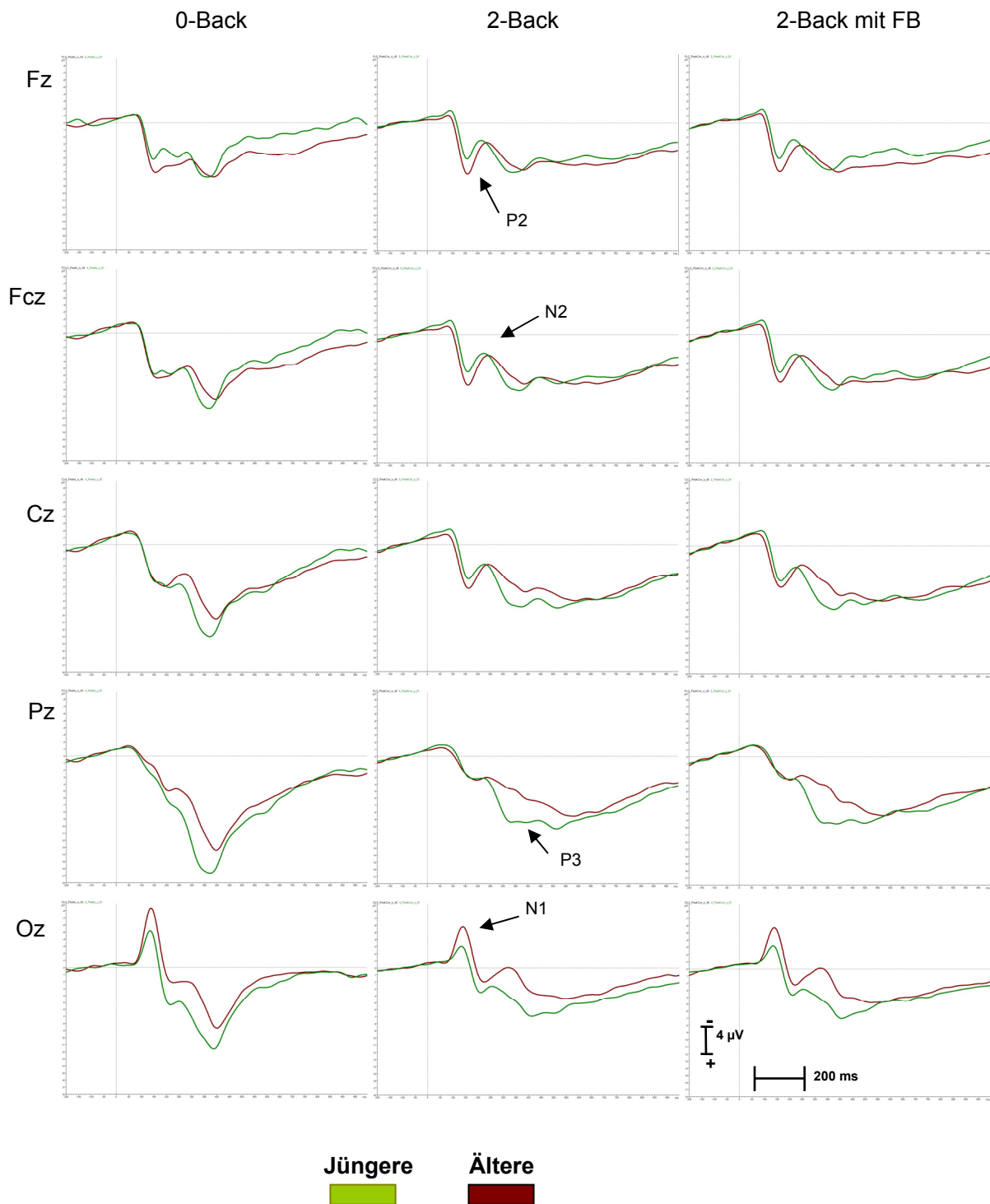
**Abb. 6.3** Die altersassoziierte P3-Frontalisierung unter AG-Belastung. Ohne Belastung (0-Back) ist die P3 in beiden Gruppen an Pz größer als an Fz. Unter AG-Belastung (2-Back) ist die gleiche P3-Amplitude an Fz und Pz bei Älteren zu sehen. Links – die P3-Amplitude unter AG-Belastung verteilt über die Kopfoberfläche; das P3-Maximum (rot markiert) ist bei Älteren im Vergleich zu Jüngeren in die frontalen Bereiche verschoben.

Die P3b-Latenz an Pz war bei Jüngeren (410 ms) kürzer als bei Älteren (483 ms), „Altersgruppe“:  $F(1,92)=10.97$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.11$ ). Die AG-Belastung führte zur Verlängerung der P3b-Latenz in beiden Altersgruppen; bei Jüngeren wurde jedoch eine Verkürzung der P3b-Latenz in der 2-Back-Aufgabe mit FB im Vergleich zur 2-Back-Aufgabe ohne FB beobachtet, während die P3-Latenz bei Älteren vom FB nicht beeinflusst wurde („Altersgruppe \* Block“:  $F(2,184)=8.92$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.09$ ) (Abb. 6.4 A). Bei den „routinierten“ Pbn verzögerte sich die P3b-Latenz mit zunehmendem Alter, während es keinen Alterseffekt bei den „flexiblen“ Pbn gab („Altersgruppe \* Arbeitsanforderung“:  $F(1,92)=5.02$ ,  $p<.03$ ,  $\eta=.05$ ; Abb. 6.4 B).



**Abb. 6.4** A: Die P3b-Latenz bei Älteren (braun) und Jüngeren (grün) in drei Versuchsbedingungen. B: Die altersassoziierte P3b-Verzögerung bei den Pbn mit „routinierten“ vs. „flexiblen“ Arbeitsanforderungen

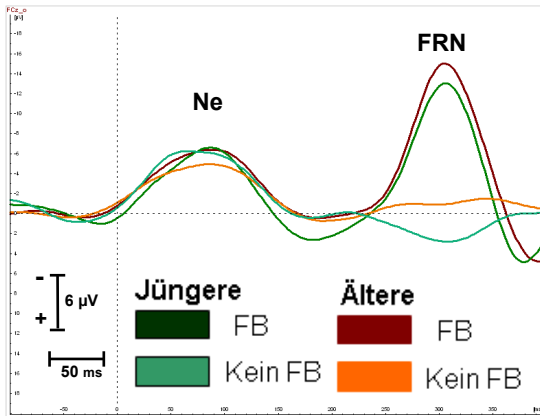




**Abb. 6.5** Ereigniskorrelierte Potentiale der einzelnen Aufgaben gemessen an den zentralen Elektroden bei Jüngeren (grün) und Älteren (braun). Vertikale Linie – Reizset

### Ne-Komponente<sup>2</sup>

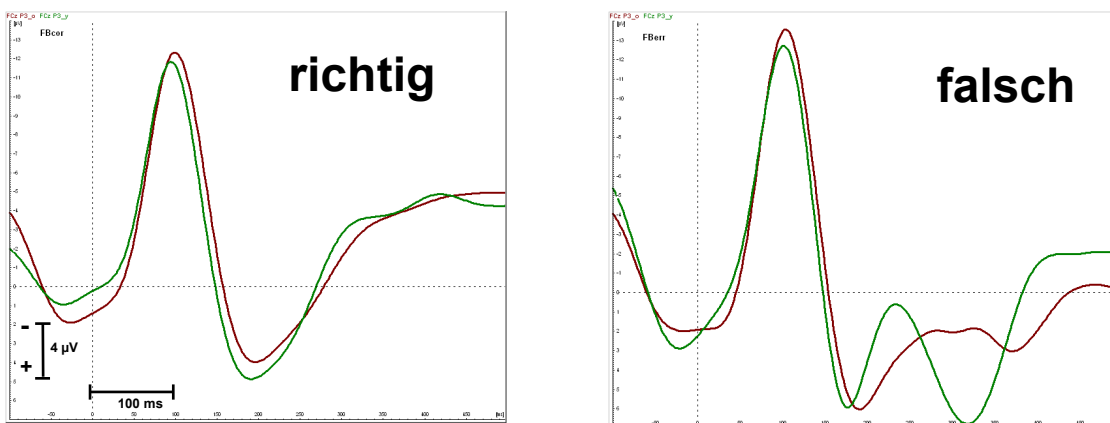
Die Ne-Komponente stellte eine fronto-zentrale Negativierung mit der Gipfellatenz von ca. 100 ms nach der Reaktion dar und zeigte keine Effekte von Alter, Feedback oder Arbeitsanforderung (Abb. 6.6). Auf der Abb. 6.6 ist auch eine feedbackbezogene Negativierung (FRN) zu sehen, auf die unten näher eingegangen wird.



**Abb. 6.6** Die Ne- und FRN-Komponenten bei Älteren (braun) und Jüngeren (grün). Die Negativität geht nach oben. Vertikale Linie – Reaktionsonset

### Feedbackbezogene Komponenten: FRN und FRP<sup>2</sup>

Die EKPs nach akustischem FB bestanden aus „feedback-related negativity, FRN“ und „feedback-related positivity, FRP“ (Abb. 6.7). Die Amplituden von feedbackbezogenen Komponenten zeigten keine Alterseffekte, wenn das FB eine richtige Antwort signalisierte. Dagegen trat nach falschen Antworten die FRP bei Älteren verzögert auf ( $F(1,92)=17.15$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.19$ ). Außerdem zeigte sich in dieser Bedingung bei Jüngeren eine zusätzliche Positivierung bei ca. 300 ms nach dem Reizonset.

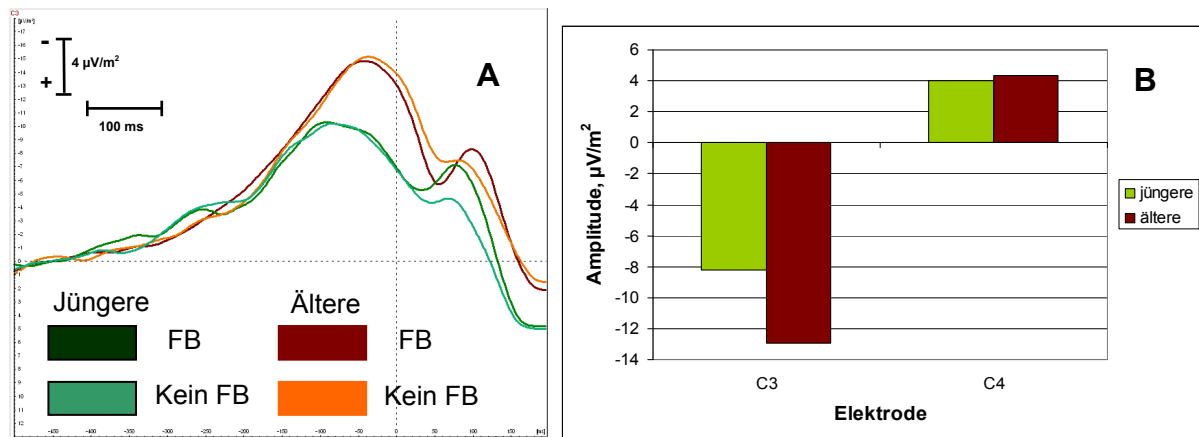


**Abb. 6.7** Die Verzögerung der FRP-Komponente bei Älteren (braun) im Vergleich zu den Jüngeren (grün) nach dem FB, das die falsche Antwort signalisierte (rechts). Die Negativität geht nach oben. Vertikale Linie – Feedbackonset

<sup>2</sup> Die ANOVA wurde für die FCz-Elektrode und nur für die Blöcke mit AG-Belastung durchgeführt

## CNV

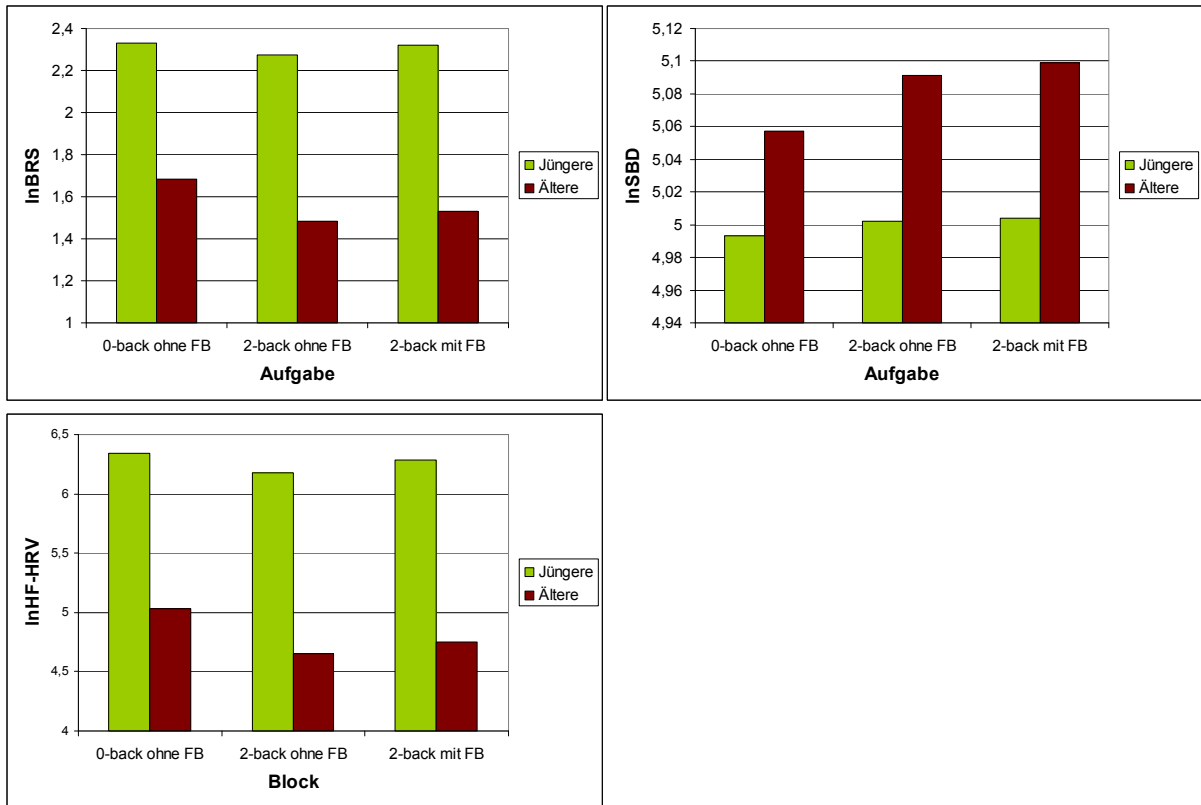
Die reaktionsbezogenen EKPs zeigten eine typische langsame zentral ausgeprägte Negativierung, die ihr Maximum kurz vor der Antwort erreichte. Die CNV war an der Elektrode größer, die kontralateral zur ausführenden Hand lag (an C3 im Vergleich zu der C4-Elektrode). Ältere zeigten dabei an C3 eine größere CNV als Jüngere (Altersgruppe \* Elektrode“:  $F(1,92)=10.19$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.10$  (Abb. 6.8).



**Abb. 6.8** A: Die Alters- und Feedbackeffekte an der kontralateralen Ableitung (C3). Vertikale Linie – Reaktionsonset. B: Die Alterseffekte auf den kontra- und ipsilateralen Ableitungen. Die CNV ist nach CSD-Methode ausgewertet worden (Perrin et al., 1984)

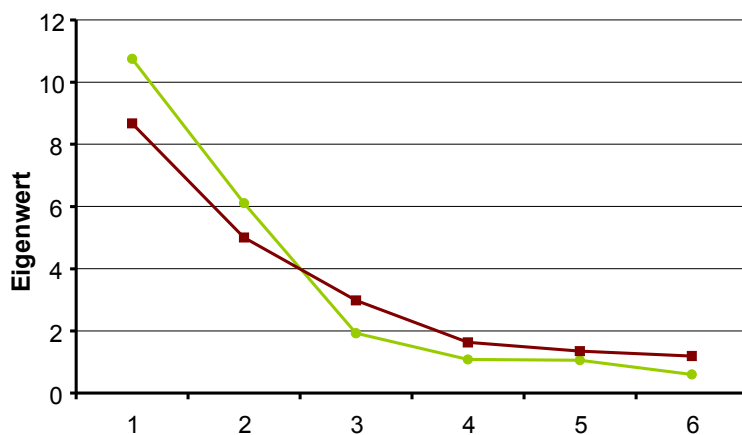
### 6.1.3 Kardiovaskuläre Parameter

Ältere wiesen eine generell höhere sympathische und niedrigere parasympathische Aktivität als Jüngere auf (Abb. 6.9), d. h. einen höheren SBD ( $F(1,92)=8.59$ ,  $p<.004$ ,  $\eta=.08$ ), eine niedrigere BRS ( $F(1,92)=79.93$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.46$ ), und einen niedrigeren HF-HRV-Anteil ( $F(1,92)=43.56$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.31$ ). Es gab keine Altersunterschiede bei der HR und den DBD. Außerdem zeigten Ältere und Jüngere unterschiedliche kardiovaskuläre Reaktionen in Bezug auf die AG-Belastung sowie unterschiedliche Reaktionen auf die Einführung des FB, was sich in der Interaktion „Altersgruppe \* Block“ zeigte. Bei den Jüngeren bewirkte die AG-Belastung (2-Back ohne FB vs. 0-Back-Aufgabe) eine Verringerung der BRS ( $F(2,184)=2.89$ ,  $p<.04$ ,  $\eta=.03$ ) und HF-HRV ( $F(2,184)=3.05$ ,  $p<.03$ ,  $\eta=.03$ ), die sich aber mit der Einführung des FB zurückstellen ließ, während es bei Älteren keine Rückstellung der BRS und HF-HRV durch das FB gab. Bei Jüngeren hatte die AG-Belastung keinen Effekt auf den systolischen BD, während bei Älteren eine Zunahme dieses Parameters unter AG-Belastung ohne anschließende Verminderung bzw. Rückstellung durch das FB zu verzeichnen war ( $F(2,184)=5.08$ ,  $p<.002$ ,  $\eta=.05$ ).



**Abb. 6.9** Baroreflexsensitivität (InBRS), Systolischer Blutdruck (InSBD) und Herzratenvariabilität (InHF-HRV) für Ältere (braun) und Jüngere (grün) in drei Versuchsbedingungen

Um die kardiovaskulären Variablen kompakter darstellen zu können und deren Zusammenhang mit sympathischen und parasympathischen Systemen zu objektivieren, wurden die Daten für jede Altersgruppe mit der Faktorenanalyse (PCA-Verfahren) ausgewertet. Die Scree-Plots wiesen auf eine zweifaktorielle Lösung hin (Abb. 6.10).



**Abb. 6.10** Die Scree-Plots der Eigenwerte von Jüngeren (grün) und Älteren (braun) nach der Faktorenanalyse der Herz-Kreislauf-Parameter

Die Faktorladungen bei der zweifaktoriellen Lösung zeigten, dass der systolische und diastolische Blutdruck von einem gemeinsamen Faktor beeinflusst worden sind, der als „sympathisch“ gekennzeichnet werden kann.

Ein anderer Faktor, der als „parasympathisch“ charakterisiert werden kann, beeinflusste in beiden Gruppen die HRV und BRS. Der bemerkenswerte Unterschied bestand darin, dass die HR bei Jüngeren vom eher „parasympathischen“ und bei Älteren vom „sympathischen“ Faktor beeinflusst wurde (Tab. 6.1).

**Tab. 6.1** Faktorladungen für log-transformierte Variablen bei Jüngeren und Älteren nach der Oblimin-Rotation und Kaiser-Normalisierung, Delta = 0.  
Abkürzungen: SBD – systolischer Blutdruck, DBD – diastolischer Blutdruck, LF-HRV, HF-HRV, BRS - Baroreflex Sensitivität, HR - Herzrate.  
Die Faktorladungen < .40 sind ausgeblendet

Faktor	Jüngere		Ältere	
	1	2	1	2
lnSBD –Vorruhe		.758		.786
lnSBD – 0-Back		.882		.830
lnSBD – 2-Back		.856		.764
lnSBD – Nachruhe		.856		.830
lnDBD – Vorruhe		.886		.636
lnDBD – 0-Back		.875		.789
lnDBD – 2-Back		.870		.782
lnDBD – Nachruhe		.791		.702
lnBRS – Vorruhe	.811		.491	
lnBRS – 0-Back	.900		.826	
lnBRS – 2-Back	.880		.829	
lnBRS – Nachruhe	.771		.611	
lnLF-HRV – Vorruhe	.700		.546	
lnLF-HRV – 0-Back	.773		.747	
lnLF-HRV – 2-Back	.795		.882	
lnLF-HRV – Nachruhe	.662		.733	
lnHF-HRV – Vorruhe	.903		.791	
lnHF-HRV – 0-Back	.935		.846	
lnHF-HRV – 2-Back	.919		.910	
lnHF-HRV –Nachruhe	.855		.771	
lnHR – Vorruhe	-.653			.541
lnHR – 0-Back	-.747			.510
lnHR – 2-Back	-.711			.493
lnHR – Nachruhe	-.680			.472

#### **6.1.4 Korrelation zwischen den ereigniskorrelierten Potentialen und kardiovaskulären Parametern**

Die Korrelation zwischen der P3 und den kardiovaskulären Parametern ist in der Tab. 6.2 dargestellt.

Die BRS korrelierte sowohl unter niedriger (0-Back) als auch unter hoher AG-Belastung (2-Back) positiv mit der P3-Amplitude an Pz und Cz, während die stärkste Korrelation unter AG-Belastung mit FB beobachtet wurde. Außerdem gab es eine negative Korrelation zwischen BRS und Fz/Pz-Ratio unter AG-Belastung mit FB.

Der SBD korrelierte unter AG-Belastung negativ mit der P3-Amplitude an Pz. Der DBD korrelierte nur unter AG-Belastung mit FB negativ mit der P3-Amplitude an Pz. Die Analyse für jede Altersgruppe zeigte, dass die negative Korrelation zwischen DBD und P3-Amplitude an Pz in beiden AG-Belastungsbedingungen nur bei den Älteren, nicht aber bei den Jüngeren zu sehen war.

Die LF-HRV korrelierte nur unter AG-Belastung mit FB positiv mit der P3-Amplitude und negativ mit Fz/Pz-Ratio. Außerdem ergab sich in beiden AG-Belastungsbedingungen für die Gruppe der Älteren eine negative Korrelation zwischen LF-HRV und P3-Amplitude im frontalen Bereich.

Die HF-HRV zeigte das gleiche Korrelationsprofil wie bei der BRS. Sie korrelierte sowohl in Ruhe als auch unter AG-Belastung positiv mit der P3-Amplitude an Pz und Cz, wobei die stärkste Korrelation unter AG-Belastung mit FB beobachtet wurde. Außerdem gab es unter AG-Belastung mit FB eine negative Korrelation zwischen der HF-HRV und der Fz/Pz-Ratio.

Es gab keine signifikante Korrelation zwischen der HR und P3-Amplitude.

**Tab. 6.2** Korrelation zwischen den EKP- und HK-Variablen für die gemischte Stichprobe. r – Korrelationskoeffizient, p – Signifikanz, SBD – systolischer Blutdruck, DBD – diastolischer Blutdruck, BRS – Baroreflexsensitivität, HF-HRV, LF-HRV – Herzratenvariabilität im Hoch- bzw. Niedrigfrequenzband

	BRS	HF-HRV	LF-HRV	HR	SBD	DBD	LF-HRV Ältere	DBD, Ältere
	r / p	r / p	r / p	r / p	r / p	r / p	r / p	r / p
<b>P3-Amp. an Fz</b>								
0-Back	/	/	/	/	/	/	/	/
2-Back	/	/	/	/	/	/	-.33 / .03	/
2-Back mit FB	/	/	/	/	/	/	-.36 / .02	/
<b>P3-Amp. an Cz</b>								
0-Back	.26 / .01	.20 / .05	/	/	/	/	/	/
2-Back	.21 / .04	.20 / .05	/	/	/	/	/	/
2-Back mit FB	.22 / .03	/	/	/	/	/	/	/
<b>P3-Amp. an Pz</b>								
0-Back	.32 / .00	.22 / .04	/	/	/	/	/	/
2-Back	.28 / .01	.25 / .02	/	/	-.22 / .03	/	/	-.32 / .04
2-Back mit FB	.38 / .00	.29 / .02	.27 / .01	/	-.24 / .02	/	/	-.30 / .05
<b>P3-Amp. Fz/ Pz-Ratio</b>								
0-Back	/	/	/	/	/	/	/	/
2-Back	/	/	/	/	/	/	/	/
2-Back mit FB	-.31 / .00	-.23 / .03	-.24 / .02	/	/	/	/	/

## 6.1.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ältere Erwerbstätige zeigten im Vergleich zu jüngeren Erwerbstätigen Leistungseinbußen unter AG-Belastung, die mit einer Reihe von Effekten auf der ZNS- und HK-Ebene einhergingen. Dazu gehörten eine verringerte, verspätete und „frontalisierte“ P3, eine erhöhte N1 und P2, eine verzögerte N2 und FRP sowie eine vergrößerte CNV.

Das FB führte zur Verkürzung der FRP-Latenz bei Jüngeren. Auf der Leistungsebene bewirkte das FB eine Reduktion der RZ und Omissionen bei Älteren. Das FB konnte jedoch die Altersunterschiede in der RZ und den falschen Alarmen nicht ausgleichen. Auf der HK-Ebene zeigten Ältere unter AG-Belastung einen erhöhten SBD, eine verminderte HRV sowie keinen kardiovaskulären Erholungseffekt, als das FB dargeboten wurde. Ältere wiesen eine generell höhere sympathische und niedrigere parasympathische Aktivität als Jüngere auf. Die HR bei Jüngeren ist mit dem „parasymphatischen“, bei Älteren mit dem „sympathischen“ Faktor verbunden.

Ältere Erwerbstätige mit flexiblen Arbeitsanforderungen zeigten im Vergleich zu den Älteren mit routinierten Arbeitsanforderungen eine erhöhte P2-Amplitude, eine verminderte N2-Amplitude, eine kürzere P3-Latenz sowie eine niedrigere HF-HRV. Bei jüngeren Erwerbstätigen hatten die Arbeitsanforderungen keinen Einfluss auf die Aktivität des ZNS- und ANS unter AG-Belastung.

Die Korrelationen zwischen EKP- und HK-Parametern verstärkten sich mit zunehmender AG-Belastung. Unter AG-Belastung korrelierte die P3-Amplitude negativ mit der sympathischen Aktivität und positiv mit der vagalen Aktivität. Dieser Zusammenhang war bei Älteren stärker als bei Jüngeren ausgeprägt.

## 6.2 Switch-Aufgabe

### 6.2.1 Leistungsdaten

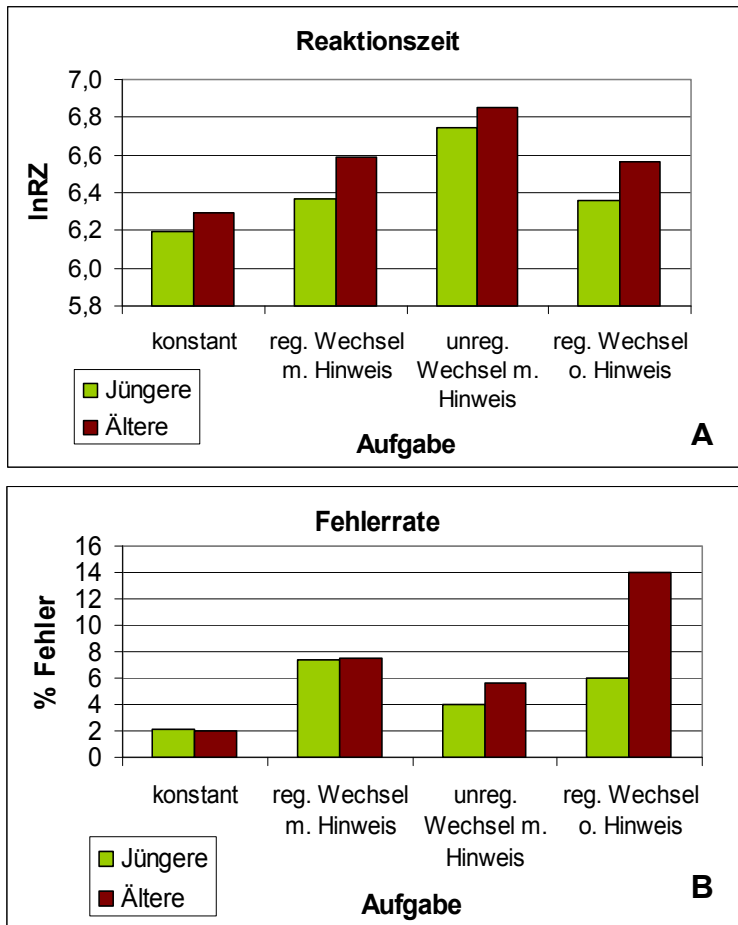
Die Mittelwerte und Standardabweichungen von Leistungsvariablen sind im Anhang 3 dargestellt.

#### Globale Wechselkosten

Die RZ war in den gemischten Blöcken länger und die Fehlerrate höher als im konstanten Block. In den gemischten Blöcken zeigte sich eine längere RZ in den RWH- und RW-Blöcken im Vergleich zum IWH-Block; die Fehlerrate war am niedrigsten im RWH-Block, höher im IWH-Block und am höchsten im RW-Block („Block“, RZ:  $F(3,276)=534.26$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.85$ ; Fehler:  $F(3,276)=40.22$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.30$ ). Innerhalb aller Blöcke waren Ältere bei den Wiederholungsdurchgängen langsamer und machten mehr Fehler als Jüngere („Altersgruppe“, RZ:  $F(1,92)=30.99$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.25$ , Fehler:  $F(1,92)=11.64$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.11$ ). Es ergab sich auch eine Interaktion „Altersgruppe \* Block“ auf die RZ ( $F(3,276)=10.64$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.10$ ), die auf eine größere Verlangsamung bei Älteren (d. h. höhere globale Wechselkosten) in beiden Blöcken mit regulärem Wechsel im Vergleich zum Block mit irregulärem Wechsel zurückzuführen ist (Abb. 6.11, 6.12). Die Interaktion „Altersgruppe \* Block“ auf die Fehlerrate ( $F(3,276)=13.60$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.13$ ) wies darauf hin, dass sich die Genauigkeit in fast allen Bedingungen in beiden Altersgruppen nicht unterschied mit Ausnahme des Blocks mit regulärem Wechsel ohne Hinweis, in dem die Pbn die Regel und deren Abfolge im AG behalten mussten. Dort hatten Ältere Probleme, die Abfolge vom AG



abzurufen, und sind öfter aus dem Takt geraten, was eine höhere Fehlerrate zur Folge hatte. Die globalen Wechselkosten der Fehlerrate bei Älteren waren beim regulären Wechsel mit Hinweis und ohne Hinweis größer als bei Jüngeren, während es keinen Altersunterschied im Block mit irregulärem Wechsel gab (Abb. 6.12).

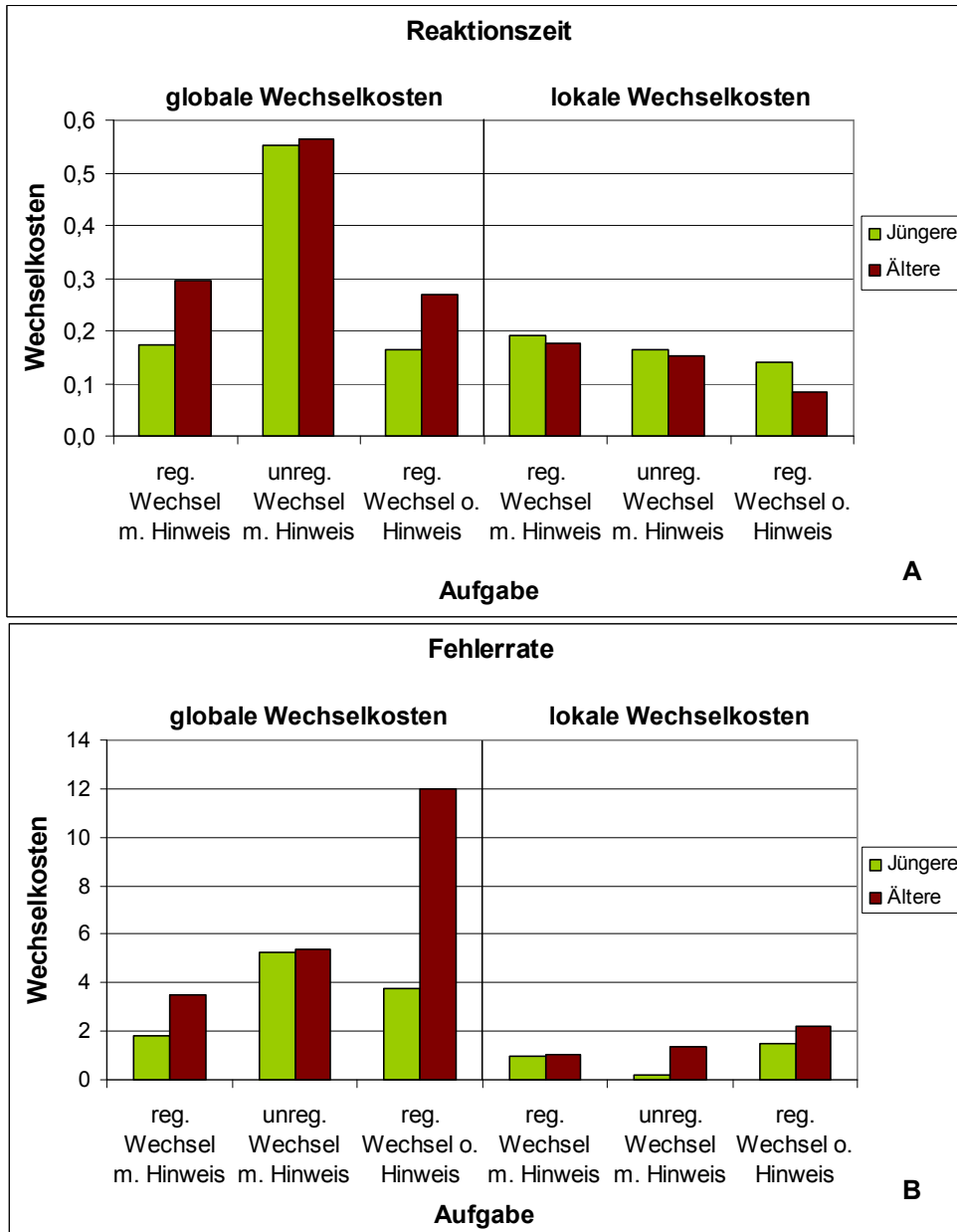


**Abb. 6.11** Die Reaktionszeit (A) und Fehlerrate (B) bei Älteren (braun) und Jüngeren (grün) in unterschiedlichen Versuchsbedingungen

### Lokale Wechselkosten

Es zeigte sich eine längere RZ und höhere Fehlerrate bei den Wechseldurchgängen im Vergleich zu den Wiederholungsdurchgängen („Durchgang“, RZ:  $F(1,92)= 303.59$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.77$ ; Fehlerrate:  $F(1,92)= 16.55$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.15$ ). Es gab auch Altersunterschiede in den lokalen Wechselkosten der RZ, die blockabhängig waren: es zeigten sich niedrigere lokale Wechselkosten bei Älteren im Vergleich zu den Jüngeren im regulären Block ohne Hinweis, während es in beiden Blöcken mit Hinweis keine Altersunterschiede in den lokalen Wechselkosten der RZ gab („Altersgruppe \* Durchgang \* Block“:  $F(2,184)= 3.61$ ,  $p<.03$ ,  $\eta=.04$ ). Beide Altersgruppen hatten die gleichen lokalen Wechselkosten der Fehlerrate (die Interaktionen „Altersgruppe \* Durchgang“ sowie „Altersgruppe“ \* „Durchgang“ \* „Block“ waren nicht signifikant, Abb. 6.13). Die Interaktion „Altersgruppe \* Block“ auf die Fehlerrate ( $F(3,276)=12.27$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.12$ ) wies darauf hin, dass Ältere eine höhere Fehlerrate als Jüngere nur im regulären Block ohne Hinweis hatten, während es keine Altersunterschiede in zwei anderen gemischten Blöcken gab (Abb. 6.12B). Es ist anzumerken, dass die

Bedingung mit irregulärem Wechsel die schwierigste für beide Altersgruppen war, denn der Aufgabewechsel war nicht vorhersehbar, was die Vorbereitung zum Aufgabewechsel unmöglich machte. In dieser Bedingung ergaben sich weder in der Fehlerrate noch in den globalen und lokalen Wechselkosten der Fehlerrate oder in den globalen und lokalen Wechselkosten der RZ altersabhängige Unterschiede.



**Abb. 6.12** Die globalen und lokalen Wechselkosten in der InRZ (A) und % Fehler (B) bei Älteren (braun) und Jüngeren (grün) in unterschiedlichen Versuchsbedingungen

## 6.2.2 Ereigniskorrelierte Potentiale

### N1-Komponente

*Globale Wechselkosten.* Die Amplitude der N1-Komponente mit dem Maximum im okzipitalen Bereich (Abb. 6.17) war bei Älteren größer als bei Jüngeren (Ältere:  $-6.27 \mu\text{V}$ ; Jüngere:  $-4.24 \mu\text{V}$ ; „Altersgruppe“:  $F(1,94)= 6.48$ ,  $p<.01$ ,  $\eta=.07$ ). Die Interaktion „Block“ \* „Altersgruppe“ ( $F(3,282)= 3.15$ ,  $p<.04$ ,  $\eta=.04$ ) zeigte eine größere N1-Amplitude bei Älteren als bei Jüngeren in allen Blöcken außer im IWH-Block. Außerdem verringerte sich die N1-Amplitude bei Älteren in RWH- ( $-6.0 \mu\text{V}$ ) und IWH-Blöcken ( $-5.53 \mu\text{V}$ ) im Vergleich zum konstanten Block ( $-7.0 \mu\text{V}$ ), während bei Jüngeren keine Unterschiede zwischen den Blöcken zu beobachten war (konstant:  $-3.94 \mu\text{V}$ ; RWH:  $-4.39 \mu\text{V}$ ; IWH:  $-4.09 \mu\text{V}$ ; RW:  $-4.50 \mu\text{V}$ ). Die N1-Latenz verlängerte sich in beiden Blöcken mit Hinweis (RWH: 137 ms; IWH: 139 ms) im Vergleich zum konstanten Block (128 ms), während es keine Unterschiede zwischen dem konstanten Block (128 ms) und dem gemischten Block ohne Hinweis (133 ms) gab („Block“:  $F(3,283)= 5.04$ ,  $p<.003$ ,  $\eta=.05$ ).

*Lokale Wechselkosten.* In den gemischten Blöcken war die N1-Amplitude bei Älteren größer als bei Jüngeren (Ältere:  $-5.95 \mu\text{V}$ ; Jüngere:  $-4.33 \mu\text{V}$ ; „Altersgruppe“:  $F(1,94)= 4.32$ ,  $p<.04$ ,  $\eta=.04$ ). Die N1-Latenz verlängerte sich im IWH-Block (139 ms) im Vergleich zum RW-Block (133 ms), „Block“:  $F(3,188)= 4.24$ ,  $p<.02$ ,  $\eta=.04$ ).

### P2-Komponente

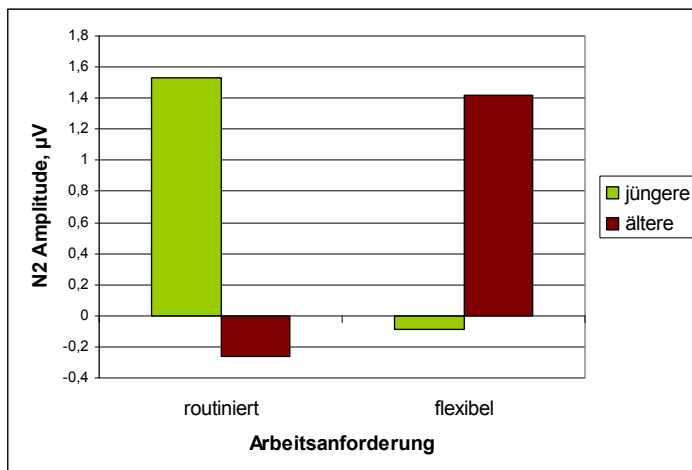
*Globale Wechselkosten.* Die P2-Komponente war in frontalen Bereichen am stärksten ausgeprägt und an Fz ( $8.0 \mu\text{V}$ ) und FCz ( $8.0 \mu\text{V}$ ) größer als an Cz ( $7.21 \mu\text{V}$ ) und Pz ( $5.82 \mu\text{V}$ ), „Elektrode“:  $F(3,276)=42.14$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.31$ . Die P2 war bei Älteren an Fz ( $8.68 \mu\text{V}$ ) größer als bei Jüngeren ( $7.31 \mu\text{V}$ ), während es an anderen Elektroden keinen Altersunterschied gab („Altersgruppe \* Elektrode“:  $F(3,276)=3.48$ ,  $p<.05$ ,  $\eta=.04$ ). Die P2-Amplitude nahm in den gemischten Blöcken im Vergleich zum konstanten Block in beiden Altersgruppen zu (konstant:  $6.69 \mu\text{V}$ ; RWH:  $7.34 \mu\text{V}$ ; IWH:  $7.46 \mu\text{V}$ ; RW:  $7.53 \mu\text{V}$ ; „Block“:  $F(3,276)=8.79$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.09$ ). Die Tendenz zu einer größeren P2-Amplitude bei Älteren als bei Jüngeren in den frontalen Bereichen war in allen gemischten Blöcken zu sehen (Abb. 6.17), obwohl sie nur im RW-Block die Signifikanz erreichte (Jüngere:  $6.69 \mu\text{V}$ ; Ältere:  $8.14 \mu\text{V}$ ; „Altersgruppe \* Block“:  $F(3,276)=2.44$ ,  $p<.07$ ,  $\eta=.03$ ). Die P2-Latenzen waren an Fz (174 ms), FCz (177 ms) und Cz (177 ms) kürzer als an Pz (194 ms), „Elektrode“:  $F(3,276)=59.16$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.39$ .) Beide Altersgruppen zeigten eine Verlängerung der P2-Latenz bei Steigerung der Aufgabenschwierigkeit: die P2-Latenz war im Block mit irregulärem Wechsel länger (185 ms) als in anderen Blöcken (konstant: 177ms, RWH: 180 ms, RW: 178 ms; „Block“:  $F(3,276)=5.09$ ,  $p<.004$ ,  $\eta=.05$ ). Im IWH-Block war die P2-Latenz bei Älteren (178 ms) kürzer als bei Jüngeren (192 ms), was zu einer signifikanten Interaktion „Altersgruppe \* Block“ führte ( $F(3,276)=5.16$ ,  $p<.003$ ,  $\eta=.05$ ).

*Lokale Wechselkosten.* Die P2-Amplitude war an Fz und FCz größer als an Cz und Pz. Die dreifache Interaktion „Altersgruppe“ \* „Elektrode“ und „Durchgang“ zeigte eine größere P2-Amplitude bei Älteren als bei Jüngeren an Fz in den Wiederholungsdurchgängen während dieser Effekt in den Wechseldurchgängen nicht signifikant war ( $F(2,276)=3.18$ ,  $p<.04$ ,  $\eta=.03$ ). Die P2-Latenz war in den Wiederholungsdurchgängen kürzer (181 ms) als in den Wechseldurchgängen (185 ms); „Durchgang“:  $F(1,92)=8.01$ ,  $p<.004$ ,  $\eta=.09$ . Die Effekte von „Elektrode“, „Block“ und „Altersgruppe \* Block“ auf die P2-Latenz waren dieselben wie bei den globalen Wechselkosten: die

P2-Latenz war an Fz, FCz und Cz kürzer als an Pz, länger im IWH-Block als in den RWH- und RW-Blöcken und kürzer bei Älteren als bei Jüngeren im IWH-Block.

### N2-Komponente

*Globale Wechselkosten.* Die N2-Amplitude war an FCz (.72  $\mu\text{V}$ ) und Cz (.43  $\mu\text{V}$ ) größer (d.h. weniger positiv) als an Fz (1.47) und Pz (2.04  $\mu\text{V}$ ), „Elektrode“:  $F(3,276)=22.23$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.19$ . Die N2-Amplitude verminderte sich mit der Aufgabenschwierigkeit altersunabhängig (Abb. 6.17): sie war am größten (am wenigsten positiv) im konstanten Block (.06  $\mu\text{V}$ ), kleiner in beiden Blöcken mit regulärem Wechsel (RWH: 1.02  $\mu\text{V}$ , RW: 1.53  $\mu\text{V}$ ) und war am kleinsten im Block mit irregulärem Wechsel (2.05  $\mu\text{V}$ ), „Block“:  $F(3,276)= 22.36$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.20$ . Eine größere (d. h. negativere) N2-Amplitude wurde bei „routinierten“ Älteren im Vergleich zu den „flexiblen“ Älteren beobachtet („Altersgruppe \* Arbeitsanforderung“:  $F(1,92)= 4.49$ ,  $p<.04$ ,  $\eta=.05$ ), was in Abb. 6.13 dargestellt ist. Die N2-Komponente hatte eine kürzere Latenz im konstanten Block (247 ms) als im RWH-Block (286 ms) während die restlichen Vergleiche sich als nicht signifikant erwiesen („Block“:  $F(3,276)= 3.82$ ,  $p<.01$ ,  $\eta=.04$ ). Unabhängig von der Belastung war die N2-Latenz bei Älteren (287 ms) länger als bei Jüngeren (274 ms), „Altersgruppe“:  $F(1,92)= 8.50$ ,  $p<.004$ ,  $\eta=.09$ ).

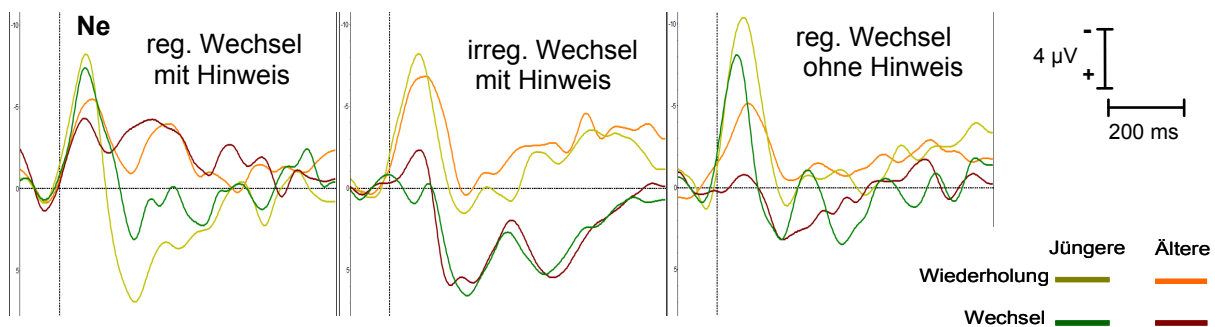


**Abb. 6.13** Die altersbezogene Vergrößerung der N2 bei „routinierten“ Pbn

*Lokale Wechselkosten.* Die Effekte von „Elektrode“ und „Block“ auf die N2-Amplitude sowie der Effekt von „Altersgruppe“ auf die N2-Latenz waren dieselben wie bei der Analyse der globalen Wechselkosten. Es zeigte sich eine kürzere N2-Latenz für die Wiederholungs- (283 ms) als für die Wechseldurchgänge (288 ms), „Durchgang“:  $F(1,92)=6.99$ ,  $p<.01$ ,  $\eta=.07$ .

### Ne-Komponente<sup>3</sup>

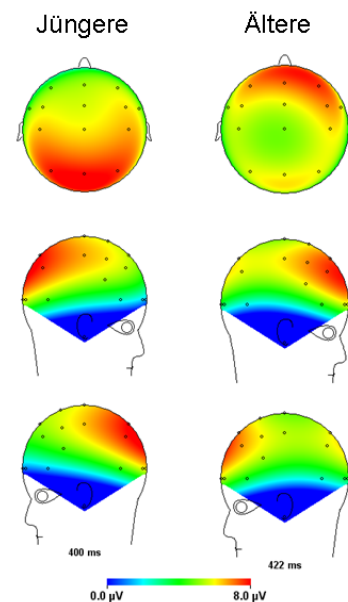
Die Ne-Komponente (Abb. 6.14), d.h. eine Negativierung mit der Gipfellatenz von ca. 100 ms an der FCz-Ableitung, war im RWH-Block (-7.21  $\mu\text{V}$ ) größer als im IWH-Block (-4.37  $\mu\text{V}$ ) während sich diese Blöcke vom RW-Block nicht unterschieden (-6.03  $\mu\text{V}$ ), „Block“:  $F(2,80)=3.23$ ,  $p<.05$ ,  $\eta=.08$ ). Es zeigte sich bei den Älteren eine kleinere Ne (-6,27  $\mu\text{V}$ ) im Vergleich zu den Jüngeren (-9,47  $\mu\text{V}$ ), „Altersgruppe“:  $F(1,40)=6.09$ ,  $p<.02$ ,  $\eta=.13$ ). Der Alterseffekt war im RW-Block am stärksten, während es im IWH-Block keinen Altersunterschied gab, was zur Interaktion „Altersgruppe“ \* „Block“ führte ( $F(2,80)=3.53$ ,  $p<.03$ ,  $\eta=.08$ ). Die Ne war in den Wiederholungsdurchgängen (-9.68  $\mu\text{V}$ ) größer als in den Wechseldurchgängen (-6.06  $\mu\text{V}$ ), „Durchgang“:  $F(1,40)=24.88$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.38$ ).



**Abb. 6.14** Die Ne-Komponente bei Älteren (braun) und Jüngeren (grün). Vertikale Linie – Reizionset

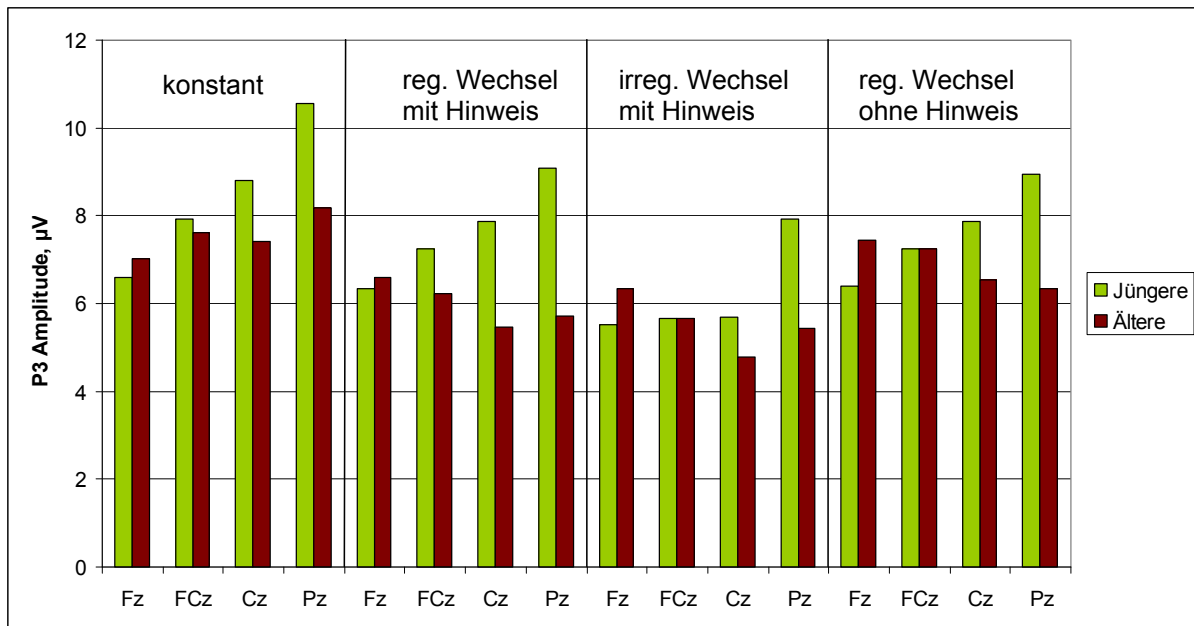
### P3 Komponente

*Globale Wechselkosten.* Die P3-Komponente mit der Gipfellatenz von ca. 400 ms (Abb. 6.17) war in den parietalen Bereichen ausgeprägt („Elektrode“:  $F(3,276)=11.42$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.11$ ) und war an Pz (7.74  $\mu\text{V}$ ) größer als an FCz (6.80  $\mu\text{V}$ ) und Cz (6.75  $\mu\text{V}$ ). Am kleinsten war diese Komponente an Fz (6.47  $\mu\text{V}$ ). Die P3 verminderte sich in den RWH- (6.76  $\mu\text{V}$ ) und IWH-Blöcken (5.86  $\mu\text{V}$ ) im Vergleich zum konstanten Block (7.94  $\mu\text{V}$ ) während es keinen Unterschied zwischen dem konstanten und RW-Blöcken (7.21  $\mu\text{V}$ ) gab („Block“:  $F(3,276)=8.79$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.09$ ). Darüber hinaus hatten Ältere und Jüngere unterschiedliche P3-Topographien (Abb. 6.15 und Abb. 6.16). Das P3-Maximum verschob sich bei Älteren in frontozentrale Bereiche, während bei den Jüngeren ein parietales Maximum zu sehen war; außerdem war die parietale P3 bei Älteren kleiner als bei Jüngeren während es keine Altersunterschiede in anderen Hirnarealen gab („Altersgruppe \* Elektrode“:  $F(3,276) = 9.14$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.17$ ).



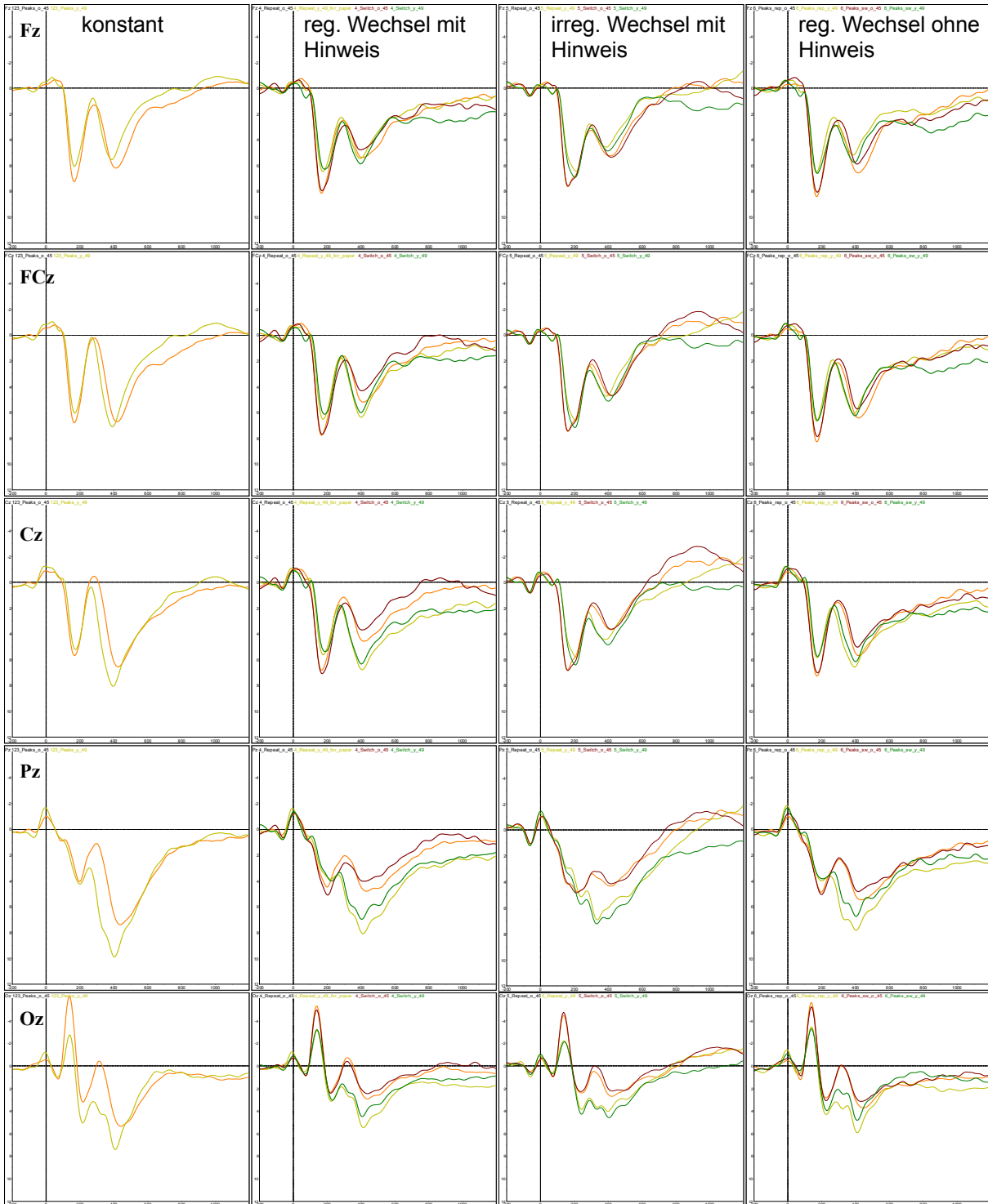
**Abb. 6.15** Topographie der P3 im Altersvergleich

<sup>3</sup> Da nicht bei allen Pbn genug Fehlerdurchgänge für die EKP-Mittelung zur Verfügung standen, wurde die Ne-Auswertung nur für die Gruppe von 22 Jüngeren und 20 Älteren in den gemischten Blöcken durchgeführt.



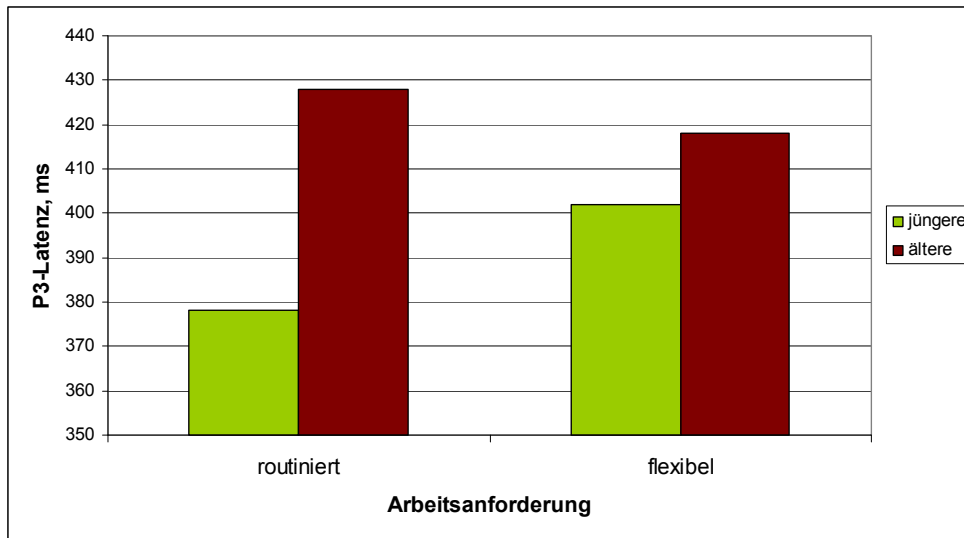
**Abb. 6.16** Die P3-Frontalisierung bei Älteren (braun) im Vergleich zu Jüngeren (grün).

Die P3-Latenz verlängerte sich in den Wiederholungsdurchgängen von den frontalen zu den parietalen Ableitungen (Fz: 397 ms, FCz: 401ms, Cz: 402 ms, Pz: 408 ms; „Elektrode“:  $F(3,276)=22.71$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.20$ ). Sie war im konstanten Block (408 ms) und RWH-Block (403 ms) länger als im IWH-Block (382 ms) und am längsten im RW-Block (415 ms), „Block“:  $F(3,276)=12.91$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.12$ ). Die P3 trat bei den Älteren später auf als bei den Jüngeren (Jüngere: 388 ms, Ältere: 417 ms; „Altersgruppe“:  $F(1,92)=24.73$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.21$ ). Die Interaktion „Altersgruppe \* Block“ ( $F(3,276)=3.73$ ,  $p<.01$ ,  $\eta=.04$ ) war auf zwei Effekte zurückzuführen. Zum einen wurden die Altersunterschiede in der P3-Latenz nur im konstanten Block (Jüngere: 385 ms, Ältere: 431 ms), RWH-Block (Jüngere: 392 ms, Ältere: 414 ms) und IWH-Block (Jüngere: 364 ms, Ältere: 400 ms) beobachtet, nicht aber im RW-Block (Jüngere: 409 ms, Ältere: 421 ms). Zum anderen gab es unterschiedliche Reaktionen auf die Belastung innerhalb der Altersgruppen. Die P3-Latenz verlängerte sich bei den Jüngeren in den IWH- und RW-Blöcken im Vergleich zum konstanten Block, während es keinen Unterschied zwischen dem konstanten und RWH-Block gab. Dagegen verkürzte sich die P3-Latenz bei den Älteren in den RWH- und IWH-Blöcken im Vergleich zum konstanten Block, während es keinen Unterschied zwischen dem konstanten und RW-Block gab.



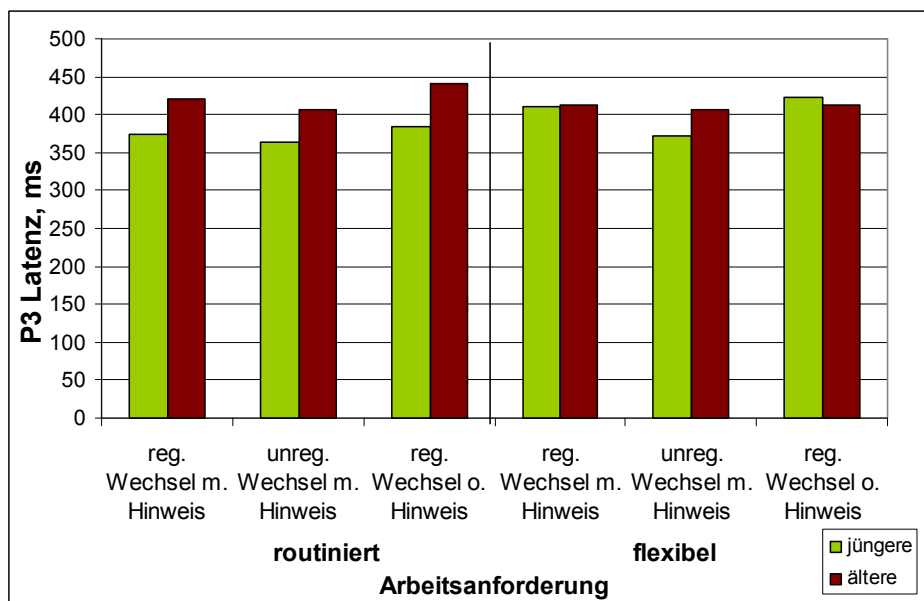
**Abb. 6.17** Ereigniskorrelierte Potentiale der einzelnen Aufgaben verteilt über die zentralen Elektroden bei Jüngeren und Älteren für die Wiederholungs- und Wechseldurchgänge. Vertikale Linie – Reizerset

Bei den „routinierten“ Pbn verzögerte sich die P3b-Latenz mit höherem Alter, während es keine altersbezogene Verzögerung bei „flexiblen“ Pbn gab (Abb. 6.18, „Altersgruppe \* Arbeitsanforderung“:  $F(1,92)=8.03$ ,  $p<.006$ ,  $\eta=.08$ )



**Abb. 6.18** Die altersassoziierte P3b-Verzögerung bei den Pbn mit „routinierten“ Arbeitsanforderungen

Die signifikante dreifache Interaktion „Altersgruppe \* Arbeitsanforderung \* Block“ auf die parietale P3-Latenz ( $F(3,276)=5.24$ ,  $p<.002$ ,  $\eta=.05$ ) deutete darauf hin, dass eine alterassoziierte P3b-Verlangsamung bei Pbn mit „routinierten“ Arbeitsanforderungen in allen Blöcken erfolgte. (Abb. 6.19, links). Dagegen war bei Pbn mit „flexiblen“ Arbeitsanforderungen dieser Effekt nur im Block mit irregulärem Wechsel zu sehen (Abb. 6.19, rechts).



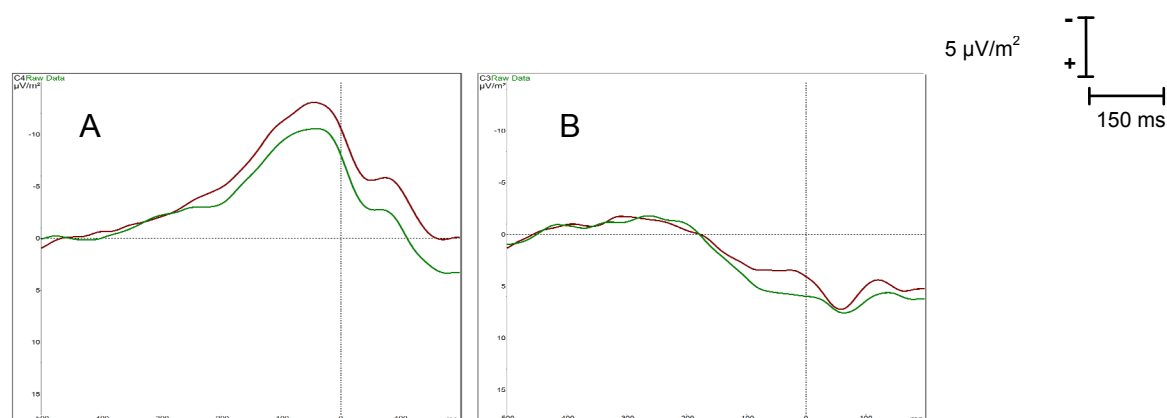
**Abb. 6.19** Die P3b-Latenz in unterschiedlichen Versuchsbedingungen in Abhängigkeit vom Alter und Arbeitsanforderungen



**Lokale Wechselkosten.** Die Interaktion „Elektrode \* Altersgruppe \* Durchgang“ ( $F(3,276)=17,43$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.16$ ) auf die P3-Amplitude kam aus zwei Quellen. Zum einen war die *parietale* P3-Amplitude bei den Jüngeren in den Wechseldurchgängen ( $8.14 \mu\text{V}$ ) kleiner als in den Wiederholungsdurchgängen ( $8.67 \mu\text{V}$ ), während es bei den Älteren kein Unterschied gab (Wechsel:  $5.47 \mu\text{V}$ , Wiederholung:  $5.77 \mu\text{V}$ ). Zum anderen war die *frontale* P3-Amplitude in den Wechseldurchgängen ( $6.65 \mu\text{V}$ ) bei den Jüngeren größer als in den Wiederholungsdurchgängen ( $6.08 \mu\text{V}$ ), während es bei den Älteren umgekehrt war (Wechsel:  $6.16 \mu\text{V}$ , Wiederholung:  $6.71 \mu\text{V}$ ). Auf die P3-Latenz wurden dieselben Effekte von „Elektrode“ und „Block“ beobachtet, die bei der Analyse der globalen Kosten zu sehen waren.

#### CNV<sup>4</sup>

Die reaktionsbezogenen EKPs zeigten eine typische langsame zentral ausgeprägte Negativierung (Abb. 6.20), die ihr Maximum kurz vor der Antwort erreichte. Die CNV-Amplitude war im RW-Block ( $-4.33 \mu\text{V}/\text{m}^2$ ) kleiner als in den RWH- ( $-5.60 \mu\text{V}/\text{m}^2$ ) und IWH-Blöcken ( $-6.31 \mu\text{V}/\text{m}^2$ ), „Block“:  $F(2,184)=10.93$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.11$ . Die CNV hatte an der zur ausführenden Hand kontralateralen Elektrode eine höhere Amplitude ( $-13.07 \mu\text{V}/\text{m}^2$ ) als an der Elektrode, die ipsilateral ( $2.42 \mu\text{V}/\text{m}^2$ ) zur ausführenden Hand lag (Elektrode“:  $F(1,92)=487.30$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.84$ ). Ältere zeigten eine größere CNV-Amplitude kontralateral zur ausführenden Hand als Jüngere (Jüngere:  $-10.55 \mu\text{V}/\text{m}^2$ , Ältere:  $-13.20 \mu\text{V}/\text{m}^2$ ), während es keinen Alterseffekt an der ipsilateralen Elektrode gab (Jüngere:  $4.20 \mu\text{V}/\text{m}^2$ , Ältere:  $3.0 \mu\text{V}/\text{m}^2$ ), „Altersgruppe \* Elektrode“:  $F(1,92)=3.82$ ,  $p<.05$ ,  $\eta=.04$ . In den Wiederholungsdurchgängen wiesen Ältere ( $-6.03 \mu\text{V}/\text{m}^2$ ) eine größere CNV als Jüngere ( $-4.60 \mu\text{V}/\text{m}^2$ ) auf, während kein Altersunterschied in den Wechseldurchgängen zu sehen war (Jüngere:  $-5.31 \mu\text{V}/\text{m}^2$ , Ältere:  $-5.70 \mu\text{V}/\text{m}^2$ ), „Altersgruppe“ \* „Durchgang“:  $F(1,92)=4.83$ ,  $p<.03$ ,  $\eta=.05$ ).



**Abb. 6.20** Die CNV bei Älteren (braun) und Jüngeren (grün) an den kontra- (A) und ipsilateralen (B) Ableitungen. Die CNV ist nach CSD-Methode ausgewertet worden (Perrin et al., 1984). Die Negativität geht nach oben. Vertikale Linie – Reaktionsonset

<sup>4</sup>Die ANOVA wurde für die C3- und C4-Elektroden und nur für die gemischten Blöcke durchgeführt.

### 6.2.3 Kardiovaskuläre Parameter

#### Kardiovaskuläre Anpassung an kognitive Belastung

Ältere zeigten eine niedrigere BRS ( $F(1,92)=33.93$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.27$ ) und einen niedrigeren HF-HRV-Anteil ( $F(1,92)=26.79$ ,  $p<.001$ ,  $\eta=.22$ ) als Jüngere, was auf eine reduzierte parasympathische Aktivität zurückzuführen ist. Es konnten jedoch keine Altersunterschiede in der kardiovaskulären Reaktivität beobachtet werden, denn beide Gruppen wiesen eine Zunahme der sympathischen Einflüsse (d. h. Erhöhung des systolischen Blutdrucks) und Abnahme der vagalen Einflüsse (Reduktion der BRS und HRV) bei Steigerung der kognitiven Belastung auf.

### 6.2.4 Korrelation zwischen den ereigniskorrelierten Potentialen und kardiovaskulären Parametern

Die BRS korrelierte sowohl in der konstanten Aufgabe als auch unter Belastung positiv mit der P3-Amplitude an Pz und Cz. Der SBD korrelierte nur unter Belastung (d. h. in den gemischten Blöcken) negativ mit der P3-Amplitude. Der DBD korrelierte nur im Block mit regelmäßigen Wechsel und Hinweis negativ mit der P3-Amplitude.

Es gab keine signifikante Korrelation zwischen der P3-Amplitude und den restlichen kardiovaskulären Parametern (HR, LF-HRV, HF-HRV).

Die Korrelationsanalyse, die getrennt für Jüngere und Ältere durchgeführt wurde, bestätigte den o. g. negativen Zusammenhang zwischen dem Blutdruck und der P3-Amplitude für ältere, nicht aber für jüngere Pbn (Tab. 6.3). Außerdem fielen diese Korrelationen bei den Älteren stärker aus als diejenigen, die über die Gesamtgruppe berechnet wurden.

**Tab. 6.3** Korrelation zwischen der P3-Amplitude in den Wiederholungsdurchgängen und den HK-Variablen berechnet über die Gesamtgruppe. Die signifikanten Korrelationen für Ältere sind in zusätzlichen Spalten dargestellt. r – Korrelationskoeffizient, p – Signifikanz. Konstant – konstante Aufgabe, RWH – regulärer Wechsel mit Hinweis, IWH – irregulärer Wechsel mit Hinweis, RW – regulärer Wechsel ohne Hinweis, BRS – Baroreflexsensitivität, HF-HRV, LF-HRV – Herzratenvariabilität im Hoch- bzw. Niederfrequenzband, SBD – systolischer Blutdruck, DBD – diastolischer Blutdruck.

	BRS	HF-HRV	LF-HRV	SBD	SBD ältere	DBD	DBD ältere	HR
	r / p	r / p	r / p	r / p		r / p		r / p
<b>P3-Amp., Fz</b>								
konstant	/	/	/	/	-.33 / .03	/	/	/
RWH	/	/	/	-.26 / .01	-.42 / .00	-.22 / .04	-.36 / .02	/
IWH	/	/	/	-.25 / .02	-.48 / .00	/	/	/
RW	/	/	/	/	/	/	/	/
<b>P3-Amp., Cz</b>								
konstant	/	/	/	/	/	/	/	/
RWH	/	/	/	-.28 / .01	-.38 / .01	-.24 / .02	-.40 / .01	/
IWH	/	/	/	-.29 / .01	-.48 / .00	/	-.36 / .02	/
RW	/	/	/	-.26 / .01	/	/	/	/
<b>P3-Amp., Pz</b>								
konstant	.23 / .03	/	/	/	/	/	/	/
RWH	.22 / .04	/	/	-.23 / .03	-.32 / .03	-.22 / .04	-.41 / .01	/
IWH	/	/	/	-.21 / .05	-.31 / .04	/	-.39 / .01	/
RW	.27 / .01	/	/	-.28 / .01	-.30 / .05	/	/	/
<b>P3-Amp. Fz / Pz-Ratio</b>								
konstant	/	/	/	/		/		/
RWH	/	/	/	/		/		/
IWH	/	/	/	/		/		/
RW	/	/	/	/		/		/

### 6.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ältere Erwerbstätige zeigten im Vergleich zu jüngeren Erwerbstätigen eine längere RZ, eine höhere Fehlerrate sowie höhere globale Wechselkosten dieser beiden Leistungsparameter. Diese Effekte wurden jedoch nur in den Blöcken mit regulärem Wechsel beobachtet. Dagegen gab es in der Fehlerrate und den globalen Wechsel-

kosten keinen Altersunterschied zwischen Jüngeren und Älteren, wenn die Vorbereitung zum Aufgabewechsel unmöglich war.

Auf der neuronalen Ebene zeigten Ältere eine größere N1, P2, motorische CNV, verzögerte N2, sowie eine kleinere parietale P3 und Ne. Die P3-Latenz war bei den Älteren länger als bei den Jüngeren. Unter Belastung zeigten Ältere eine verstärkte P3-Frontalisierung, während eine parietale P3-Verteilung bei den Jüngeren zu sehen war. Die P2-Latenz verzögerte sich bei Jüngeren belastungsabhängig. Ältere dagegen wiesen diesen Effekt nicht auf.

Auf der Herz-Kreislauf-Ebene war eine altersassoziierte Reduktion der parasympathischen Aktivität (reduzierte BRS und HF-HRV) zu verzeichnen. Es gab einen positiven Zusammenhang zwischen der P3 und der parasympathischen Aktivität. Der negative Zusammenhang zwischen der P3 und Blutdruck wurde nur bei den Älteren, nicht aber bei den Jüngeren gefunden.

Die Ergebnisse zeigen eine altersassoziierte Vergrößerung der N2 und Verlangsamung der P3 bei den Pbn mit „routinierten“ Arbeitsanforderungen, während es keinen Alterseffekt bei den Pbn mit „flexiblen“ Arbeitsanforderungen gab.

## 6.3 Clock-Aufgabe

### 6.3.1 Leistungsdaten

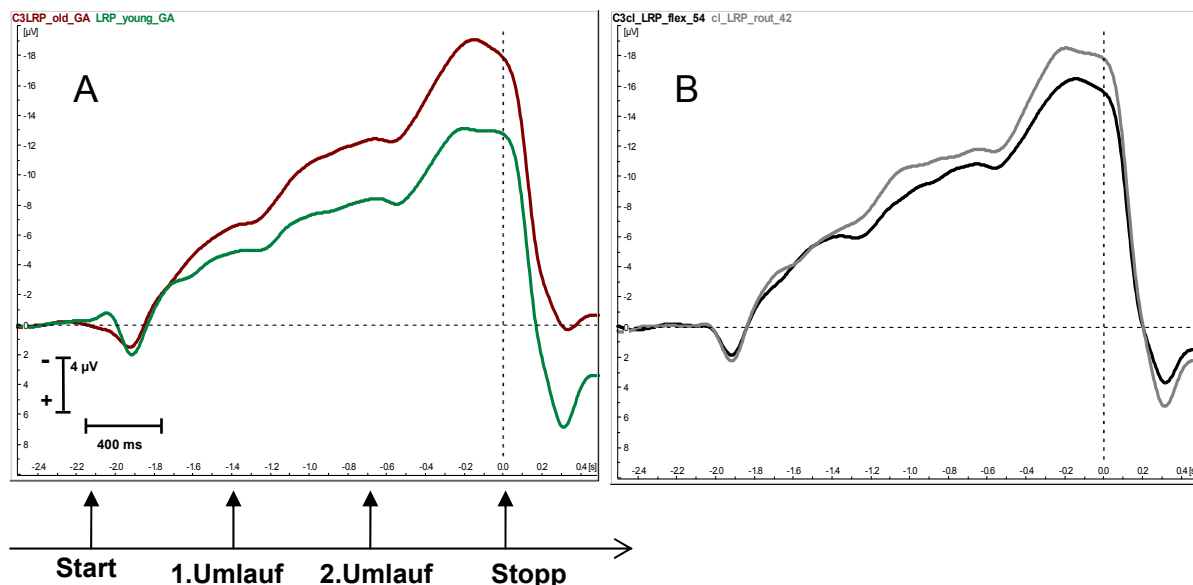
Ältere erreichten im Vergleich zu den Jüngeren signifikant weniger Treffer in der 12-Uhr-Position und im  $\pm 20^\circ$ -Segment (Tab. 6.4). Außerdem hatten Jüngere mehr Treffer vor der 12-Uhr-Position während Ältere mehr Treffer nach der 12-Uhr-Position hatten. Der Altersunterschied zeigte sich auch bei der relativen mittleren Abweichung, weil es bei den Jüngeren einen negativen Wert und bei den Älteren einen positiven Wert gab.

**Tab. 6.4** Die Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) von Leistungsparametern bei jüngeren und älteren Pbn. T – T-Wert, p – Signifikanz

Leistungsparameter	Jüngere		Ältere		T-Test	
	M	SD	M	SD	T	p
Trefferanzahl +/- 20°	50.0	9.1	42.0	11.6	4.008	0.000
Trefferanzahl vor 12-Uhr-Position	33.7	10.4	29.8	10.1	1.972	0.051
Trefferanzahl nach 12-Uhr-Position	31.9	10.0	36.2	10.3	-2.194	0.030
Trefferanzahl 12-Uhr-Position	3.3	2.2	2.3	1.6	-2.154	0.031
absolute Abweichung (in Grad)	16.0	4.3	20.3	6.3	-4.127	0.000
relative Abweichung (in Grad)	-2.3	6.9	1.1	9.5	-2.152	0.034

### 6.3.2 Ereigniskorrelierte Potentiale

Die CNV präsentierte sich als eine andauernde Negativierung an den zentralen (Fz, Cz, Pz) und seitlichen (F3, F4, C3, C4, P3, P4,) Elektroden. Sie entwickelte sich kurz nach dem Start der Zeigerbewegung und erreichte ihr Maximum kurz vor der Antwort. Die CNV war an den Elektroden größer, die kontralateral zur ausführenden Hand lagen (d. h. an den F3, C3, P3 im Vergleich zu der F4, C4, P4). Die CNV-Amplitude an C3 war bei Älteren größer als bei Jüngeren („Altersgruppe“:  $F(1,98)=12.41, p<.001, \eta=.11$ ), Abb. 6.21A. Dieser Effekt generalisierte sich über alle seitlichen und mittleren Elektroden in den frontalen, zentralen und parietalen Hirnarealen. Die nicht signifikante Interaktion Alter \* Elektrode bedeutete, dass der altersabhängige Unterschied in der CNV-Amplitude in allen Bereichen gleich war. Die CNV an C3 bei Pbn mit routinierten Arbeitsanforderungen war dabei größer als bei den Pbn mit flexiblen Arbeitsanforderungen (Abb. 6.21B; „Arbeitsanforderung“:  $F(1,98)= 3.99, p<.05, \eta=.04$ ).



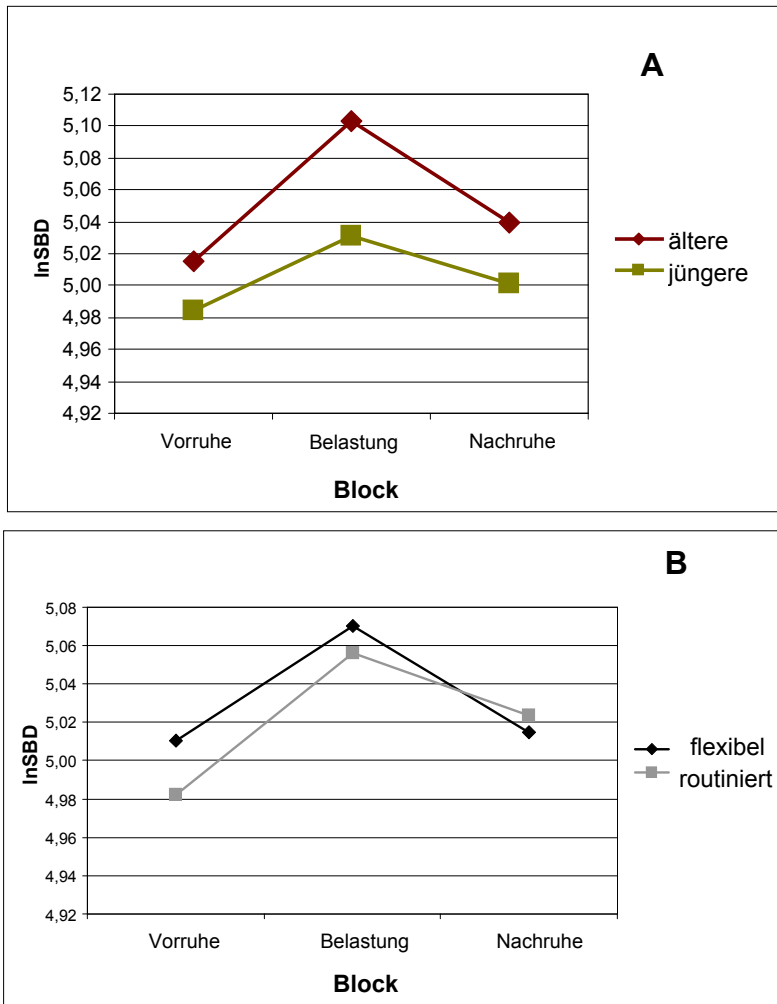
**Abb. 6.21** A: Die CNV bei Älteren (braun) und Jüngeren (grün) an der C3-Elektrode (kontralateral zur ausführenden Hand). B: Die CNV bei Pbn mit flexiblen (schwarz) und routinierten (grau) Arbeitsanforderungen an der C3-Elektrode in derselben Bedingung. Die Negativität geht nach oben. Vertikale Linie – Reaktionsonset

### 6.3.3 Kardiovaskuläre Parameter<sup>5</sup>

Ältere wiesen eine reduzierte BRS ( $F(1,99)=36.35, p<.001, \eta=.27$ ), LF-HRV ( $F(1,99)=26.05, p<.001, \eta=.21$ ) und HF-HRV ( $F(1,99)=28.00, p<.001, \eta=0.22$ ) als Jüngere auf. Der SBD war bei Älteren unter Belastung höher als bei Jüngeren, während keine Altersunterschiede in den Vor- und Nachruhe-Bedingungen beobachtet wurden („Altersgruppe \* Block“:  $F(2,198)=3.92, p<.02; \eta=.04$ ). Beide Arbeitsgruppen wiesen dabei den gleichen DBD und SBD in der Vorruhe sowie die gleiche Reaktivität dieser Parameter auf kognitive Belastung auf (Abb. 6.22A). Die Interaktion „Ar-

<sup>5</sup> Die Auswertung wurde für die Gruppe von 56 Jüngeren und 45 Älteren durchgeführt.

beitsanforderung \* Block“ ( $F(2,198)=3.09$ ,  $p<.05$ ,  $\eta=.03$ ) zeigte, dass sich die Blutdruckwerte bei „routinierten“ Pbn nach der Belastung nicht zurückstellten. Dagegen kehrte der Blutdruck bei „flexiblen“ Pbn nach der Belastung zu den Vorrühewerten zurück (Abb. 6.22B).



**Abb. 6.22** A: Die erhöhte Reaktivität des systolischen BD auf die Belastung bei den Älteren im Vergleich zu den Jüngeren. B: Die verminderte Erholung des systolischen BDs nach kognitiver Belastung bei Pbn mit routinierten (grau) im Vergleich zu den flexiblen (schwarz) Arbeitsanforderungen.

### 6.3.4 Korrelation zwischen den ereigniskorrelierten Potentialen und kardiovaskulären Parametern

Berechnet über alle Probanden, gab es keine signifikante Korrelation zwischen der CNV und kardiovaskulären Parametern. Unter Belastung korrelierte die CNV an C3 (kontralateral zur ausführenden Hand) bei den Älteren positiv mit dem systolischen BD ( $r=.30$ ,  $p < .05$ ).

## 7 Diskussion

Die zentrale Annahme der vorliegenden Studie wurde als „Kompensationshypothese“ formuliert. Es wurde vermutet, dass die altersassoziierten Veränderungen im Frontalhirn für die Abnahme von kognitiven Fähigkeiten, insbesondere von exekutiven Prozessen und Arbeitsgedächtnis, verantwortlich sind. Diese Defizite können zu den Leistungseinbußen bei Älteren führen. Zur Aufrechterhaltung der Leistung werden kompensatorische Mechanismen eingesetzt, die sich in spezifischen Veränderungen der kognitiven Strategien, neuronaler Prozesse und Herz-Kreislauf-Aktivität äußern.

### 7.1 N-Back-Aufgabe

#### Kompensation auf Leistungsebene

Wie erwartet waren die altersassoziierten Leistungseinbußen unter AG-Belastung deutlich zu erkennen, und zwar sowohl bei der RZ, als auch anhand der Fehlerrate, was mit anderen Studien übereinstimmt und auf die altersassoziierten Beeinträchtigungen des AGs hinweist (West, 1999; Missonnier et al., 2004; Verhaeghen & Basak, 2005). Dagegen zeigten Ältere keine Leistungsbeeinträchtigung bei der Aufgabe ohne AG-Belastung (0-Back-Aufgabe). Das Ergebnis spricht somit gegen die sog. „General Slowing Hypothesis“ (Salthouse, 1996), die annimmt, dass die Geschwindigkeit elementarer psychischer Operationen wie Informationsenkodierung, -abruf oder -integration mit dem Alter langsamer wird und dass kognitive Defizite von Älteren in den komplexen Aufgaben auf diese Verlangsamung zurückgeführt werden sollten. Die signifikante Interaktion „Altersgruppe \* Block“ zeigt, dass die Leistungsunterschiede nicht generell, sondern nur unter AG-Belastung auftreten und deutet auf spezifische Defizite im AG hin. Außerdem, war diese Interaktion auch bei logarithmisierten RZ signifikant. Dies weist auf größere altersabhängige Unterschiede hin als man unter Annahme der „General Slowing Hypothesis“ erwarten könnte. Es wurde auch angenommen, dass das FB zur AG-Entlastung führt und damit die Leistung verbessert. In der Tat profitierten beide Altersgruppen vom FB, was sich in einer kürzeren RZ und einer verminderten Fehlerrate darstellte.

Am stärksten reduzierte das FB den Prozentwert der Omissionen bei Älteren. Das ist vermutlich auf eine erhöhte Aufmerksamkeitsfokussierung durch das FB zurückzuführen, die es den Älteren ermöglicht, den Reizkategorisierungsprozess zu beschleunigen und eine Reaktion innerhalb eines kurzen Antwortfensters zu vollbringen. Bemerkenswert ist jedoch, dass die altersbezogenen Leistungsunterschiede durch das FB nur bei dem Prozentwert der Omissionen ausgeglichen werden konnten, wobei die Altersunterschiede in der RZ und den falschen Alarmen unverändert blieben. Das ist ein weiterer Hinweis darauf, dass FB eine Steigerung der Aufmerksamkeitsfokussierung, nicht aber eine substantielle AG-Entlastung bei Älteren bewirkte. Vermutlich war das Antwortfenster von 1,5 Sekunden für Ältere zu kurz, um die erlernten Informationen über das FB umsetzen zu können. Diese Interpretation stimmt mit den Ergebnissen von Missionnier et al. (2004) überein, die eine ähnliche 2-Back-Aufgabe mit einem längeren Antwortfenster (5 s) verwendet haben. Obwohl ihre Pbn ca. 20 Jahre älter als unsere Pbn waren, machten die Pbn von Missionnier et al. (2004) weniger Fehler als unsere Pbn. Somit kann ein längeres Antwortfenster zur Verbesserung der AG-Leistungen bei Älteren führen.

### Kompensation auf neuronaler Ebene

Sogar bei der einfachen 0-Back-Aufgabe, in der noch keinerlei Altersunterschiede in der Leistung zu sehen waren, wiesen sich signifikante Altersunterschiede auf neuronaler Ebene auf: die P3b-Amplitude war bei den Älteren kleiner und die P3b-Latenz größer als bei den Jüngeren und dieser Effekt verstärkte sich unter AG-Belastung. Eine verkleinerte und verzögerte P3b bei den Älteren ist ein längst bekanntes Phänomen (Pfefferbaum et al., 1980; Polich, 1996), das bisher nur selten im Zusammenhang mit den altersbezogenen AG-Defiziten gebracht wurde.

Die „Inhibitionshypothese“ von Polich (2007) bietet einen theoretischen Rahmen für die Erklärung der altersassoziierten Reduktion der P3 unter AG-Belastung. Er nimmt an, dass der P3-Komplex aus zwei Subkomponenten, einer fronto-zentralen P3a und der parietalen P3b besteht. Die frontale P3a auf alle (relevanten und irrelevanten) Reize sei ein Ausdruck einer unwillkürlichen Aufmerksamkeitssteigerung, die durch präfrontale Gehirnareale unterstützt wird. Wenn einer der Reize eine hohe Bedeutung hat und handlungsrelevant ist, werden die Reizinformationen in die parietalen Bereiche weitergeleitet und dort weiter verarbeitet, was sich in der parietalen P3b reflektiert. Der Transfer der relevanten Reize von frontalen zu parietalen Gehirnarealen hängt jedoch von der Inhibition der irrelevanten Reize ab. Je stärker sie im Präfrontalkortex inhibiert werden, desto schneller wird ein relevanter Reiz den parietalen Kortex erreichen, desto mehr kognitive Ressourcen werden dort für seine Verarbeitung zur Verfügung gestellt und desto größer soll die parietale P3 sein.

Dieser Logik folgend, soll der handlungsrelevante Reiz einen Vorrang vor anderen Reizen bekommen und die anschließende Reaktion bestimmen, was die Aktualisierung (Updating) des Gedächtnisinhaltes nach sich zieht (Donchin & Coles, 1988). Bei der 0-Back-Aufgabe sollten die von Polich (2007) postulierten Prozesse (Inhibition der irrelevanten Reize im Präfrontalkortex, Informationstransfer von frontalen zu den parietalen Bereichen und Aktualisierung des Gedächtnisinhaltes) relativ reibungslos ablaufen, denn die ankommenden Reize müssen nur mit einem im Gedächtnis abgespeicherten Zielreiz abgeglichen werden. Bei der 2-Back-Aufgabe läuft ein exekutiver Prozess zur Aufrechterhaltung aller bereits präsentierten Reize parallel zum Abgleichprozess ab, was die N-Back-Aufgabe zu einer Art Doppelaufgabe macht (Watter et al., 2001). Die P3b-Amplitude soll somit ein Index für die Ressourcenumverteilung zwischen den beiden Prozessen sein. In den Studien zur gleichzeitigen Bearbeitung von zwei unterschiedlichen kognitiven Aufgaben (Multitasking) ist dieser Effekt deutlich zu sehen: je komplexer eine Primäraufgabe ist, desto kleiner ist die P3b-Amplitude in einer Sekundäraufgabe (Wickens et al., 1983). Die reduzierte P3b bei Älteren in unserer 2-Back-Aufgabe deutet eher nicht auf die Defizite im Reizkategorisierungsprozess per se sondern auf uneffektive Ressourcenallokation zwischen dem exekutiven und dem Reizkategorisierungsprozess hin. Dies kann durch eine verstärkte Inhibition irrelevanter Reize bei Älteren zustande kommen, welche zusätzliche Ressourcen nach sich zieht. In der 2-Back-Aufgabe fanden wir unter AG-Belastung auch eine „Frontalisierung“ der P3-Komponente bei den Älteren, die als „kompensatorische“ Ressourcenumverteilung zugunsten exekutiver Kontrolle angesehen werden kann (Pfefferbaum, et al., 1980; Friedman et al., 1997; Kray et al., 2005; Hillman et al., 2006; Daffner et al., 2010).

Unserer Kenntnis nach gibt es nur eine EKP-Studie zu den Alterseffekten unter AG-Belastung, die mit unserer direkt verglichen werden kann. Genauso wie wir, benutzten Daffner et al. (2010) eine N-Back-Aufgabe mit gleichen Stimuli (Buchstaben) und gleicher Reizdarbietungszeit (200 ms). In der 0-, 1- und 2-Back-Bedingung fanden die Autoren eine spätere P3-Latenz, aber keine Reduktion der P3-Amplitude bei den



Älteren im Vergleich zu den Jüngeren; der Altersunterschied in der P3-Latenz war unter AG-Belastung stärker ausgeprägt als ohne AG-Belastung. Übereinstimmend mit diesen Ergebnissen vergrößerten sich die altersabhängigen Unterschiede unter AG-Belastung, wobei eine reduzierte und verzögerte parietale P3 bei Älteren im Vergleich zu den Jüngeren zu sehen war. Fehlende Alterseffekte auf die P3-Amplitude bei Daffner et al. (2010) sind darauf zurückzuführen, dass die Autoren ein 500 ms längeres Antwortfenster als in unserem Experiment angewendet haben, was die AG-Belastung verringert und dadurch die Alterseffekte auf die P3 vermindert haben könnte.

Die N2-Komponente, die vermutlich die Prozesse der Handlungsüberwachung und Konflikterkennung widerspiegelt (Folstein & Van Petten, 2008), hatte bei den Älteren eine größere Latenz als bei den Jüngeren. Wild-Wall et al. (2008) fanden eine verringerte N2-Amplitude bei Älteren, die als Beeinträchtigung exekutiver Kontrolle bei der Handlungsüberwachung/Konflikterkennung betrachtet wurde. Die altersbezogene N2-Verzögerung in unserem Experiment kann im ähnlichen Sinne interpretiert werden. Das Fehlen des Alterseffekts auf die N2-Amplitude ist damit erklärbar, dass unsere N-Back-Aufgabe keinen Reiz-Reaktions-Konflikt simulierte, was bei der Flanker-Aufgabe in der zitierten Studie der Fall war. Die relativ geringere Fehlerrate könnte in unserem Experiment auch dafür verantwortlich sein, dass wir keine Altersunterschiede in der Fehlerverarbeitung (Ne-Komponente) fanden.

Die psychophysiologischen Prozesse, die sich in parietaler P3 und fronto-zentraler N2 niederschlagen, scheinen von entscheidender Bedeutung für altersassoziierte kognitive Defizite zu sein. Es ist daher anzunehmen, dass die Umstrukturierung neuronaler Vorgänge, auf die unten eingegangen wird, als Kompensation dieser Defizite bei Älteren interpretiert werden kann.

Die okzipitale N1-Amplitude war bei Älteren größer als bei Jüngeren. Die N1-Komponente wird mit der primären Reizidentifikation in Verbindung gebracht. Unter anderem wird die N1 im Zusammenhang mit dem sog. „Gating“-Prozess betrachtet, der eine intensivere Verarbeitung der Reize, auf die Aufmerksamkeit gerichtet wird, gewährleistet im Vergleich zu denen, die unbeachtet bleiben (Hillyard & Anllo-Vento, 1998). Yordanova et al. (2004) fanden die altersbezogene Vergrößerung der N1 in auditorischen und visuellen Wahl-Reaktion-Aufgaben und schließen daraus, dass das Alter eine modalitätsunspezifische Verstärkung der frühen Verarbeitung bewirkt.

In unserem Experiment war die frontale P2 bei Älteren im Vergleich zu Jüngeren unabhängig von der AG-Belastung erhöht, was auch in anderen Studien gefunden wurde (Pfefferbaum, 1980; West et al., 2004; West et al., 2010). Diese Komponente gilt als Ausprägung der Aufmerksamkeitsfokussierung auf die Reize, bei denen ein relevantes Merkmal entdeckt wurde und dessen weitere Verarbeitung sinnvoll ist (Luck & Hillyard, 1994). Somit scheinen Ältere die AG-Defizite durch verstärkte Aufmerksamkeitsfokussierung zu kompensieren um die relevanten Reizmerkmale besser entschlüsseln zu können. Die vergrößerte frontale P2 bei Älteren kann auch verstärkte Inhibition der irrelevanten Reizmerkmale seitens des Präfrontalkortex bedeuten (Alain & Woods, 1994; Vallesi et al, 2009). Alain & Woods (1994) fanden die P2-Erhöhung auf Distraktoren, d. h. auf die Reize, die inhibiert werden müssen, um eine Aufgabe effektiv ausführen zu können. Die vergrößerte P2, die nicht nur unter AG-Belastung, sondern auch ohne AG-Belastung beobachtet wurde stimmt mit den bildgebenden Studien überein, die zeigen, dass die frontale Aktivierung bei Älteren auch bei leichten Aufgaben zu finden ist, d. h. auch dann, wenn exekutive Kontrolle nicht notwendig erscheint (Reuter-Lorenz & Sylvester, 2005; West & Schwalb, 2006). Somit können die erhöhten N1- und P2-Komponenten ein

kompensatorischer Mechanismus bei Älteren widerspiegeln, der eine intensivere Verarbeitung relevanter Reizmerkmale durch Umverteilung der Ressourcen zu früheren Verarbeitungsstufen gewährleistet.

Die reaktionsbezogene CNV war bei Älteren größer als bei Jüngeren. Dieser Effekt war auf der linken zentralen Elektrodenposition (C3) signifikant, die kontralateral zur rechten Antworthand lag, und war sowohl unter AG-Belastung als auch ohne AG-Belastung zu sehen. Ein ähnlicher Effekt wurde auch in anderen experimentellen Paradigmen wie bei der Wahlreaktionsaufgabe (Yordanova et al., 2004), der Suchaufgabe (Wild-Wall et al., 2007) sowie der Flanker-Aufgabe (Wild-Wall et al., 2008) beobachtet. Dieser Alterseffekt scheint daher unabhängig von dem Aufgabentyp und der -schwierigkeit zu sein. Die Ursache dieses Effekts bleibt bisher unklar. Eine mögliche Erklärung dazu wäre die reduzierte Erregbarkeit des motorischen Kortex bei Älteren, wobei eine verstärkte Aktivierung erforderlich ist, um eine motorische Reaktion auszulösen (Yordanova et al., 2004). Wenn eine stärkere motorische Aktivierung mit längerer Reaktionszeit verbunden ist, kann diese Aktivierung bei Älteren auch strategische Gründe haben. Bekanntlich tendieren Ältere dazu, eine „genauigkeitsorientierte“ kognitive Strategie zu benutzen, bei der man versucht, die Fehlerrate auf Kosten der längeren Reaktionen gering zu halten. Somit kann die erhöhte motorische CNV als weiterer Mechanismus zur Kompensation altersassoziierter Beeinträchtigung der Reizkategorisierung unter AG-Belastung angesehen werden. Ältere scheinen die Leistungsunterschiede in der einfachen 0-Back-Aufgabe mittels einer erhöhten motorischen Aktivierung komplett ausgleichen zu können, was aber für einen Leistungsausgleich in der komplexeren 2-Back-Aufgabe nicht ausreicht.

Unsere Daten bestätigten die Annahme, dass das FB das AG entlasten und dadurch den Reizkategorisierungsprozess in der 2-Back-Aufgabe verbessern kann. Tatsächlich gingen eine schnellere RZ und verminderter Prozentwert der Omissionen mit kürzerer P3-Latenz einher, was sich im Sinne der Fazilitation der Reizkategorisierung (Verleger et al., 2005) bzw. AG-Aktualisierung (Polich, 2007) interpretieren lässt. Entgegen der Erwartung zeigte sich dieser Effekt nur bei den Jüngeren, nicht bei den Älteren, deren P3-Latenz sich durch das FB nicht änderte und die P3-Amplitude sogar abnahm. Wahrscheinlich war das Antwortfenster von 1,5 s für Ältere zu kurz und konnte auch einen moderaten Zeitdruck herbeiführen. Unter Zeitdruck konnte die FB-Verarbeitung bei Älteren zu einer zusätzlichen Aufgabe werden, die sie aufgrund der unzureichenden Zeit für eine Antwort vernachlässigen mussten.

Diese Erklärung wird durch die feedbackbezogenen EKP-Daten unterstützt. Beim negativen FB kam die FB-Positivierung (FRP) mit der Gipfellatenz von ca. 180 ms bei den Älteren später als bei den Jüngeren. Außerdem zeigten Jüngere eine zweite positive Komponente mit der Gipfellatenz von ca. 330 ms, die als Hinweis auf eine intensivere Verarbeitung des negativen FB bei Jüngeren angesehen werden kann (Abb. 6.7). Somit scheinen Ältere weniger mentale Ressourcen in die FB-Verarbeitung zu investieren, was die Benutzung des FBs zur AG-Entlastung erschweren kann.

### Kompensation auf HK-Ebene

Unsere Daten demonstrieren das unterschiedliche Aktivierungsniveau des kardiovaskulären Systems sowie die unterschiedliche Reaktivität in Bezug auf die AG-Belastung bei älteren und jüngeren Erwerbstätigen. Die von uns gefundene Zunahme sympathischer Aktivierung und Reduktion der parasympathischen Aktivierung bei den Älteren stimmt mit mehreren Studien überein (zum Überblick: Docherty, 2000;

De Meersman & Stein, 2007). Die AG-Belastung (2-Back vs. 0-Back) bewirkte die Erhöhung der sympathischen Aktivierung (Zunahme des SBD) und die Reduktion der parasympathischen Aktivierung (Verminderung der HF-HRV und BRS) bei den Älteren, wobei Jüngere nur mit der Abnahme der parasympathischen Aktivierung auf die AG-Belastung reagierten. Die reziproke Interaktion zwischen beiden Zweigen des autonomen Nervensystems bei Älteren deutet auf erhöhte Anstrengung hin. Dieses Reaktionsmuster ist für einen Stresszustand typisch und dient dazu, die Ressourcen für die Bewältigung eines Stressors schnell zu mobilisieren (Mulder et al., 2003). Im Gegensatz dazu scheinen sich Jüngere mit niedrigeren kardiovaskulären Kosten an die AG-Belastung anzupassen, was ausschließlich durch die Rücknahme der vagalen Kontrolle erreicht wird. Das FB führte zur Verminderung von physiologischen Kosten bei den Jüngeren, was sich in der Rückstellung von HF-HRV und BRS zeigte. Dagegen bewirkte das FB bei den Älteren keine Reduktion/Rückstellung der kardiovaskulären Parameter, was als eine Beeinträchtigung der Erholungsfähigkeit betrachtet werden kann. Darüber hinaus zeigten wir einen Effekt, der in der Literatur bisher nicht berichtet wurde: Die HR bei den Jüngeren ist mit dem „vagalen“ Faktor assoziiert, während sie bei den Älteren mit dem „sympathischen“ Faktor verbunden ist. Somit kann die HR bei den Jüngeren durch die Steigerung bzw. Rücknahme vagaler Einflüsse gesenkt bzw. beschleunigt werden. Dagegen wird die Ab- und Zunahme der HR bei den Älteren vermutlich durch die Reduktion bzw. Steigerung sympathischer Einflüsse erreicht. Es ist bekannt, dass das vagale System schneller auf einen Stressor reagiert als das sympathische System (Berntson et al., 2007). Somit bewirkt die vagal gesteuerte Regulation der HR eine schnellere Anpassung an eine kognitive Belastung bei Jüngeren als bei Älteren, deren HR durch den Sympathikus reguliert wird.

Zusammenfassend scheinen Jüngere die vagale Regulation häufiger in Anspruch zu nehmen, während bei Älteren bei der Bewältigung kognitiver Aufgaben häufiger eine sympathische Regulation erfolgt. Die erhöhte Beteiligung des sympathischen Systems an der Kompensation kognitiver Anforderungen bei Älteren kann für die Entstehung der Herz-Kreislauf-Erkrankungen von Bedeutung sein (Steptoe et al., 1996).

### Effekte der Arbeitsanforderungen

Laut unserer Hypothesen wirken flexible Arbeitsanforderungen positiv auf die kognitive Leistungsfähigkeit im höheren Berufsalter. Dadurch sollten ältere Erwerbstätige mit „flexiblen“ Arbeitsanforderungen eine bessere AG-Leistung zeigen als ältere Erwerbstätige mit „routinierten“ Arbeitsanforderungen. Das konnte jedoch anhand unserer Daten nicht bestätigt werden. Dennoch gab es Effekte auf der neuronalen und kardiovaskulären Ebene, von denen bisher nicht berichtet worden ist.

Die Pbn mit „routinierten“ Arbeitsanforderungen hatten eine altersassoziierte N2-Vergrößerung, während eine altersassoziierte N2-Verkleinerung bei Pbn mit „flexiblen“ Arbeitsanforderungen zu sehen war. Die größere N2-Amplitude bei „routinierten“ Älteren kann deshalb auf die kompensatorische Verstärkung der exekutiven Kontrolle zurückgeführt werden. Dagegen kann die N2-Verkleinerung bei „flexiblen“ Älteren darauf hindeuten, dass solche Anforderungen die Prozesse der Handlungsüberwachung auf Dauer verbessern können, so dass sie vorwiegend automatisch ablaufen. Der Prozess, der sich in der N2 widerspiegelt, kann auch durch den vorausgehenden Prozess beeinflusst werden, der sich im P2-Zeitbereich entwickelte. Dadurch kann das P2/N2-Verhältnis im Sinne der Ressourcenverteilung zwischen beiden Prozessen betrachtet werden. In unserem Experiment ist der größeren P2 bei „flexiblen“ Älteren eine kleinere N2 gefolgt, während nach der kleineren P2 bei „routinierten“

Älteren eine größere N2 kam. Die größere P2 bei „flexiblen“ Älteren weist auf erhöhte Aufmerksamkeitsfokussierung hin, welche den anschließenden Prozess der Konfliktüberwachung in einem mäßigen Umfang erforderte (verringerte N2). Dagegen investierten die „routinierten“ Älteren weniger Ressourcen in die Aufmerksamkeitsfokussierung (verringerte P2), was vermutlich eine erhöhte Konfliktüberwachung nach sich zog (vergrößerte N2). Außerdem war eine altersassoziierte Verlängerung der P3b-Latenz bei „routinierten“ Pbn zu sehen, während kein altersabhängiger Unterschied bei „flexiblen“ Pbn gefunden wurde.

Zusammenfassend deuten die Effekte darauf hin, dass die Arbeitsanforderungen die neuronalen Prozesse der Aufmerksamkeitsfokussierung, Handlungsüberwachung und Reizkategorisierung positiv beeinflussen und damit zur Verbesserung dieser Prozesse im hohen Berufsalter beitragen können.

#### Zusammenhang zwischen den zentralnervösen und Herz-Kreislauf-Prozessen

Das Fz/Pz-Verhältnis, welches auf eine vergrößerte frontale Amplitude zurückzuführen ist, korrelierte negativ mit HRV und BRS. Damit wird die Annahme bestätigt, dass die Beteiligung des Präfrontalkortex zu einer verminderten parasympathischen Aktivität führt. Dieses Ergebnis wird von bildgebenden Studien unterstützt, die einen Zusammenhang zwischen der erhöhten Aktivierung des Präfrontalkortex und der erhöhten sympathischen (Gianaros et al., 2007) bzw. verminderten parasympathischen Aktivierung (Lane et al., 2001) demonstrierten. Unserer Kenntnis nach gibt es bisher keine Daten, die die Interaktionen zwischen Hirn- und Herz-Kreislauf-Systemen anhand von EKP-, EKG- und BD-Maßen zeigen können.

Da eine größere frontale Aktivierung in der Regel mit einer kleineren parietalen Aktivierung einhergeht (sog. „posterior-anterior shift“, Davis et al., 2007), kann auch die verringerte parietale P3 als Zeichen einer vergrößerten Beteiligung des Präfrontalkortex angesehen werden. In der Tat waren die sympathischen Einflüsse umso stärker und die vagalen Einflüsse auf das Herz-Kreislauf-System umso schwächer, je kleiner die parietale P3 war. Dieser Zusammenhang war stärker unter AG-Belastung als in der Bedingung ohne AG-Belastung und wiederum stärker bei den Älteren als bei den Jüngeren ausgeprägt. Dies bestätigt die Hypothese, dass die kompensatorische Aktivierung des präfrontalen Kortex bei Älteren mit Erhöhung der physiologischen Kosten auf kardiovaskulärer Ebene begleitet wird.

## 7.2 Switch-Aufgabe

### Kompensation auf Leistungsebene

Die im Rahmen des Switch-Paradigma durchgeführten Experimente waren nicht nur auf die Replikation der früheren Ergebnisse gerichtet, sondern auch auf die Frage, welche Veränderungen der Switch-Aufgabe zur Verschlechterung oder Verbesserung der Aufgabewechselprozesse bei Älteren führen können. Es ist bekannt, dass die Vorhersehbarkeit des Aufgabewechsels und die externe Hinweisinformationen die Leistung in der Switch-Aufgabe beeinflussen (Kramer et al., 1999; van Asselen & Ridderinkhof, 2001; Koch, 2005; Kray, 2006). Deshalb wurden diese Faktoren in unserer Studie experimentell variiert. Unsere Ergebnisse stehen im Einklang mit anderen Altersstudien und deuten drauf hin, dass Ältere im stärkeren Maße von der Anforderung, unterschiedliche Aufgaben gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis aufrechtzuerhalten und zu koordinieren, betroffen sind, was durch höhere globale Wechselkosten objektiviert werden kann (Kramer et al., 1999; Mayr, 2001; Reimers & Maylor, 2005; Hillmann et al., 2006; Kray, 2006; West & Travers, 2008). Die lokalen Wechselkosten repräsentieren die Fähigkeit, zwischen den bereits vorhandenen Aufgaben zu wechseln, wobei die irrelevante Aufgabe inhibiert und die relevante aktiviert wird. Diese Fähigkeit scheint altersresistent zu sein, denn man findet üblicherweise keine altersassoziierten Unterschiede in den lokalen Wechselkosten (Kramer et al., 1999; Kray & Lindenberger, 2000; Mayr, 2001; Reimers & Maylor, 2005). Unserer Kenntnis nach, gibt es nur zwei Studien, die abweichende Ergebnisse fanden, die zum größten Teil auf die methodischen Unterschiede zurückzuführen sind. Friedman et al. (2007) benutzten sehr seltene Wechseldurchgänge (10 % von den Gesamtdurchgängen) und fanden höhere lokale Wechselkosten bei Älteren, aber keinen altersabhängigen Unterschied in den globalen Wechselkosten. Für die Berechnung der globalen Wechselkosten wurden im gemischten Block nur die Wiederholungsdurchgänge genommen, die unmittelbar den Wechseldurchgängen vorhergingen und gleichzeitig nach mehreren Wiederholungsdurchgängen folgten. Es ist daher ein starker Übungseffekt bei Älteren anzunehmen, der zur Verkürzung der RZ in den Wiederholungsdurchgängen im gemischten Block und als Folge dazu zur Verringerung der globalen Wechselkosten beitrug. Die ungewöhnlich höheren lokalen Kosten bei Älteren erklären die Autoren durch die geringere Fähigkeit von Älteren, die Aufmerksamkeitsressourcen den seltenen relevanten Reizen zur Verfügung zu stellen. Auch Kray et al. (2002) fanden dieselben Alterseffekte auf lokale und globale Wechselkosten, obwohl sie einen höheren Anteil von Wechseldurchgängen verwendet haben (von 37.5 % bis 75 %) als Friedman et al. (2007). Die höheren lokalen Wechselkosten bei Älteren wurden durch das verringerte pre-experimentelle Training erklärt, das im Hauptversuch zum Nachteil für Ältere geworden war. Gleiche globale Wechselkosten bei Älteren und Jüngeren waren laut Autoren eine Folge der Unvorhersehbarkeit des häufigen Aufgabewechsels, welche belastend für beide Gruppen war und zum Ausgleich der altersabhängigen Unterschiede führte. Somit müssen die o. g. methodischen Aspekte bei der Bewertung der Alterseffekte in den globalen und lokalen Wechselkosten berücksichtigt werden.

Die Annahme einer intakten Fähigkeit von Älteren, zwischen den Aufgaben zu wechseln, kann durch unsere Ergebnisse bestätigt werden, denn es gab keine Altersunterschiede in den lokalen Wechselkosten in beiden Blöcken, in denen die Hinweisinformationen dargeboten wurden. Mehr noch: im Block ohne Hinweis zeigten Ältere sogar niedrigere lokale Wechselkosten als Jüngere, was auch eine Übereinstimmung mit anderen Ergebnissen findet (Kray, 2006) und keinerlei kognitive Defizite bei Jüngeren bedeutet. Dieser Effekt kann als Folge einer Kompensation bei Älteren angesehen

werden, denn die Reduktion von lokalen Wechselkosten wird durch die Verlangsamung der Reaktionen sowohl bei Wechsel- als auch bei Wiederholungsdurchgängen erreicht und kann auf die sog. „genauigkeitsorientierte“ Strategie zurückgeführt werden (De Jong, 2001). Die Strategie besteht darin, die Reaktionszeit auf alle Reize unabhängig von ihrer Komplexität zu verlängern, um sich besser auf den Aufgabewechsel vorzubereiten und dadurch die Fehlerwahrscheinlichkeit zu senken. Diese kompensatorische Strategie bei Älteren hat jedoch einen klaren Nachteil – sie ist unflexibel und kostet mehr Ressourcen. Denn sowohl bei komplexen Wechseldurchgängen als auch bei einfachen Wiederholungsdurchgängen wird derselbe Verarbeitungsaufwand betrieben, der sich in den gleichen Reaktionszeiten für beide Durchgangstypen widerspiegelt. Dagegen wird der Verarbeitungsaufwand bei Jüngeren für die einfacheren Durchgänge im Vergleich zu den komplexeren stark reduziert, worauf die verkürzten Reaktionszeiten auf Wiederholungsdurchgänge im Vergleich zu den Wechseldurchgängen hinweisen (Monsell & Mizon, 2006). Solche „ressourcensparende“ Strategie kann für die erhöhten lokalen Kosten bei Jüngeren im Block ohne Hinweis verantwortlich sein.

Im Vergleich zu den o. g. Studien, die altersabhängige Unterschiede in den globalen Wechselkosten in der Bedingung mit irregulärem Wechsel und Hinweis fanden, zeigten unsere älteren und jüngeren Pbn unter ähnlichen Bedingungen die gleichen globalen Wechselkosten in der RZ sowie in der Fehlerrate, was unsere früheren Ergebnisse repliziert (Gajewski et al., 2010). In den typischen Switch-Paradigmen wird zwischen zwei Aufgaben gewechselt, der Hinweis wird mit einem zeitlichen Abstand vor dem Zielreiz präsentiert, um eine Vorbereitungsöglichkeit zu gewährleisten, außerdem wird ein relativ langes Antwortfenster (3000 ms und länger) gegeben, um den Zeitdruck zu vermeiden. Dagegen mussten die Pbn in unserem Experiment zwischen drei (statt zwei) Aufgaben wechseln, der Zielreiz und der Hinweis wurden simultan dargeboten und ein kürzeres Antwortfenster (2000 ms) verwendet. Diese Aufgabeparameter in Kombination mit der unvorhersehbaren Aufgabenabfolge schlossen jede Vorbereitungsöglichkeit zum Aufgabewechsel aus und simulierten gleichzeitig einen mäßigen Zeitdruck. Vermutlich wurden Pbn beider Altersgruppen dadurch an ihre Kapazitätsgrenzen gebracht, was zum Verschwinden der Altersunterschiede in den globalen Wechselkosten führte.

Die meisten Studien im Rahmen des Switch-Paradigmas berichten über die Altersunterschiede in der RZ, jedoch nur selten in der Fehlerrate. Kray (2006) fand nicht nur eine längere RZ, sondern auch eine höhere Fehlerrate bei Älteren, unabhängig davon, ob ein externer Hinweis dargeboten wurde oder nicht. Nach unseren Daten war eine höhere Fehlerrate bei Älteren nur in der Bedingung ohne Hinweis zu sehen. Dies ist dadurch zu erklären, dass Ältere häufiger aus dem Takt gerieten, weil sie Probleme damit hatten, die Abfolge des Regelwechsels aus dem AG abzurufen, und weil sie sich schlechter zum Aufgabewechsel vorbereiteten als Jüngere. Dagegen konnten Ältere die Unterschiede in der Fehlerrate in der Bedingung mit dem regulären Wechsel und Hinweis völlig ausgleichen.

Die Kombination regulärer Aufgabeabfolge mit der Hinweisinformation lässt die Überprüfung der Annahme zu, dass die Altersunterschiede in den globalen Wechselkosten durch eine externe, aber redundante Hinweisinformation reduziert werden können. Einerseits wurde davon ausgegangen, dass Ältere von einem redundanten Hinweis zusätzlich unterstützt werden können, weil sie sich im verstärkten Umfang auf externe Hinweise verlassen (Touron et al., 2004). Andererseits haben Ältere Probleme, die irrelevante (redundante) Information zu inhibieren (Stevens et al., 2008), deshalb kann sich der redundante Hinweis auf sie auch störend auswirken.

Dagegen sollten sich Jüngere beim Aufgabewechsel vorwiegend auf ihr Gedächtnis verlassen und der redundante Hinweis sollte ihre Leistung nur geringfügig beeinflussen. Vergleicht man den Block mit redundantem Hinweis und den Block ohne Hinweis, sieht man deutlich, dass bei Älteren im Block mit redundantem Hinweis eine stärkere Reduktion der Fehlerrate als bei Jüngeren zu beobachten ist. Das legt den Schluss nahe, dass sich der externe Hinweis, auch wenn er redundant ist, auf Ältere bei „exekutiven“ Aufgaben leistungsfördernd auswirken kann; dagegen profitieren Jüngere vom Hinweis nur geringfügig, weil sie externe Hinweise vermutlich schnell internalisieren und weiterhin aus dem Gedächtnis abrufen. Somit ist die Kombination beider Faktoren – vorhersehbaren Aufgabewechsel mit dem externen Hinweis – für eine fehlerfreie Ausführung der Switch-Aufgabe bei Älteren von großer Bedeutung. Die Einführung der redundanten Hinweisinformation und dadurch erreichte AG-Entlastung ließ jedoch die altersabhängigen Unterschiede in den globalen Wechselkosten bei der RZ und der Fehlerrate nicht eliminieren. Dieses Ergebnis lässt den Schluss zu, dass nicht die Speicher-, sondern die exekutive Komponente des AGs für die Altersunterschiede in den globalen Wechselkosten verantwortlich ist, was mit den Ergebnissen aus den Gedächtnisexperimenten übereinstimmt (Dobbs & Rule, 1989). Diese Komponente repräsentiert die Prozesse der Aufrechterhaltung und Koordination von konkurrierenden Aufgaben im AG, was auch von anderen Autoren angenommen wurde (Kray & Lindenberger, 2000). Dabei spielen Prozesse der Prioritätenverteilung und Konfliktüberwachung zwischen konkurrierenden Aufgaben eine wichtige Rolle. Eine solche Koordination ist dann erforderlich, wenn derselbe Reiz nach unterschiedlichen Regeln verarbeitet werden muss (Ambiguität) und/oder dieselbe Taste für die Bewertung unterschiedlicher Reizmerkmale benutzt wird (Reiz-Reaktion-Überlappung). Unter Ambiguitäts- und Überlappungsbedingungen sind die Altersunterschiede in den globalen Wechselkosten viel größer, als in den Bedingungen, in denen keine Ambiguität bzw. Überlappung vorliegt, obwohl die AG-Belastung über die Versuchsbedingungen konstant gehalten wird (Mayr, 2001). In unserem Experiment wurden auch die o. g. Faktoren simuliert, da die Pbn die *gleichen* Zahlen nach drei *unterschiedlichen* Regeln verarbeiten und mit *einer* Taste *unterschiedliche* Zahlenmerkmale bewerten mussten (s. Tab. 5.3).

Zusammenfassend waren die altersbezogenen Defizite nur in den Versuchsbedingungen zu sehen, in denen eine Vorbereitung zum Aufgabewechsel möglich war. Dies weist auf die Beeinträchtigungen in exekutiven Prozessen hin, die dieser Vorbereitung zugrunde liegen, vor allem in der Aufrechterhaltung und Koordination zwischen konkurrierenden Aufgaben im AG. Dagegen bereitet der Aufgabewechsel per se für Ältere keine Probleme. Die Einführung einer vorhersehbaren Reizabfolge und einer externen Hinweisinformation reichen nicht, die o. g. exekutiven Prozesse bei Älteren qualitativ zu verbessern. Das kann damit verbunden sein, dass die zugrundeliegenden neuronalen Vorgänge bei Älteren weniger effizient ablaufen als bei Jüngeren.

#### Kompensation auf neuronaler Ebene

Mehrere Studien konnten zeigen, dass sich der Prozess des Aufgabewechsels in der Veränderung der parietalen P3b-Komponente widerspiegelt, die für die Hinweis- und Zielreize getrennt betrachtet wird. Die hinweisbezogene P3b ist bei Wechseldurchgängen üblicherweise größer als bei Wiederholungsdurchgängen, während die zielreizbezogene P3 ein genau umgekehrtes Ergebnismuster liefert (Karayanidis et al., 2011; Kieffaber & Hetrick, 2005; Lorist et al., 2000; Poulsen et al., 2001; Rushworth et al., 2002). Bis heute gibt es wenige EKP-Studien im Rahmen des Switch-

Paradigmas, in denen die Altersunterschiede analysiert werden. Die Verarbeitung der Hinweisinformation und Etablierung einer neuen Regel im AG stehen dabei im Mittelpunkt, während die Anwendung dieser Regel auf einen nachfolgenden Zielreiz wenig untersucht wird. Die Daten zu hinweisbezogenen EKPs weisen darauf hin, dass Ältere in der Fähigkeit beeinträchtigt sind, die neuen Regeln im AG abzuspeichern, bevor ein Zielreiz präsentiert wird. Das kann dazu führen, dass die neuen Verarbeitungsregeln bei der Ankunft des Zielreizes nicht ausreichend angewendet werden können (Kray et al., 2005; West, & Moore, 2005; Eppinger et al., 2007; Goffaux et al., 2008). West & Travers (2008) benutzten einen 1000 ms Abstand zwischen dem Hinweis- und Zielreiz und zeigten die gleichen P3s auf die Zielreize in der konstanten Aufgabe und im gemischten Block bei Älteren. Dagegen wurde die übliche Abnahme der P3 im gemischten Block im Vergleich zum konstanten Block bei Jüngeren beobachtet. Der Effekt wurde als altersbezogene Beeinträchtigung der Regelanwendung bzw. AG-Aktualisierung interpretiert. Diese Ergebnisse sind mit unseren Daten aus methodischen Gründen schwer zu vergleichen, denn der Hinweis und der Zielreiz wurden in unserer Studie simultan dargeboten. Dadurch können die hinweisbezogenen Prozesse des Regelabrufs und die zielreizbezogenen Prozesse der Regelanwendung nicht separat betrachtet werden.

Wir fanden schon im konstanten Block, in dem kein Aufgabewechsel erforderlich war, bei Älteren eine kleinere P3b-Amplitude als bei Jüngeren. Obwohl die P3b-Amplitude in gemischten Blöcken bei allen Pbn abnahm, setzten sich die altersabhängigen Unterschiede in den gemischten Blöcken fort. Die Alterseffekte auf die P3b gingen mit altersassoziierten Verlangsamung der RZ einher. Somit kann die P3b-Reduktion in der Switch-Aufgabe als Korrelat der altersassoziierten Defizite angesehen werden, kognitive Ressourcen der Anwendung von Verarbeitungsregeln zur Verfügung zu stellen (Wickens et al., 1983). Mit zunehmender Aufgabenschwierigkeit wurde die zunehmende Aktivierung des Frontalhirns erwartet, die als Korrelat erhöhter Anstrengung und exekutiver Kontrolle betrachtet wird. Diese Annahme kann mit unseren Daten bestätigt werden, denn in der konstanten Aufgabe zeigten beide Altersgruppen ein parietales P3-Maximum, das sich bei Älteren in allen gemischten Blöcken in fronto-zentrale Bereiche verschob. Dieser Effekt wird auch von anderen Autoren beobachtet, die altersassoziierte Beeinträchtigungen des Aufgabewechsels untersuchen, und wird ebenfalls im Sinne „kompensatorischer“ Verstärkung der exekutiven Kontrolle und Ressourcenumverteilung interpretiert (Kray et al., 2005; Eppinger et al., 2007; West & Moore, 2005; West & Travers, 2008; Goffaux et al., 2008; Hillmann et al., 2006).

Zahlreiche Studien belegen, dass die P3b-Latenz die Dauer der Stimulusevaluationsprozesse widerspiegelt (zum Überblick: Pritchard, 1981). In unserer Switch-Aufgabe spiegelt die P3b-Latenz vermutlich die Dauer des Regelanwendungsprozesses wider, der bei Älteren mehr Zeit in Anspruch nimmt als bei Jüngeren, und zwar sowohl bei einfachen als auch bei komplexen Aufgaben. Eine Ausnahme betraf den Block ohne Hinweis, in der die Verarbeitungsregel aus dem AG abgerufen werden musste. Die gleichen P3b-Latenzen in beiden Gruppen weisen darauf hin, dass der zeitliche Ablauf des Abrufprozesses bei Älteren und Jüngeren gleich ist und nicht als Ursache für die altersbezogene Leistungsdefizite in dieser Versuchsbedingung angesehen werden soll.

Die altersbezogene N2-Verzögerung in unserem Experiment kann als eine Beeinträchtigung der Handlungsüberwachung und Konflikterkennung angesehen werden, welche zur Interferenz zwischen unterschiedlichen Verarbeitungsregeln führen kann. Diese Annahme wird durch den positiven Zusammenhang zwischen der N2-Latenz



und den Wechselkosten gestützt (Gajewski et al., 2010). Manche Studien weisen darauf hin, dass die N2-Komponente mit der Ne-Komponente eng verbunden ist, denn beide reflektieren einen gemeinsamen exekutiven Prozess, der einerseits die Interferenz zwischen unterschiedlichen Reaktionstendenzen erkennt und andererseits motorische Fehler detektiert (Mathalon et al., 2003). Deshalb kann die verzögerte Konflikterkennung mit einer verringerten Fehlerdetektion bei Älteren einher gehen, die sich in einer reduzierten Ne-Amplitude bei Älteren niederschlägt. Dieser Effekt war in unserem Experiment deutlich zu sehen und stimmt mit früheren Ergebnissen überein (Falkenstein et al., 2001). Mehrere Ursachen dieses Effekts sind denkbar, z. B. dass Ältere weniger Ressourcen in die Fehlerverarbeitung investieren oder ihre kognitiven Fehler tatsächlich schlechter erkennen. Es kann auch sein, dass Älteren bei kurzen Antwortintervallen wenig Zeit bleibt, die Fehler zu verarbeiten, denn die Ne-Amplitude nimmt unter Zeitdruck ab (Falkenstein et al., 1994).

Nach unseren Hypothesen findet die Kompensation von altersassoziierten Beeinträchtigungen in den Prozessen des Aufgabewechsels statt, die mit Umverteilung der kognitiven Ressourcen begleitet werden. Ein Hinweis darauf ist die Erhöhung der okzipitalen N1-Amplitude bei den Älteren im Vergleich zu den Jüngeren, was auch von anderen Autoren gefunden wurde (Yordanova et al., 2004). Vermutlich reflektiert dieser Effekt bei Älteren die Umverteilung der kognitiven Ressourcen auf frühere Verarbeitungsstufen, unter anderem auf die Reizidentifikation, um eine schnellere und intensivere Verarbeitung des Hinweises und des Zielreizes zu leisten.

Die Erhöhung der frontalen P2-Komponente in allen gemischten Blöcken im Vergleich zum konstanten Block kann einen weiteren kompensatorischen Mechanismus widerspiegeln, der mit der Erhöhung der Aufmerksamkeitsfokussierung verbunden ist und dazu dient, eine weitere Verarbeitung zu erleichtern (Luck & Hillyard, 1994). In den bisherigen Switch-Studien gibt es keine Daten über die frontale P2-Komponente. Von anderen Studien kann man jedoch ableiten, dass die frontale P2 nicht nur im Sinne unspezifischer Erhöhung fokussierter Aufmerksamkeit zu betrachten ist. Diese Aufmerksamkeitsfokussierung scheint auch andere Prozesse zu unterstützen, wie die Identifikation relevanter Reizmerkmale und/oder den Vergleich der aktuellen und der im Gedächtnis abgespeicherten Reize (Luck & Hillyard, 1994). Bei der simultanen Präsentation des Hinweis- und Zielreizes in unserer Switch-Aufgabe scheint eine schnelle Identifikation des Hinweisreizes von entscheidender Bedeutung zu sein, denn die Verarbeitungsregeln müssen innerhalb von 200 Millisekunden vom Hinweis extrahiert (bzw. vom AG abgerufen) werden, bevor sie an den Zielreiz angewendet werden können. Somit kann die P2 als Korrelat der Regelextraktion angesehen werden (Kieffaber & Hetrick, 2005). Die vergrößerte P2 bei Älteren kann als altersbezogene Ressourcenallokation zugunsten der selektiven Aufmerksamkeit interpretiert werden, die den Prozess der Regelextraktion bei Älteren erleichtert. Darüber hinaus verlängerte sich die P2-Latenz bei Jüngeren mit steigender Aufgabeschwierigkeit, während bei Älteren keine Veränderung der P2-Latenz gefunden wurde. Das legt den Schluss nahe, dass Ältere mit ihren Aufmerksamkeitsressourcen weniger flexibel umgehen als Jüngere.

Die reaktionsbezogene CNV war bei den Älteren im Vergleich zu den Jüngeren in den Bereichen größer, die kontralateral zur Antworthand lagen. Ein ähnlicher Effekt wurde auch in anderen experimentellen Paradigmen beobachtet und damit erklärt, dass Ältere eine reduzierte Erregbarkeit des motorischen Kortex haben; dabei wird eine verstärkte Aktivierung erforderlich, um eine motorische Reaktion auszulösen (Yordanova et al., 2004; Wild-Wall et al., 2007; Wild-Wall et al., 2008). Darüber hinaus ist auf der Abb. 6.20B auch eine negativere ipsilaterale CNV bei Älteren sichtbar,

welche auf eine schwächere Inhibition der ipsilateralen motorischen Areale hindeutet. Das kann zu einer Interferenz auf motorischer Ebene und somit zur Verlangsamung bei Älteren beitragen.

#### Kompensation auf HK-Ebene

Erwartungsgemäß zeigte sich während des Experiments eine altersassoziierte Reduktion der parasympathischen Aktivität (reduzierte BRS und HF-HRV). Diese Reduktion war jedoch belastungsunabhängig, d. h. beide Altersgruppen wiesen die gleiche kardiovaskuläre Reaktivität auf kognitive Belastung auf. Dies kann damit erklärt werden, dass die Switch-Aufgabe auch für Jüngere beanspruchend war, so dass sie sich genauso wie Ältere anstrengen mussten, um ihre Leistung stabil zu halten.

In der vorliegenden Studie fanden wir auch keinen Unterschied in der SBD-Reaktivität auf kognitive Belastung zwischen Jüngeren und Älteren. Obwohl die Erhöhung der sympathischen Aktivität bei Steigerung der Aufgabeschwierigkeit in beiden Gruppen beobachtet wurde, ist diese Erhöhung bei Älteren und Jüngeren auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen, wie es die Korrelationsanalyse zeigte. Da der negative Zusammenhang zwischen der P3 und dem Blutdruck nur bei Älteren und nicht bei Jüngeren gefunden wurde, scheint der erhöhte Blutdruck bei Älteren eine kompensatorische Reaktion auf die Beeinträchtigungen neuronaler Prozesse zu sein, die der Regelanwendung beim Aufgabewechsel zugrunde liegen. Dagegen könnte die Blutdrucksteigerung bei Jüngeren eine automatische situationsbedingte Anpassungsreaktion auf Steigerung der Aufgabenschwierigkeit darstellen.

#### Effekte der Arbeitsanforderungen

Es wurde angenommen, dass sich die hohen Arbeitsanforderungen an die kognitive Flexibilität positiv auf die exekutiven Funktionen auswirken. Dadurch sollten Erwerbstätige von „flexiblen“ Arbeitsanforderungen eine bessere Leistung in der Switch-Aufgabe, eine effektivere Informationsverarbeitung auf Neuronaler Ebene und geringere physiologische Kosten der Anpassung an die kognitive Belastung zeigen als Erwerbstätige mit „routinierten“ Arbeitsanforderungen. Entgegen dieser Annahme gab es keinen Effekt der Arbeitsanforderungen auf die Leistung und die kardiovaskulären Parameter. Es zeigten sich aber Berufseffekte auf der neuronalen Ebene, da eine altersassoziierte Vergrößerung der N2 und Verzögerung der P3 bei „routinierten“ Pbn zu sehen war. Somit können im hohen Berufsalter „routinierte“ Arbeitsanforderungen die Implementierung von sich abwechselnden Handlungsanweisungen beeinträchtigen. Dagegen zeigten die „flexiblen“ Pbn keine altersassoziierte P3-Verzögerung in den Bedingungen, die eine Vorbereitung zum Aufgabewechsel ermöglichen. Dies deutet darauf hin, dass „flexible“ Arbeitsanforderungen exekutive Kontrollprozesse mit zunehmendem Alter positiv beeinflussen können.

### **7.3 Clock-Aufgabe**

#### Kompensation auf Leistungsebene

Die von uns ermittelten Leistungsdaten bestätigen die Hypothese über die altersbezogene Beeinträchtigung der motorischen Vorbereitung. Ältere erreichten weniger Treffer im  $\pm 20^\circ$ -Segment. Somit arbeiten sie in dieser Aufgabe weniger genau als Jüngere. Das ist auch bei den Werten der absoluten mittleren Abweichung zu erkennen, wo die Älteren eine signifikant größere Abweichung aufweisen. Auch die Anzahl der genauen Treffer ist signifikant verschieden zwischen den Altersgruppen, d. h. die

Älteren treffen weniger genau die 12-Uhr-Position. Aufgrund dessen, dass sie eine höhere Reaktionsvariabilität und somit weniger Treffer im  $\pm 20^\circ$ -Segment haben, ist möglicherweise auch die Wahrscheinlichkeit geringer, genaue Treffer zu erzielen.

Die Anzahl der Treffer vor der 12-Uhr-Position und die nach der 12-Uhr-Position sollten einen Hinweis auf eine „liberale“ bzw. „konservative“ kognitive Strategie der Pbn geben. Die „liberale“ Strategie sollte darin bestehen, sofort zu reagieren, wenn sich der Zeiger dem Ziel nähert. Dadurch sollte die Mehrzahl der Treffer *vor* der 12-Uhr-Position landen. Bei der „konservativen“ Strategie soll die Antwort erst dann abgegeben werden, wenn das Ziel mit Sicherheit getroffen wird. Das hätte die Mehrzahl der Treffer *nach* der 12-Uhr-Position zur Folge. Es war zu beobachten, dass Jüngere mehr Treffer vor der 12-Uhr-Position während Ältere mehr Treffer nach der 12-Uhr-Position hatten. Dieser gruppenspezifische Unterschied machte sich auch bei der relativen mittleren Abweichung bemerkbar, da Jüngere einen negativen Wert aufweisen, Ältere hingegen einen positiven. Diese Daten stützen die Hypothese, dass Ältere versuchen, die o. g. motorischen Beeinträchtigungen durch Anwendung einer konservativen kognitiven Strategie zu kompensieren. Ältere reagieren nur dann, wenn sie absolut sicher sind, dass die 12-Uhr-Position erreicht wurde. Deshalb drücken sie in der Regel später als Jüngere und landen häufiger mit ihren Treffern nach der 12-Uhr-Position.

Zusammenfassend kann man erkennen, dass sogar in einer relativ einfachen motorischen Aufgabe die altersabhängigen Unterschiede zu sehen sind, die sich in erster Linie auf die Genauigkeit und zeitliche Stabilität der zielgerichteten motorischen Reaktionen beziehen. Diesen Defiziten können neuronale Beeinträchtigungen zugrunde liegen, die anschließend diskutiert werden. Ältere versuchen diese Defizite auf der Leistungsebene durch eine vorsichtigeren kognitive Strategie zu kompensieren, welche auch bei anderen kognitiven Aufgaben in dieser Studie typisch war und zu den längeren Reaktionszeiten führte.

#### Kompensation auf neuronaler Ebene

Nach unserer Hypothese gibt es altersassoziierte Defizite in der Vorbereitung motorischer Reaktionen, die durch erhöhte Anstrengung kompensiert werden. Diese Annahme wurde durch eine höhere CNV-Amplitude bei den Älteren im Vergleich zu den Jüngeren bestätigt und steht im Einklang mit Ergebnissen anderer Untersuchungen, die ebenso eine erhöhte CNV bei den Älteren fanden und als kompensatorische Anstrengung interpretierten (Yordanova et al., 2004, Wild-Wall et al., 2007). In den Studien zur physischen Fitness wurde bei jüngeren unfitten Pbn eine größere frontale CNV als bei fitten Pbn gefunden, was ebenso auf eine kompensatorische Anstrengung und einen größeren Ressourcenaufwand bei unfitten Pbn hinweist, wenn diese aufgefordert werden, eine Gedächtnisaufgabe möglichst schnell zu lösen (Kamijo et al., 2010). Es gibt jedoch Arbeiten, die über eine geringere CNV bei Älteren im Vergleich zu den Jüngeren berichten (Bennett et al., 2004; Sterr & Dean, 2008). Dieser Effekt kann auf Versuchsanordnungen zurückgeführt werden, in denen bei den Pbn eine subjektive Unsicherheit bezüglich der auszuführenden Aufgabe stimuliert wurde. In diesen Studien wurden neben validen Hinweisen, die eine bevorstehende Reaktion ankündigten, in 20 % der Trials auch invalide Hinweise verwendet, nach denen sich Pbn eigentlich auf die Aufgabe A vorbereiten sollten, dann aber die Aufgabe B präsentiert wurde. Es besteht die Möglichkeit, dass sich Ältere durch die invaliden Hinweise verunsichert fühlten und die Versuchsanforderungen als teilweise unkontrollierbar empfanden, was die Reduktion der Anstrengung und dementsprechend die

Verringerung der CNV zur Folge hatte<sup>6</sup>. Diese Interpretation stimmt mit den Ergebnissen von Van Asselen & Ridderinkhoff (2000) überein, die ebenfalls in 20 % der Trials invalide Hinweise in einer Switch-Aufgabe präsentierten. Ältere zeigten dabei höhere Wechselkosten als Jüngere. Das weist auf Probleme von Älteren hin, effektiv mit Situationen umgehen zu können, die durch eine hohe Unsicherheit bezüglich der Handlungsanweisung und fehlende Vorbereitungsmöglichkeit charakterisiert sind.

Wenn die CNV als Korrelat der Anstrengung angesehen wird, ist es auch wichtig zu wissen, ob sich diese Anstrengung ausschließlich auf motorische Prozesse bezieht oder durch andere kognitive Prozesse zustande kommt. Konkret bedeutet das, zu klären, welche Gehirnareale während der Aufgabeausführung „angestrengt“ werden, d. h. ob es sich dabei um eine zusätzliche Aktivierung der spezifischen Hirnbereiche handelt (z. B. des motorischen Kortex) oder ob auch andere kognitive Prozesse an der Reaktionsvorbereitung beteiligt sind. Letzteres würde eine kompensatorische Anstrengung als unspezifische Aktivierung darstellen, bei der mehrere Gehirnareale oder sogar mehrere Systeme des Organismus aktiviert würden. Yordanova et al. (2004) lassen beide Erklärungen zu: Zum einen kann die erhöhte CNV bei den Älteren durch höhere Schwellen der motorischen Neurone bedingt sein, was an einer Abschwächung der Überleitung vom Zwischenhirn zum motorischen Kortex liegen kann (Volkow et al., 1998) und bei Älteren zur Folge hat, dass die motorischen Neurone stärker aktiviert werden müssen, um eine Reaktion auszulösen. Zum anderen bieten die Autoren als alternative Erklärung, dass Ältere eine konservative, genauigkeitsorientierte Strategie anwenden. Danach reagieren Ältere erst dann, wenn sie sich der Richtigkeit der Reizanalyse absolut sicher sind. Das ist aber nur dann möglich, wenn das hohe Aktivierungsniveau des motorischen Kortex, welches eigentlich für eine Reaktion bereits gereicht hätte, aus strategischen Gründen weiter erhalten bleibt. Es sollen dabei auch nicht-motorische Prozesse involviert sein, um die längere Aktivierung der motorischen Hirnareale zu unterstützen. In einer Switch-Aufgabe fanden Kray et al. (2005) im Zeitintervall von Hinweisreiz zum Zielreiz eine bei Älteren im Vergleich zu Jüngeren höhere CNV über dem motorischen Areal (Cz-Ableitung), obwohl keine motorische, sondern eine kognitive Reaktion erforderlich war (d. h. die Inhibition der alten und die Aktivierung der neuen Verarbeitungsregel). Dies stützt die Annahme, dass andere kognitive Prozesse zu der erhöhten motorischen Aktivierung beitragen und somit eher für eine unspezifische Natur der Anstrengung sprechen. Die nähere Betrachtung unserer Daten gibt weitere Hinweise darauf, dass die motorischen Prozesse bei Älteren durch andere kognitive Prozesse unterstützt werden können. Zum einen ist auf Abb. 6.21 deutlich zu erkennen, dass die altersabhängigen Unterschiede in der CNV schon vor dem ersten Zeigerumlauf zu beobachten sind, d. h. in der Zeitperiode, in der keine motorische Reaktion erfolgen musste, sondern vorwiegend Aufmerksamkeitsprozesse gefordert waren (wie z. B. Verfolgen des Zeigers, Mitzählen der Umläufe, etc.). Zum anderen generalisierte sich der Alterseffekt über den motorischen Kortex hinweg. Diese Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass die Anstrengung bei Älteren eher unspezifischer Natur ist und mit der Aktivierung von mehreren neuronalen Netzwerken, die an der Reaktionsvorbereitung beteiligt sind, verbunden ist.

### Kompensation auf HK-Ebene

Ältere zeigten im Vergleich zu den Jüngeren eine reduzierte BRS, LF-HRV und HF-HRV, was auf verringerte vagale Einflüsse zurückzuführen ist (De Meersman & Stein,

<sup>6</sup> Die Anstrengungsreduktion unter subjektiver Unkontrollierbarkeit einer Situation ist ein bekanntes Phänomen aus den Studien zur sog. „erlernten“ Hilflosigkeit (Seligman, 1975).

2007). Der erhöhte systolische BD bei den Älteren unter Belastung kann als Zeichen der kompensatorischen Anstrengung auf der Herz-Kreislauf-Ebene angesehen werden. Dieses Ergebnis stimmt mit der kompensatorischen Anstrengung auf der Gehirnebene (erhöhte CNV) überein. In der Tat ergab sich eine positive Korrelation zwischen der CNV-Amplitude und dem systolischen BD nur für Ältere, nicht aber für Jüngere. Daraus lässt sich schließen, dass kognitive Anstrengung bei Älteren mit der Aktivierung des sympathischen Systems einhergeht und langfristig für kardiovaskuläre Erkrankungen von Bedeutung sein kann.

#### Effekte der Arbeitsanforderungen

Obwohl es keinen Leistungsunterschied zwischen den Gruppen mit unterschiedlichen Arbeitsanforderungen gab, mussten sich die Pbn mit den routinierten Arbeitsanforderungen bei der motorischen Vorbereitung mehr anstrengen als die Pbn mit den flexiblen Arbeitsanforderungen, was sich in einer größeren CNV bei den „routinierten“ Pbn niederschlug. Außerdem zeigten die „routinierten“ Pbn eine verringerte Erholung des systolischen Blutdrucks nach der Belastung als die „flexiblen“ Pbn. Zusammenfassend weisen diese Ergebnisse darauf hin, dass routinierte Arbeitsanforderungen zu einer höheren Anstrengung auf der neuronalen und kardiovaskulären Ebene bei der motorischen Vorbereitung beitragen können.

## **8 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie sind in der Tab. 8.1 zusammengefasst.

**Tab. 8.1** Zusammenfassung der Hauptergebnisse

Kognitiver Prozess	Operationalisierung/Aufgabe	Ergebnis	Mögliche Interpretation
<p><b>Wahrnehmung:</b> Früherkennung relevanter Informationen</p>	<p>0-Back, konstante Blöcke der Switch-Aufgabe, bei Älteren im Vergleich zu Jüngeren:</p>	<p><u>Leistungsebene:</u> keine Altersunterschiede</p> <p><u>Neuronale Ebene:</u> größere N1-Amplitude</p> <p><u>Herz-Kreislauf-Ebene:</u> höherer SBD, niedrigere HF-HRV und BRS</p>	<p>gute kognitive Leistungsfähigkeit, wenn das Arbeitsgedächtnis wenig belastet ist und die exekutive Kontrolle geringfügig beansprucht wird</p> <p>kompensatorische Aktivierung bei der Früherkennung relevanter Informationen bei Älteren</p> <p>kompensatorische Aktivierung des sympathischen Systems, geringere Aktivierung des parasympathischen Systems, erhöhte physiologische Kosten bei Älteren.</p>
<p><b>Selektive Aufmerksamkeit:</b> Selektion relevanter Informationen aus den irrelevanten</p>	<p>0-Back, konstante Blöcke der Switch-Aufgabe, bei Älteren im Vergleich zu Jüngeren:</p>	<p><u>Leistungsebene:</u> keine Altersunterschiede</p> <p><u>Neuronale Ebene:</u> größere P2-Amplitude</p> <p><u>Herz-Kreislauf-Ebene:</u> höherer SBD, niedrigere HF-HRV und BRS</p>	<p>gute kognitive Leistungsfähigkeit, wenn das Arbeitsgedächtnis wenig belastet ist und die exekutive Kontrolle geringfügig beansprucht wird</p> <p>kompensatorische Erhöhung der Aufmerksamkeitsfokussierung bei Älteren</p> <p>kompensatorische Aktivierung des sympathischen und verminderte Aktivierung des parasympathischen Systems, somit erhöhte physiologische Kosten bei Älteren</p>
<p><b>Motorik:</b> Vorbereitung und Ausführung motorischer Reaktionen</p>	<p>Clock, bei Älteren im Vergleich zu Jüngeren:</p>	<p><u>Leistungsebene:</u> weniger Treffer und größere Abweichung vom Ziel</p>	<p>altersassoziierte Verminderung der Genauigkeit und Erhöhung der Variabilität der Leistung, wenn Aufgaben eine präzise zeitliche Planung motorischer Reaktionen erfordern</p>

		<p><u>Neuronale Ebene:</u> größere CNV</p> <p><u>Herz-Kreislauf-Ebene:</u> höherer SBD, niedrigere BRS und HF-HRV unter Belastung</p>	<p>Bewältigung der Aufgabenanforderungen durch erhöhte Anstrengung</p> <p>kompensatorische Aktivierung des sympathischen und verminderte Aktivierung des parasympathischen Systems, somit erhöhte physiologische Kosten bei Älteren</p>
<p><b>Arbeitsgedächtnis:</b> Abruf und Aktualisierung handlungsrelevanter Informationen</p>	<p>2-Back, 2-Back mit FB, bei Älteren im Vergleich zu Jüngeren:</p>	<p><u>Leistungsebene:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- langsamere Reaktionen, mehr Falsche Alarmer<sup>7</sup> und Omissionen<sup>8</sup> unter 2-Back;</li> <li>- gleiche Anzahl von Omissionen unter FB in beiden Altersgruppen</li> </ul> <p><u>Neuronale Ebene:</u> verzögerte N2, verringerte und verzögerte P3b, P3-Frontalisierung, größere N1- und P2-Amplitude, größere CNV</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Beeinträchtigung der AG-Leistung bei hoher AG-Belastung;</li> <li>- partielle Kompensation und Leistungserhöhung durch externe Informationen</li> </ul> <p>Beeinträchtigung von Abruf/Aktualisierung handlungsrelevanter Informationen aus dem Arbeitsgedächtnis bei Älteren; zusätzliche Aktivierung des präfrontalen Kortex zur Kompensation altersassoziierter Beeinträchtigungen</p>

<sup>7</sup> Reaktion auf einen irrelevanten Reiz als ob er relevant wäre

<sup>8</sup> Auslassung eines relevanten Reizes



	<p>Jüngere:</p> <p>Ältere:</p>	<p><u>Herz-Kreislauf-Ebene:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- kein Effekt der AG-Belastung auf den SBD;</li> <li>- Verminderung der BRS und HF-HRV unter AG-Belastung;</li> <li>- Rückstellung der BRS und HF-HRV durch das FB.</li> <li>- Zunahme des SBDs unter AG-Belastung;</li> <li>- Verminderung der BRS und HF-HRV unter AG-Belastung;</li> <li>- keine Rückstellung des SBDs, der BRS und der HF-HRV durch das FB</li> </ul>	<p>Bei Älteren im Vergleich zu Jüngeren:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- kompensatorische Aktivierung des parasympathischen und geringere Aktivierung des parasympathischen Systems unter AG-Belastung;</li> <li>- reduzierte Erholungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems nach der AG-Belastung;</li> <li>- verminderte Nutzung externer Informationen unter Zeitdruck</li> </ul>
<p><b>Exekutive Kontrolle:</b> Aufrechterhaltung und Koordination der sich wechselnden und miteinander konkurrierenden Handlungsanweisungen</p>	<p>Switch-Aufgabe, gemischte Blöcke<sup>9</sup>, bei Älteren im Vergleich zu Jüngeren:</p>	<p><u>Leistungsebene:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- längere RZ;</li> <li>- höhere globale Wechselkosten der RZ und Fehlerrate in den Blöcken, in denen eine Vorbereitung zum Aufgabewechsel möglich ist</li> </ul> <p><u>Neuronale Ebene:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- verzögerte N2,</li> <li>- verringerte und verzögerte P3b</li> <li>- P3-Frontalisierung</li> <li>- größere N1- und P2-Amplitude</li> <li>- größere CNV</li> </ul> <p><u>Herz-Kreislauf-Ebene:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- niedrigere BRS und HF-HRV unter Belastung</li> </ul>	<p>altersassoziierte Beeinträchtigung exekutiver Kontrolle, die keine ausreichende Vorbereitung zum Aufgabewechsel gewährleistet</p> <p>altersassoziierte Beeinträchtigung von Aufrechterhaltung und Koordination der sich wechselnden und miteinander konkurrierenden Handlungsanweisungen, zusätzliche Aktivierung des präfrontalen Kortex zur Kompensation der o. g. Beeinträchtigungen</p> <p>geringere Aktivierung des parasympathischen Systems bei Älteren, somit Erhöhung physiologischer Kosten</p>

<sup>9</sup> Blöcke mit sich wechselnden Handlungsanweisungen

## 9 Anwendungsaspekte

Einzelne kognitive Fähigkeiten verändern sich mit dem Alter nicht nur mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Dabei ist eine erhebliche interindividuelle Variabilität zu verzeichnen, die mit dem Alter zunimmt. Die Variabilität innerhalb einer Altersgruppe ist nach Schaie & Baltes (1996) signifikant größer als die Variabilität zwischen den Altersgruppen. Der Anteil der Probanden dieser Studie, die nach sieben Jahre keine Veränderungen der kognitiven Leistungen aufwiesen, beträgt in der Gruppe der 60-Jährigen ca. 62 % und bei denen, deren Leistungen abnahmen, ca. 27 %. Es gibt auch Probanden, deren Leistungen sich sogar verbesserten (ca. 10 %). Das bedeutet, dass es einen großen Anteil von Älteren gibt, deren kognitive Fähigkeiten stabil bleiben oder sogar zunehmen. Dieser Befund ist für die Bewertung der kognitiven Leistungsfähigkeit von Arbeitnehmern im höheren Berufsalter von besonderem Interesse. Daraus kann man folgern, dass der überwiegende Anteil der 60-jährigen Arbeitnehmer in der Lage ist, berufliche Aufgaben erfolgreich auszuführen. Ein frühzeitiges Erkennen kognitiver Leistungsbeeinträchtigungen kann dazu dienen, Maßnahmen zur Verbesserung der kognitiven Leistungsfähigkeit zu empfehlen und umzusetzen. Die Leistungsparameter wie Reaktionszeit oder Antwortfehler stehen am Ende einer Kette von kognitiven Teilprozessen (u. a. Reizidentifikation, fokussierte Aufmerksamkeit, Abruf relevanter Informationen etc.), die zu einer Reaktion geführt haben. Dagegen erlauben die ereigniskorrelierten Hirnpotentiale eine differenzierte Diagnostik altersassoziierter Beeinträchtigungen dieser Teilprozesse. Dies macht eine gezielte Intervention (z. B. kognitives Training) zur Verbesserung dieser Prozesse möglich. Wie unser Kooperationsprojekt PFIFF-2 (<http://www.pfiffprojekt.de/pfiff2/>) zeigte, können die ereigniskorrelierten Hirnpotentiale für die Beurteilung der Wirksamkeit von Trainingsmaßnahmen (PFIFF-2, Abschlussbericht, in Vorb.) genutzt werden.

Die Ergebnisse unserer Studie können auch dazu genutzt werden, um Empfehlungen zu einer altersgerechten Arbeitsgestaltung zu geben. Es zeigte sich, dass eine Leistungsverbesserung bei Älteren durch Einführung externer Hinweise und Rückmeldungen (Feedbacks) über die erbrachten Leistungen erreicht werden kann. Dieses Ergebnis kann zur Optimierung des Zeitablaufs von Arbeitsprozessen angewendet werden. Unter anderem könnten die Arbeitsabläufe so gestaltet werden, dass das Arbeitsgedächtnis und die exekutive Kontrolle möglichst moderat gefordert werden. Die Gestaltung der Arbeitsabläufe sollte die Kontrolle über den Arbeitsprozess ermöglichen, um ihn besser planen und sich für den Wechsel der Arbeitsaufgaben bzw. -operationen rechtzeitig vorbereiten zu können. Gleichzeitig sollten die externen Hilfsinformationen und Feedbacks aufgabenkonform und kontextabhängig gestaltet werden, um ältere Mitarbeiter von aktuellen Aufgaben nicht abzulenken.

Dabei sollte darauf geachtet werden, dass für die Verarbeitung der Rückmeldereize genügend Zeit zur Verfügung steht. Die Feedbackmerkmale sollten klar und einfach gestaltet sein, damit sie von Älteren in vollem Umfang genutzt werden können und nicht von der Aufgabenausführung ablenken. Das geht mit der Aussage einher, dass Ältere dazu neigen, stabile neuronale Netzwerke für die Verarbeitung einer Ablenkaufgabe zu bilden, was anschließend eine schnelle Rückkehr zur Hauptaufgabe verhindert (Clapp et al., 2011). Daraus folgt, dass zu ausführliche oder kontextinkompatible Hilfsinformationen, die viel Aufmerksamkeit erfordern, sich bei Älteren zu Arbeitsunterbrechungen entwickeln können, welche bei der Gestaltung der Arbeitsplätze zu vermeiden sind.

## 10 Allgemeine Schlussfolgerungen

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten.

- In den kognitiven Aufgaben, in denen fokussierte Aufmerksamkeit/Konzentration erforderlich ist, zeigen Ältere keine Leistungsdefizite.
- Leistungsbeeinträchtigungen treten bei Älteren bei hohen Belastungen des Arbeitsgedächtnisses auf (z. B. wenn handlungsrelevante Informationen im Gedächtnis zu halten und zu aktualisieren sind) und beim Reagieren auf ständig wechselnde Handlungsanweisungen.
- Auf der Verhaltensebene können die Leistungseinbußen bei Älteren teilweise durch genauigkeitsorientierte Strategie kompensiert werden. Sie arbeiten langsamer, aber dafür genauer.
- Ältere können die Fehlerrate durch die Nutzung externer Hilfsinformationen und Leistungsfeedbacks verringern.
- Bereits mäßiger Zeitdruck hat negative Auswirkungen auf die Leistung und verhindert die effektive Feedbackbenutzung bei Älteren.
- Ein unvorhersehbarer Aufgabenwechsel führt zu Leistungseinbußen. Das trifft sowohl für Ältere als auch für Jüngere zu.
- Altersassoziierte Leistungsdefizite sind mit Veränderungen neuronaler Prozesse verbunden, die die Umsetzung handlungsrelevanter Informationen in eine Reaktion kontrollieren.
- Altersassoziierte Leistungsbeeinträchtigungen können aufgrund der Plastizität des Gehirns zumindest teilweise ausgeglichen werden. Die Kompensation ist bei Älteren mit der Umverteilung von Verarbeitungskapazitäten verbunden. Eine erhöhte Aktivierung der Reizidentifikation, der Aufmerksamkeitsfokussierung und der motorischen Vorbereitung sind auf neuronaler Ebene nachweisbar.
- Ältere versuchen, Aufgabenanforderungen durch erhöhte Anstrengung zu bewältigen. Dagegen passen sich Jüngere eher durch eine effizientere Nutzung von Leistungsfeedbacks, Fehlerverarbeitung und Anpassung der kognitiven Aufgabe an die Arbeitsbelastungen an.
- Kompensatorische Veränderungen auf der zentralnervösen Ebene sind mit einer erhöhten kardiovaskulären Aktivierung verbunden (erhöhter systolischer Blutdruck, verringerte Herzratenvariabilität und Baroreflexsensitivität). Diese sog. physiologischen Kosten sind bei Älteren höher als bei Jüngeren. Die Ergebnisse weisen auch auf eine verringerte Erholungsfähigkeit Älterer nach der kognitiven Belastung hin.

- Beschäftigte mit eher monotonen Arbeitsanforderungen zeigen im höheren Berufsalter Leistungsbeeinträchtigungen (z. B. Verzögerung des Abrufs handlungsrelevanter Informationen sowie verringerte kardiovaskuläre Erholung nach Belastung).
- Ereigniskorrelierte Potentiale ermöglichen eine objektive Untersuchung spezifischer Informationsverarbeitungsprozesse, die der kognitiven Leistung zugrunde liegen.
- Die Herzratenvariabilität-, Blutdruck und Baroreflexanalyse liefern Informationen über die Anpassungsfähigkeit an mentale Arbeitsbelastungen und physiologische Kosten der kognitiven Leistung.
- Vorliegende Befunde können für die Evaluation der Wirksamkeit von Trainingsmaßnahmen zur Förderung kognitiver Kompetenzen genutzt werden. Dabei zeichnen sich psychophysiologische Parameter durch eine besondere Sensitivität aus.
- Bei altersgerechter Arbeitsgestaltung sollen das Arbeitsgedächtnis und die exekutive Kontrolle möglichst moderat gefordert werden. Die externen Hilfsinformationen und Feedbacks sollen aufgabenkompatibel und kontextabhängig gestaltet werden. Es soll ausreichend Zeit für die Planung des Arbeitsablaufs, Nutzung von Feedbacks und externer Hinweise sowie für die Vorbereitung zum Wechsel der Arbeitsaufgaben gewährleistet werden.

## Publikationen im Rahmen des Projekts

### Artikel in den peer-reviewed Zeitschriften/Büchern

**Schapkin, S.A.; Gajewski, P.D.; Freude, G.:** Age differences in memory-based task switching with and without cues: An ERP study. *Journal of Psychophysiology* (2012), (submitted)

**Schapkin, S.A.; Freude, G.; Gajewski, P.D.; Wild-Wall, N.; Falkenstein, M.:** Effects of Working Memory Load on Performance and Cardiovascular Activity in Younger and Older Workers. *International Journal of Behavioral Medicine* (2011), DOI: 10.1007/s12529-011-9181-6

**Gajewski, P.D.; Wild-Wall, N.; Schapkin, S.A.; Erdmann, U.; Freude, G.; Falkenstein, M.:** Effects of Aging and Job Demands on cognitive flexibility assessed by task switching. *Biological Psychology* (2010), 85, 187-192

**Schapkin, S.A.; Freude, G.; Erdmann, U.; Ruediger, H.:** Stress and managers performance: age-related changes in psychophysiological reactions to cognitive load. In: D. Harris (Ed.) *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics* (2007), Heidelberg: Springer, 415-425

**Schapkin, S.A.; Freude G.:** Kompensation alterbezogener Änderungen kognitiver Fähigkeiten - psychophysiologische Untersuchungsansätze. *Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Umweltmedizin* (2006), 12, 546-551

### Kongressbeiträge

**Schapkin, S.A.; Freude, G.:** Can a redundant cue compensate for age-related deficits in executive functioning? An ERP study of task switching. *Frontiers in Human Neuroscience*. doi: 10.3389/conf.fnhum.2011.207.00551

**Fischer, T.; Strobel, A.; Schapkin, S.A.:** Age- and performance related modulations in spectral event-related dynamics during a working memory task. *Frontiers in Human Neuroscience* doi: 10.3389/conf.fnhum.2011.207.00547

**Schapkin, S.A.; Freude, G.:** Compensation of age-related impairments in working memory. *Journal of Psychophysiology* (2011), Suppl. 1, p.26

**Shadlovsky, E.L.; Kovaliov, Y.T.; Schapkin, S.A.:** Cognitive training in older employees. *Journal of Psychophysiology* (2011), Suppl. 1, p.44

**Schapkin, S.A.; Freude, G.; Falkenstein, M.:** Performance feedback reduces working memory load: age differences in brain processes and cardiovascular activity. *Zeitschrift für Gerontologie* (2010), 43, 1, 38

**Schapkin, S.A.; Freude, G.:** Age-related feedback effects on working memory performance and brain activity. *Human Cognitive Neurophysiology* (2010), 3, 41-42

**Schapkin, S.A.; Freude, G.:** Target categorization and motor processes under working memory load: Effects of age and performance feedback. 16th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping (2010), Barcelona. <http://ww3.aievolution.com/hbm1001/index.cfm?do=abs.viewAbs&abs=3969>

**Freude, G.; Schapkin, S.A. & Erdmann, U.:** Geistige Leistungsfähigkeit und altersassoziierte Veränderungen: Kompensation und physiologische Kosten. 55. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (2009). Dortmund

**Schapkin, S.A.; Freude, G.:** Age effects on event-related potential and cardiovascular activity in a working memory task. *Psychophysiology* (2009), 46, Supplement1, 89

**Schapkin, S.A.; Freude, G.:** Der Einfluss von Alter und Leistungsrückmeldung auf Hirnaktivität in einer Arbeitsgedächtnisaufgabe. 35. Arbeitstagung Psychophysiologie und Methodik (2009). Leipzig, 137

**Schapkin, S.A.; Freude, G.:** Age-related changes of executive functioning. The IIIrd International Conference on Cognitive Science (2008). Moscow. 493

**Schapkin, S.A.; Freude, G.:** Age-related effects on working memory performance and P300. *International Journal of Psychology* (2008), 43, 473

**Schapkin, S.A.; Freude, G.:** ERP correlates of target categorization and memory recall: Effects of age and performance feedback. The Xth International Conference on Cognitive Neuroscience (2008). Bodrum, 158

**Schapkin, S.A.; Freude, G.:** Age-related changes in brain activity and cardiovascular reactivity to working memory load. The 11<sup>th</sup> European Congress of Psychology (2009). Oslo (CD version)

## **Diplomarbeiten im Rahmen des Projekts F2152**

**Baar, J.:** Die CNV im Altersvergleich bei Bearbeitung der Clock Monitoring Task. Humboldt-Universität zu Berlin, (2011), Berlin

**Melenevski, I.:** Kognitive Leistungsfähigkeit bei älteren und jüngeren Erwerbstätigen mit unterschiedlichen beruflichen Anforderungen – eine EKP-Studie. Humboldt-Universität zu Berlin, (2011), Berlin

**Kommel, C.:** Kognitive Leistungen und deren physiologische Kosten bei älteren und jüngeren Erwerbstätigen. Humboldt-Universität zu Berlin, (2010), Berlin

**Winkler, C.:** Altersabhängige Veränderungen exekutiver Kontrollfunktionen – ein psychophysiologischer Untersuchungsansatz. Universität Potsdam, (2010), Potsdam

## Literaturverzeichnis

**Alain, C.; Woods, D.L.:** Signal clustering modulates auditory cortical activity in humans. *Perception & Psychophysics* (1994), 56, 501-526

**Backs, R.W.; Rohdy, J.; Barnard, J.:** Cardiac control during dual-task performance of visual or auditory monitoring with visual-manual tracking. *Psychologia: An International Journal of Psychology in the Orient* (2005), 48, 66-83

**Baddeley, A.D.; Hitch, G.J.:** Developments in the concept of working memory. *Neuropsychology* (1994), 8, 485-93

**Baltes, P.B.; Baltes, M.M.:** Optimierung durch Selektion und Kompensation. Ein psychologisches Modell erfolgreichen Alterns. *Z. für Pädagogik* (1989), 35, 85-105

**Balzer, W.K.; Doherty, M.E.; O'Connor, R.Jr.:** Effects of Cognitive Feedback on Performance. *Psychological Bulletin* (1989), 106, 410-433

**Bennett, I.J.; Golob, E.J.; Starr, A.:** Age-related differences in auditory event-related potentials during a cued attention task. *Clinical Neurophysiology* (2004), 115, 2602-2615

**Berntson, G.G.; Cacioppo, J.T.; Quigley, K.S.; Fabro, V.T.:** Autonomic Space and Psychophysiological Response. *Psychophysiology* (1994), 31, 44-61

**Berntson, G.G.; Quigley, K.; Lozano, D.:** Cardiovascular psychophysiology. In: JT. Cacioppo, L.G. Tassinary & G. Berntson (Eds.), *Handbook of Psychophysiology* (2007), 182-210, Cambridge: Cambridge University Press

**Birbaumer, N.; Schmidt, R.F.:** *Biologische Psychologie* (2003), 5. Aufl., Berlin: Springer

**Borella, E.; Caretti, B.; De Beni, R.:** Working memory and inhibition across the adult life-span. *Acta Psychologica* (2008), 128, 33-44

**Braver, T.S.; Cohen, J. D.; Nystrom, L.E.; Jonides, J.; Smith, E.E.; Noll, D.C.:** A parametric study of prefrontal cortex involvement in human working memory. *NeuroImage* (1997), 5, 49-62

**Cabeza, R.; Anderson, N.D.; Locantore, J.K. et al.:** Aging gracefully: compensatory brain activity in high performing older adults. *NeuroImage* (2002), 17, 1394-1402

**Cereda, C.; Ghika, J.; Maeder, P.; Bogousslavsky, J.:** Strokes restricted to the insular cortex. *Neurology* (2002), 59, 1950-1955

**Chen, Y.-N.; Mitra, S.; Schlaghecken, F.:** Sub-processes of working memory in the N-back task: An investigation using ERPs. *Clinical Neurophysiology* (2008), 119, 1546-1615

- Clapp, W.C.; Rubens, M.T.; Sabharwal, J.; Gazzaley, A.:** Deficit in switching between functional brain networks underlies the impact of multitasking on working memory in older adults. *PNAS* (2011), 108, 17, 7212-7
- Cohen, J.D.; Perlstein, W.M.; Braver, T.S.; Nystrom, L.E.; Nol, D.C.; Jonides, J.; Smith, E.E.:** Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature* (1997), 386, 604-608
- Colcombe S.J.; Kramer, A.F.; Erickson, K.I.; Scalf, P.; Cohen, N.J.; Webb, A.; Jerome, G.I.; Marquez, D.X.; Elavsky, S.:** Cardiovascular fitness, cortical plasticity, and aging. *PNAS* (2004), 101, 3316-3321
- Colivicchi, F.; Bassi, A.; Santini, M.; Caltagirone, C.:** Cardiac autonomic derangement and arrhythmias in right-sided stroke with insular involvement. *Stroke* (2004), 35, 2094-2098
- Critchley, H.D.:** Psychophysiology of neural, cognitive and affective integration: fMRI and autonomic indicants. *Int J Psychophysiol* (2009), 73, 88-94
- Davis, S.W.; Dennis, N.A.; Daselaar, S.M.; Fleck, M.S.; Cabeza, R.:** Que´ PASA? The Posterior-Anterior Shift in Aging. *Cerebral Cortex* (2007), 18, 1201-1209
- De Jong, R.:** Adult age differences in goal activation and goal maintenance. *European Journal of Cognitive Psychology* (2001), 13, 71-89
- De Meersman, R.E.; Stein, P.K.:** Vagal modulation and aging. *Biological Psychology* (2007), 74, 165-173
- Dobbs, A.R.; Rule, B.G.:** Adult age differences in working memory. *Psychology and Aging* (1989), 4, 500-503
- Docherty, J.R.:** Cardiovascular responses in aging: A review. *Pharmacological Review* (1990), 42, 103-125
- Donchin, E., & Coles, M. G. H.** Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral and Brain Sciences*, (1988), 11, 355-425
- Eppinger, B.; Kray, J.; Mecklinger, A.; John, O.:** Age differences in task switching and response monitoring: Evidence from ERPs. *Biological Psychology*, (2007), 75, 52-67
- Falkenstein, M.; Hoormann, J.; Hohnsbein, J.:** Changes of error-related ERPs with age. *Experimental brain research* (2001), 138, 258-62
- Falkenstein, M.; Hoormann, J.; Hohnsbein, J.:** Time pressure effects on late components of the event-related potential. *Journal of Psychophysiology*, (1994), 8, 22-30
- Falkenstein, M.; Hoormann, J.; Hohnsbein, J.; Kleinsorge; T.:** Short-term mobilization of processing resources is revealed in the event-related potential. *Psychophysiology* (2003), 40, 914-923



**Falkenstein, M.; Yordanova, J.; Kolev, V.:** Effects of aging on slowing of motor-response generation International. *Journal of Psychophysiology* (2006), 59, 22-29

**Farrell, T.G.; Odemuyiwa, O.; Bashir, Y.; Cripps, T.R.; Malik, M.; Ward, D.E.; Camm, A.J.:** Prognostic value of baroreflex sensitivity testing after acute myocardial infarction. *British Heart Journal* (1992), 67, 129-37

**Folstein, J.R.; Van Petten, C.:** Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: A review. *Psychophysiology* (2008), 45, 152-170

**Foster, P.S.; Harrison, D.W.:** Magnitude of cerebral asymmetry at rest: Covariation with baseline cardiovascular activity. *Brain and Cognition* (2006), 61, 286-297

**Foster, P.S.; Harrison, D.W.:** The covariation of cortical electrical activity and cardiovascular responding. *International Journal of Psychophysiology* (2004), 52, 239-255

**Freude, G.; Ullsperger, P.; Erdmann, U.:** Slow brain potentials in a visual monitoring task. *International Journal of Psychophysiology* (1999), 33, 231-241

**Friedman, D.:** The Components of Aging. In: Luck & Kappenman, *Oxford Handbook of Event-Related Potential Components*. (2010) Oxford: Oxford University Press

**Friedman, D.; Kazmerski, V.; Fabiani, M.:** An overview of age-related changes in the scalp distribution of P3b. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* (1997), 104, 498-513

**Friedman, D.; Nessler, D.; Johnson, R., Jr, Ritter, W.; Bersick, M.:** Age-Related Changes in Executive Function: An Event-Related Potential (ERP) Investigation of Task-Switching. *Aging, Neuropsychology and Cognition* (2007), 1-34

**Gaillard, A.W.:** The late CNV wave: Preparation versus expectancy. *Psychophysiology* (1977), 14, 563-568

**Gajewski P.D.; Wild-Wall N., Schapkin S.A., Erdmann U., Freude G.; Falkenstein, M.:** Effects of Aging and Job Demands on cognitive flexibility assessed by task switching: an electrophysiological study. *Biological Psychology* (2010), 85, 187-192

**Gevins, A.S.; Bressler, S.; Cuttillo, B.; Illes, J.; Miller, J.; Stern, J.; Jex, H.:** Effects of prolonged mental work on functional brain topography. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology* (1990), 76, 339-50

**Gianaros, P.J.; Jennings, J.R.; Sheu, L.K.; Derbyshire, St.W.G.; Matthews, K.A.:** Heightened functional neural activation to psychological stress covaries with exaggerated blood pressure reactivity, *Hypertension* (2007), 49, 134-140

**Goffaux, P.; Phillips, N.A.; Sinai, M.; Pushkar, D.:** Neurophysiological Measures of Task-Set Switching: Effects of Working Memory and Aging. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences* (2008), 63B, 2, 57-66

**Gomez, C.M.; Flores, A.; Ledesma, A.:** Fronto-parietal networks activation during the contingent negative variation period. *Brain Research Bulletin* (2007), 73, 40-47

**Gordon, B. A.; Rykhlevskaia, E.; Brumback, C.; R.; Lee, Y.; Elavsky, S.; Koppack, J. et al.:** Anatomical correlates of aging, cardiopulmonary fitness level, and education. *Psychophysiology*, (2008), 45, 825–838

**Gratton, G.; Coles, M.G.H.; Donchin, E.:** A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* (1983), 55, 468-484

**Greenhouse, S.W.; Geisser, S.:** On methods in the analysis of profile data. *Psychometrika* (1959), 24, 95-112

**Hamano, T.; Luders, H.O.; Ikeda, A.; Collura, T.F.; Comair, Y.G.; Shibasaki, H.:** The cortical generators of the contingent negative variation in humans: a study with subdural electrodes. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* (1997), 104, 257-268

**Hasher, L.; Zacks, R.T.:** Working memory, comprehension, and aging: A review and a new view. *Psychology of Learning & Motivation* (1988), 22, 122-149

**Hedden, T.; Gabrieli, J.D.E.:** Insights into the ageing mind: a view from cognitive neuroscience. *Nature reviews. Neuroscience* (2004), 5, 87-96

**Hillman, C.H.; Kramer, A.F.; Belopolsky, A.V.; Smith, D.P.:** A cross-sectional examination of age and physical activity on performance and event-related brain potentials in a task switching paradigm. *International Journal of Psychophysiology* (2006), 59, 30-39

**Hillyard, S.A.; Anllo-Vento, L.:** Event-related brain potential in the study of visual selective attention. *PANAS* (1998), 95, 781-785

**Hjortskov, N.; Rissén, D.; Blangsted, A.K.; Fallentin, N.; Lundberg, U.; Søgaard, K.:** The effect of mental stress on heart rate variability and blood pressure during computer work. *European Journal of Applied Physiology* (2004), 92, 84-89

**Hohnloser, S.H.:** Untersuchung der Barorezeptorenfunktion. *Deutsche Ärzteblatt* (1999), 96, 1716-1719

**Holroyd, C.B.; Pakzad-Vaezi, K.L.; Krigolson, O.E.:** The feedback correct-related positivity: Sensitivity of the event-related brain potential to unexpected positive feedback. *Psychophysiology* (2008), 45, 688-697

**Honey, G.D.; Fu, C.H.Y.; Kim, J.; Brammer, M.J.; Croudace, T.J.; Suckling, J.; Pich, E.M.; Williams, S.C.R.; Bullmore, E.T.:** Effects of Verbal Working Memory Load on Corticocortical Connectivity Modeled by Path Analysis of Functional Magnetic Resonance Imaging Data. *NeuroImage* (2002), 17, 2, 573-582

**Iani, C.; Gopher, D.; Lavie, P.:** Effects of task difficulty and invested mental effort on peripheral vasoconstriction. *Psychophysiology* (2004), 41, 789-798

**Johnson, R.:** A triarchic model of P300 amplitude *Psychophysiology* (1986), 23, 367-384

**Jorna, P.G.A.M.:** Spectral analysis of heart rate and psychological state: A review of its validity as a workload index. *Biological Psychology* (1992), 34, 237-257

**Kamarck, T. W.; Jennings, J.R.:** Biobehavioral factors in sudden cardiac death. *Psychol. Bull.* (1991), 109, 42-75

**Karnath, H-O.; Thier, P.:** *Neuropsychologie* (2006) Heidelberg: Springer.

**Kamijo, K.; O'Leary, K.C.; Pontifex, M.B.; Themanson, J.R.; Hillman, C.C.:** The relation of aerobic fitness to neuroelectric indices of cognitive and motor task preparation. *Psychophysiology* (2010), 47, 814-821

**Karayanidis, F.; Whitson, L.R.; Heathcote, A.; Michie, P.T.; Murphy, K.:** Variability in proactive and reactive cognitive control processes across the adult lifespan. *Frontiers in Psychology*, (2011), 2, 318.

**Kieffaber, P.D.; Hetrick, W.P.:** Event-related potential correlates of task switching and switch costs. *Psychophysiology* (2005), 42, 56-71

**Kilander, L.; Nyman, H.; Boberg, M. et al.:** The association between low diastolic blood pressure in middle age and cognitive function in old age. A population-based study. *Age and Ageing* (2000), 29, 243-248

**Kliegl, R.; Mayr, U.; Krampe, R.T.:** Time-accuracy functions for determining process and person differences: an application to cognitive aging. *Cognitive Psychology* (1994), 26, 134-164

**Knight, R.T.; Grabowecky, M.F.; Scabini, D.:** Role of human prefrontal cortex in attention control. *Advances in Neurology* (1995), 66, 21-36

**Kok, A.:** On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology* (2001), 38, 557-577

**Kramer, A.F.; Hahn, S.; Gopher, D.:** Task coordination and aging: Explorations of executive control processes in the task switching paradigm. *Acta Psychologica* (1999), 101, 339-378

**Kray, J.:** Task-set switching under cue-based versus memory-based switching conditions in younger and older adults. *Brain Research* (2006), 1105, 83-92

**Kray, J.; Eber, J.; Karbach, J.:** Verbal self-instructions in task switching: a compensatory tool for action-control deficits in childhood and old age? *Developmental Science* (2008), 11, 223-236

**Kray, J.; Eppinger, B.; Mecklinger, A.:** Age differences in attentional control: An event-related potential approach. *Psychophysiology* (2005), 42, 407-416

**Kray, J.; Li, K.Z.H.; Lindenberger, U.:** Age-related changes in task switching components: The role of task uncertainty. *Brain and Cognition* (2002), 49, 363-381

**Kray, J.; Lindenberger, U.:** Adult age differences in task-set switching. *Psychology and Aging* (2000), 15, 126-147

**Kubota, Y.; Sato, W.; Toichi, M.; Murai, T.; Okada, T.; Hayashi, A. et al.:** Frontal midline theta rhythm is correlated with cardiac autonomic activities during the performance of an attention demanding meditation procedure. *Cognitive Brain Research* (2001), 11, 281-287

**Kuo, H.K.; Sorond, F.; Iloputaife, I. et al.:** Effect of blood pressure on cognitive functions in elderly persons. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences* (2004), 59, 1191-1194

**Lane, R.D.; Reimann, E.M.; Ahern, G.L.; Thayer, J.F.:** Activity in Medial Prefrontal Cortex Correlates with Vagal Component of Heart Rate Variability during Emotion. *Brain and Cognition* (2001), 47, 97-100

**Lane, R.D.; Schwartz, G.E.:** Induction of lateralized sympathetic input to the heart by the CNS during emotional arousal: a possible neurophysiologic trigger of sudden cardiac death. *Psychosom. Med.* (1987), 49, 274-284

**Lee, D.H.; Park, K.S.:** Multivariate analysis of mental and physical load components in sinus arrhythmia scores. *Ergonomics* (1990), 33, 35-47

**Lenneman, J.K.; Backs, R.W.:** Cardiac autonomic control during simulated driving with a concurrent verbal working memory task. *Human Factors* (2009), 51, 404-418

**Lorist, M.M.; Klein, M.; Nieuwenhuis, S.; De Jong, R.; Mulder, G.; Meijman, T.F.:** Mental fatigue and task control: planning and preparation. *Psychophysiology* (2000), 37, 614-25

**Luck, S.J.:** An introduction to the event-related potential technique. (2005). Cambridge: MIT Press.

**Luck, S.J.; Hillyard, S.A.:** Electrophysiological correlates of feature analysis during visual search. *Psychophysiology* (1994), 31, 291-308

**Luria, A.R.:** *Vosstanovlenie Funkziy Mozga Posle Voennoy Travmy*. Moscow: Izdat. Academia Ped. Nauk (1948). (English edition: Luria, A.R. *Restoration of Brain Functions After War Trauma*. (1964). Oxford: Pergamon Press).

**Mathalon D.H., Whitfield S.L., Ford J.M.:** Anatomy of an error: ERP and fMRI. *Biological Psychology* (2003), 64 119-141

**Mayr, U.:** Age differences in the selection of mental sets: The role of inhibition, stimulus ambiguity, and response-set overlap. *Psychology and Aging* (2001), 16, 96-109

**McEwen, B.S.:** Sex, stress and the hippocampus: allostasis, allostatic load and the ageing process. *Neurobiology of Aging* (2002), 23, 921-939

**Meißner-Pöthig, D.; Michalak, U.:** *Vitalität und ärztliche Intervention*. (1997) Stuttgart: Hippokrates

**Meyer, S.; Strittmatter, M.; Fischer, C.; Georg, T.; Schmitz, B.:** Lateralization in autonomic dysfunction in ischemic stroke involving the insular cortex. *Neuroreport* (2004), 15, 357-361

**Missionnier, P.; Gold, G.; Leonards, U.; Costa-Fazio, L.; Michel, J.-P.; Ibáñez, V.; Giannakopoulos, P.:** Aging and working memory: early deficits in EEG activation of posterior cortical areas, *Journal of Neural Transmission* (2004), 111, 1141-1154

**Miyake, A.; Friedman, N.P.; Emerson, M.J.; Witzki, A.H.; Howerter, A.; Wager, T.D.:** The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: a latent variable analysis. *Cog Psychol* (2000), 41, 49-100

**Monsell, S.; Mizon, G.A.:** Can the task-cuing paradigm measure an endogenous task-set reconfiguration process? *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance* (2006), 32, 493-516

**Mukai, S.; Gagnon, M.; Iloputaife, I.; Hamner, J.W.; Lipsitz, L.A.:** Effect of systolic blood pressure and carotid stiffness on baroreflex gain in elderly subjects. *J Gerontol A. Biol Sci Med Sci* (2003), 58, 626-630

**Mulder, G.; Mulder, L.J.M.:** Information processing and cardiovascular control. *Psychophysiology* (1981), 14, 392-402

**Mulder, L.J.M.; Mulder, G.:** Cardiovascular reactivity and mental workload. In O. Rompelmann & R. I. Kitney (Eds.), *The beat-by-beat investigation of cardiovascular function* (1987), 216-253, Oxford: Oxford University Press

**Mulder, L.J.M.; van Roon, A.; Veldman, H.; Laumann, K.; Burov, O., Quispel, L., Hoogeboom P.:** How to use cardiovascular changes in adaptive automation. In G. R. J. Hockey, A. W. K. Gaillard & O. Burov. *Operator Functional State* (2003). 260-269, Amsterdam: IOS Press

**Nagel, I.E.; Preuschhof, C.; Li, S.-C.; Nyberg, L.; Bäckman, L.; Lindenberger, U.; Heekeren, H.R.:** Performance level modulates adult age differences in brain activation during spatial working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (2009), 106, 22552-22557

**Nickel, P.; Eilers, K.; Seehase, L.; Nachreiner, F.:** Zur Reliabilität, Validität, Sensitivität und Diagnostizität von Herzfrequenz- und Herzfrequenzvariabilitätsmassen als Indikatoren psychischer Beanspruchung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* (2002), 56, 22-36

**Nürnberg, J.; Mitchell, A.; Wenzel, R.R.; Philipp, T.; Schäfer, R.F.:** Pulswellen-reflexion. *Deutsche Medizinische Wochenschrift* (2003), 128, 97-102

**Oppenheimer, S.M.; Gelb, A.; Girvin, J.P.; Hachinski, V.C.:** Cardiovascular effects of human insular cortex stimulation. *Neurology* (1992), 42, 1727-1732

**Oppenheimer, S.M.; Wilson, J.X.; Guiraudon, C.; Cechetto, D.F.:** Insular cortex stimulation produces lethal cardiac arrhythmias: A mechanism of sudden death? *Brain Research* (1991), 550, 115-121

**Pawlik, K.:** Handbuch Psychologie. (2006) Heidelberg: Springer

**Perrin, F.; Pernier, J.; Bertrand, O.; Echallier, J.F.:** Spherical splines for scalp potential and current density mapping. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* (1989), 72, 184-187

**Pfefferbaum, A.; Ford, J.M.; Roth, W.T.; Kopell, B.S.:** Age-related changes in auditory event-related potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* (1980), 49, 266-276

**Polich J.** Meta-analysis of P3 normative aging studies. *Psychophysiology* (1996) 33, 334-353.

**Polich, J.:** Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology* (2007), 118, 2128-2148

**Potter, G.G., Helms, M.J., Plassman, B.L.:** Associations of job demands and intelligence with cognitive performance among men in late life. *Neurology* (2008), 70, 1803–1808.

**Poulsen, C.; Luu, P.; Davey, C.; Tucker, D.M.:** Dynamics of task sets: evidence from dense-array event-related potentials. *Brain Research* (2005), *Cognitive Brain Research* 224, 133-54

**Pritchard, W.S.** Psychophysiology of P300 *Psychological Bulletin* (1981), 89, 506-540

**Reuter-Lorenz, P.A.; Sylvester, C.Y.C.:** The cognitive neuroscience of working memory and aging. In R. Cabeza, L. Nyberg & D. Park (Hrsg.), *Cognitive Neuroscience of aging* (2005), Oxford: Oxford University Press

**Rohrbaugh, J.W.; McCallum, W.C.; Gaillard, A.K.W.; Simons, R.F.; Birbaumer, N.; Papakostopoulos, D.:** ERPs associated with preparatory and movement related processes. A review. In W. C. McCallum, R. Zappoli & F. Denoth (Eds.), *Cerebral psychophysiology: Studies in event related potentials* (1986), 189-231, Amsterdam: Elsevier

**Rösler, F. (Hrsg.):** Grundlagen und Methoden der Psychophysiology. In: *Enzyklopädie der Psychologie. Biologische Psychologie* (2001), Band 4, Göttingen: Hogrefe

**Rüdiger, H.; Klinghammer, L.; Scheuch, K.:** The trigonometric regressive spectral Analysis - a method for mapping of beat-to-beat recorded cardiovascular parameters on to frequency domain compare with Fourier transformation. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* (1999), 58, 1-15

**Rushworth, M.F.; Passingham, R.E.; Nobre, A.C.:** Components of switching intentional set. *Journal of Cognitive Neuroscience* (2002), 14, 1139-1150

**Salthouse, T.A.:** Effects of age and skill in typing. *Journal of Experimental Psychology: General* (1984), 113, 345-371

**Salthouse, T.A.:** The Processing-Speed Theory of Adult Age Differences in Cognition. *Psychological Review* (1996), 103, 403-428

**Schaarschmidt, U.; Fischer, A.W.:** Bewältigungsmuster im Beruf. (2001) Goettingen: Vadenhoeck & Ruprecht

**Schaie, K.W.; Baltes, P.B.:** Intellectual development in adulthood the seattle longitudinal study. (1996) Cambridge: Cambridge University Press

**Schandry, R.:** Lehrbuch Psychophysiologie (1996). Weinheim: Psychologie Verlag

**Schapkin, S.A.; Freude, G.:** Kompensation altersbezogener Änderungen kognitiver Fähigkeiten – psychophysiologische Untersuchungsansätze. *Arbeitsmedizin. Sozialmedizin. Umweltmedizin* (2006), 41, 546-551

**Schapkin, S.A., Freude, G., Erdmann, U., Ruediger, H.:** Stress and managers performance: age-related changes in psychophysiological reactions to cognitive load. In: D. Harris (Ed.) *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics* (2007), 415-425. Heidelberg: Springer

**Schapkin, S.A.; Freude, G.; Gajewski, P.D.; Wild-Wall, N.; Falkenstein, M.:** Effects of Working Memory Load on Performance and Cardiovascular Activity in Younger and Older Workers. *International Journal of Behavioral Medicine* (2011), DOI: 10.1007/s12529-011-9181-6

**Schooler, C.; Mulatu, M.S.; Oates, G.:** The continuing effects of substantively complex work on the intellectual functioning of older workers. *Psychology and Aging* (1999), 14, 483-506

**Seligman, M.E.P.:** Helplessness. On Depression, Development and Death. (1975). San Francisco: Freeman and Comp.

**Shikhman, M.:** Age, gender, general intelligence and educational level influences on working memory. *Dissertation Abstracts International: Section B: The Science and Engineering* (2008), 68, (10-B)

**Siegrist, J.; Klein, D.:** Occupational stress and cardiovascular reactivity in blue-collar workers. *Work & Stress* (1990), 4, 295-304

**Skinner, J.E.; Reed, J.C.:** Blockade of frontocortical-brainstem pathway prevents ventricular fibrillation of ischemic heart. *Am. J. Physiol.* (1981), 240, 156-163

**Smith, E.E.; Geva, A.; Jonides, J. et al.:** The neural basis of task-switching in working memory: effects of performance and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (2001), 98, 2095-2100

**Sridharan, D.; Levitin, D.J.; Menon, V.:** A critical role for the right fronto-insular cortex in switching between central-executive and default-mode networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (2008), 105, 12569-12574

**Stemmler, G.:** The autonomic differentiation of emotion revisited: Convergent and discriminant validation. *Psychophysiology* (1989), 26, 617-632

**Stepptoe, A.; Fieldman, G.; Evans, O.; Perry, L.:** Cardiovascular risk and responsiveness to mental stress: the influence of age, gender and risk factors. *Journal of Cardiovascular Risk* (1996), 3, 83-93

**Stepptoe, A.; Kunz-Ebrecht, S.R.; Wright, C.:** Socioeconomic position and cardiovascular and neuroendocrine responses following cognitive challenge in old age. *Biological Psychology* (2005), 69, 149-166

**Sterr, A.; Dean, P.:** Neural correlates of movement preparation in healthy ageing. *European Journal of Neuroscience* (2008), 27, 254-260

**Stevens, D. W., Hasher, L., Chiew, K. S., & Grady, C. L.** A neural mechanism underlying memory failure in older adults. *The Journal of Neuroscience* (2008), 28, 12820-12824

**Szafarski, J.P.; Holland, S.K.; Schmidthorst, V.J. et al.:** fMRI study of language lateralization in children and adults. *Human brain mapping* (2006), 27, 202-12

**Touron, D.R., Hoyer, W.J., Cerella, J.:** Cognitive Skill Learning: Age-Related Differences in Strategy Shifts and Speed of Component Operations. *Psychology and Aging*, (2004), 19, 565-580.

**Vallesi A.; Stuss, D.T; McIntosh, A.R. ; Pictona, T.W.;** Age-related differences in processing irrelevant information: Evidence from event-related potentials. *Neuropsychologia* (2009), 47, 577-586

**Van Roon, A.M.; Mulder, L.J.M.; Veldman, J.B.P.; Mulder, G.:** Beat-to-beat blood-pressure measurements applied in studies on mental workload. *Homeostasis* (1995), 36, 3316-3324

**Verhaeghen, P.; Basak, Ch.:** Ageing and switching of the focus of attention in working memory: Results from a modified N-Back task. *Experimental Psychology* (2005), 58A, 134-154

**Verhaeghen, P.; Cerella, J.:** Aging, executive control, and attention: a review of meta-analyses. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* (2002), 26, 849-857

**Verleger, R.; Jaskowski, P.; Wascher, E.:** Evidence for an Integrative Role of P3b in Linking Reaction to Perception. *J Psychophysiology* (2005), 19, 165-181

**Wager, T.D.:** Neuroimaging studies of working memory: a meta-analysis. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience* (2003), 3, 255-274

**Walter, W. G.; Cooper, R.; Aldridge, V.; McCallum, W.; Winter, A.:** Contingent negative variation: An electrical sign of sensorimotor association and expectancy in the human brain. *Nature* (1964), 203, 380-384

**Watter, S.; Geffen, G.M.; Geffen, L.B.:** The n-back as a dual-task: P300 morphology under divided attention. *Psychophysiology* (2001), 38, 998-1003



- Weinert, F.E.; Knopf, M.:** Gedächtnistraining im höherem Erwachsenenalter: Lassen sich Gedächtnisleistungen verbessern, während sich das Gehirn verschlechtert? In: Schmitz-Scherzer R, Kruse A, Olbrich R. (Hrsg.) Altern: ein lebenslanger Prozess der sozialen Interaktion (1990), S. 91-102, Darmstadt: Steinkopf
- West, R.; Bowry, R.; McConville, C.:** Sensitivity of medial frontal cortex to response and nonresponse conflict. *Psychophysiology* (2004), 41, 739-748
- West, R.; Moore, K.:** Adjustments of cognitive control in younger and older adults. *Cortex* (2005), 41, 570-581
- West, R.; Travers, S.:** Differential effects of aging on processes underlying task switching. *Brain and Cognition* (2008), 68, 67-80
- West, R.;Schwarb, H.; Johnson, B.N.:** The influence of age and individual differences in executive function on stimulus processing in the oddball task. *Cortex* (2010), 46, 550-563
- West, R.J.; Schwab, H.:** The influence of aging and frontal function on the neural correlates of regulative aspects of cognitive control. *Neuropsychology* (2006), 20, 468-481
- West, R.L.:** An application of prefrontal cortex theory to cognitive aging. *Psychological Bulletin* (1996) 120, 272-292
- West, R.L.:** Visual distraction, working memory, and aging. *Memory & Cognition* (1999), 27, 1064-1072
- Wickens, C.; Kramer, A.; Vannasse, L.; Donchin, E.:** Performance of concurrent task: a psychophysiological analysis of the reciprocity of information-preprocessing resources. *Science* (1983), 221, 1080-1082
- Wild-Wall, N.; Hohnsbein, J.; Falkenstein, M.:** Effects of ageing on cognitive task preparation as reflected by event-related potentials. *Clinical Neurophysiology* (2007), 118, 558-569
- Wild-Wall, N.; Hohnsbein, J.; Falkenstein, M.:** Flanker interference in young and older participants as reflected in event-related potentials. *Brain Research* (2008), 1211, 72-84
- Wood, R.; Maraj, B.; Lee, C.M.; Reyes, R.:** Short-term heart rate variability during a cognitive challenge in young and older adults. *Age and Ageing* (2002), 31, 131-135
- Yordanova, J.; Kolev, V.; Hohnsbein, J.; Falkenstein, M.:** Sensorimotor slowing with ageing is mediated by a functional dysregulation of motor-generation processes: evidence from high-resolution ERPs. *Brain* (2004), 127, 351-362

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1.1</b>	Der präfrontale Kortex	9
<b>Abb. 2.1</b>	Das ereigniskorrelierte Hirnpotential	11
<b>Abb. 2.2</b>	Die Herzratenvariabilität	13
<b>Abb. 2.3</b>	Frequenzbänder der HRV	13
<b>Abb. 2.4</b>	Beispiele der BRS	15
<b>Abb. 5.1</b>	Schematische Darstellung der 0-Back-Aufgabe und 2-Back-Aufgabe	28
<b>Abb. 5.2</b>	Schematische Darstellung der Switch-Aufgabe	29
<b>Abb. 5.3</b>	Schematische Darstellung der Clock-Aufgabe	30
<b>Abb. 5.4</b>	EEG-Montage	31
<b>Abb. 5.5</b>	Versuchsablauf	34
<b>Abb. 6.1</b>	Reaktionszeit, „Falsche Alarme“ und Omissionen	37
<b>Abb. 6.2</b>	Altersbezogene Vergrößerung der N2	38
<b>Abb. 6.3</b>	Die altersassoziierte P3-Frontalisierung unter AG-Belastung	39
<b>Abb. 6.4</b>	A: Die P3b-Latenz in drei Versuchsbedingungen B: Die altersassoziierte P3b-Verzögerung	39
<b>Abb. 6.5</b>	Ereigniskorrelierte Potentiale der einzelnen Aufgaben	40
<b>Abb. 6.6</b>	Die Ne- und FRN-Komponenten	41
<b>Abb. 6.7</b>	Die Verzögerung der FRP-Komponente	41
<b>Abb. 6.8</b>	A: Die Alters- und Feedbackeffekte an der kontralateralen Ableitung B: Die Alterseffekte auf den kontra- und ipsilateralen Ableitungen	42
<b>Abb. 6.9</b>	Systolischer Blutdruck, Herzratenvariabilität und Baroreflexsensitivität	43
<b>Abb. 6.10</b>	Die Scree-Plots der Eigenwerte nach der Faktorenanalyse der Herz-Kreislauf-Parameter	43
<b>Abb. 6.11</b>	Die RZ und die Fehlerrate in unterschiedlichen Versuchsbedingungen	48
<b>Abb. 6.12</b>	Die globalen und lokalen Wechselkosten in der RZ und Fehlerrate	49
<b>Abb. 6.13</b>	Die altersbezogene Vergrößerung der N2 bei „routinierten“ Pbn	51
<b>Abb. 6.14</b>	Die Ne-Komponente	52
<b>Abb. 6.15</b>	Topographie der P3 im Altersvergleich	52
<b>Abb. 6.16</b>	Die P3-Frontalisierung	53
<b>Abb. 6.17</b>	Ereigniskorrelierte Potentiale der einzelnen Aufgaben	54
<b>Abb. 6.18</b>	Die altersassoziierte P3-Verzögerung	55
<b>Abb. 6.19</b>	Die P3b-Latenz in unterschiedlichen Versuchsbedingungen	55
<b>Abb. 6.20</b>	Die CNV bei Älteren und Jüngeren	56
<b>Abb. 6.21</b>	A: Die CNV bei Älteren und Jüngeren B: Die CNV bei Pb mit flexiblen und routinierten Arbeitsanforderungen	60
<b>Abb. 6.22</b>	A: Die erhöhte Reaktivität des systolischen BD B: Die verminderte Erholung des systolischen BDs	61

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 5.1</b>	Altersangaben der untersuchten Stichprobe	26
<b>Tab. 5.2</b>	Aufteilung der Pbn auf die Berufsgruppen	27
<b>Tab. 5.3</b>	Reiz-Reaktion-Konstellationen in der Switch-Aufgabe	29
<b>Tab. 5.4</b>	Elektroden und Zeitfenster zur Bestimmung der EKP-Komponenten	32
<b>Tab. 5.5</b>	Schematische Darstellung des Versuchablaufs	33
<b>Tab. 5.6</b>	MW und Standardabweichungen von kardiovaskulären Parametern	34
<b>Tab. 6.1</b>	Faktorladungen für log-transformierte Variablen	44
<b>Tab. 6.2</b>	Korrelation zwischen den EKP- und HK-Variablen	46
<b>Tab. 6.3</b>	Korrelation zwischen der P3 und HK-Variablen	58
<b>Tab. 6.4</b>	MW und Standardabweichungen von Leistungsparametern	59
<b>Tab. 8.1</b>	Zusammenfassung der Hauptergebnisse	78

## Abkürzungsverzeichnis

<b>AG</b>	Arbeitsgedächtnis
<b>ANOVA</b>	Varianzanalyse
<b>ANS</b>	autonome Nervensystem
<b>BD</b>	Blutdruck
<b>BOLD</b>	Blood Oxygen Level Dependency
<b>BRS</b>	Baroreflexsensitivität
<b>DBD</b>	diastolischer Blutdruck
<b>d. h.</b>	das heißt
<b>EEG</b>	Elektroenzephalogramm
<b>EKG</b>	Elektrokardiogramm
<b>EKP</b>	ereigniskorreliertes Potential
<b>FB</b>	Feedback
<b>FA</b>	Falscher Alarm; Reaktion auf einen irrelevanten Reiz, als ob er relevant wäre
<b>fMRT</b>	funktionelle Magnetresonanztomographie
<b>H-K-Parameter</b>	Herz-Kreislauf-Parameter
<b>HF</b>	high frequency
<b>HP</b>	Herzperiode
<b>HR</b>	Herzrate
<b>HRV</b>	Herzratenvariabilität
<b>Hz</b>	Hertz
<b>i. d. Z.</b>	in dem Zusammenhang
<b>i. S.</b>	im Sinne
<b>KZG</b>	Kurzzeitgedächtnis
<b>LF</b>	low frequency
<b>InRT</b>	loglineare Reaktionszeit
<b>LZG</b>	Langzeitgedächtnis
<b>m</b>	Mittelwert
<b>mmHg</b>	Millimeter Quecksilber
<b>ms</b>	Millisekunden
<b>µV</b>	Mikrovolt
<b>PET</b>	Positronenemissionstomographie
<b>rCBF</b>	regionaler cerebraler Blutfluss
<b>OM</b>	Omission, Auslassung eines relevanten Reizes
<b>Pb, Pbn</b>	Proband(en)
<b>RSA</b>	respiratorische Sinusarrhythmie
<b>RZ</b>	Reaktionszeiten
<b>SBD</b>	systolischer Blutdruck
<b>SD</b>	Standardabweichung
<b>SPSS</b>	Statistical Package for Social Science
<b>u. a.</b>	unter anderem
<b>u. U.</b>	unter Umständen
<b>v. a.</b>	vor allem

# Anhang 1

## Instruktion für die Experten

„Sehr geehrte Frau Kollegin, sehr geehrter Herr Kollege, bei dieser Bewertung werden Ihnen die Beschreibungen unterschiedlicher Arbeitsaufgaben im Berufsalltag der Pbn vorgelegt.

Sie müssen entscheiden, ob die erforderliche Flexibilität bezüglich der Arbeitsaufgaben im Berufsalltag eher niedrig (1) oder eher hoch (2) ist.

Erläuterung:

Um den Wechsel einer Aufgabe handelt es sich dann, wenn die zu wechselnde Aufgabe sich von der vorherigen Aufgabe **inhaltlich wesentlich unterscheidet** und ein Wechsel der Aufgaben ohne **fixierte** Reihenfolge stattfindet.

Dagegen handelt es sich **nicht** um einen Wechsel der Aufgabe, wenn die vorherige und die zu wechselnde Aufgabe sich voneinander **inhaltlich nicht wesentlich unterscheiden** und die Wechselreihenfolge **fixiert** ist.

Beispiele für Wechsel von Aufgaben (hohe Flexibilität, eher flexible Berufsanforderungen – Wert 2):

- Reisebüroangestellte: Flug/Hotelbuchungen am Computer, Rechnungserstellung, Kundenberatung, Beantworten von Anrufen;
- Medizinisch-technische Assistentin in einem Forschungsinstitut: Telefonate mit Probanden, Versuchsdurchführung, Datenauswertung, Präsentationsvorbereitung, Bestellung von Büro- und Labormaterialien, Literaturrecherche etc.

Beispiele, in denen der Wechsel einer Aufgabe nicht stattfindet, sondern die fixierten Operationen innerhalb einer Aufgabe gewechselt werden (niedrige Flexibilität, eher routinierte Berufsanforderungen – Wert 1):

- Arzthelferin in einer Arztpraxis: Routineuntersuchung von Patienten, welche sich mehrmals am Tag wiederholt;
- Bibliothekar: Bestellung eines Artikels über eine andere Datenbank bzw. über eine andere Bibliothek, wenn es in der vorhandenen Datenbank nicht möglich ist; Sortieraufgaben nach festgelegten Kriterien;
- Fließbandarbeit: Wechsel zwischen unterschiedlichen, aber fixierten Aufgaben.

Vielen Dank für Ihre Bewertung!“

## Anhang 2

Mittelwerte und Standardabweichungen der Leistungsvariablen in der N-Back-Aufgabe

<b>Variable</b>	<b>Altersgruppe</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>StD</b>
<b>Reaktionszeit (ms), 0-Back</b>	Jüngere	352.98	47.52
	Ältere	357.57	39.73
<b>Reaktionszeit (ms), 2-Back</b>	Jüngere	488.54	84.38
	Ältere	523.23	69.05
<b>Reaktionszeit (ms), 2-Back mit Feedback</b>	Jüngere	458.74	74.18
	Ältere	502.94	58.58
<b>Reaktionszeit (ln), 0-Back</b>	Jüngere	5.84	.13
	Ältere	5.86	.10
<b>Reaktionszeit (ln), 2-Back</b>	Jüngere	6.13	.17
	Ältere	6.21	.13
<b>Reaktionszeit (ln), 2-Back mit Feedback</b>	Jüngere	6.07	.16
	Ältere	6.17	.11
<b>Falsche Alarme (%), 0-Back</b>	Jüngere	.27	.57
	Ältere	.35	.77
<b>Falsche Alarme (%), 2-Back</b>	Jüngere	1.65	1.50
	Ältere	2.60	1.84
<b>Falsche Alarme (%), 2-Back mit Feedback</b>	Jüngere	1.47	1.12
	Ältere	2.71	1.78
<b>Omissionen (%), 0-Back</b>	Jüngere	.24	1.03
	Ältere	.21	1.15
<b>Omissionen (%), 2-Back</b>	Jüngere	7.70	7.51
	Ältere	10.61	6.67
<b>Omissionen (%), 2-Back mit Feedback</b>	Jüngere	5.05	4.56
	Ältere	6.20	4.35

## Anhang 3

Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) der Leistungsvariablen in der Switch-Aufgabe. Konstant – konstante Aufgabe, RWH – regulärer Wechsel mit Hinweis, IWH – irregulärer Wechsel mit Hinweis, RW – regulärer Wechsel ohne Hinweis, Wdh – Wiederholung, Ws – Wechsel

	Wechselkosten				Leistung			
	Reaktionszeit (ms)				Reaktionszeit (ms), Wdh		Reaktionszeit (ms), Ws	
	globale		lokale		jüngere	ältere	jüngere	ältere
jüngere	ältere	jüngere	ältere					
<b>konstant</b>	-	-	-	-	511.72 (66.19)	564.05 (73.35)	-	-
<b>RWH</b>	113.15 (97.49)	210.45 (107.70)	138.33 (83.94)	153.77 (88.75)	625.65 (129.04)	774.23 (136.94)	763.40 (162.57)	928.75 (174.84)
<b>IWH</b>	378.26 (110.26)	422.71 (90.99)	152.71 (80.67)	152.73 (85.73)	890.56 (142.93)	986.67 (123.08)	1042.28 (168.06)	1139.41 (122.86)
<b>RW</b>	108.37 (88.92)	201.68 (116.42)	104.80 (92.37)	71.98 (95.10)	620.38 (120.21)	765.13 (145.15)	724.38 (145.60)	837.12 (182.56)
	Reaktionszeit (In)				Reaktionszeit (In), Wdh		Reaktionszeit (In), Ws	
	globale		lokale		jüngere	ältere	jüngere	ältere
	jüngere	ältere	jüngere	ältere				
<b>konstant</b>	-	-	-	-	6.20 (.14)	6.30 (.12)	-	-
<b>RWH</b>	.17 (.16)	.29 (.14)	.19 (.11)	.17 (.10)	6.37 (.21)	6.59 (.17)	6.56 (.23)	6.76 (.20)
<b>IWH</b>	.55 (.12)	.56 (.09)	.16 (.08)	.15 (.08)	6.75 (.16)	6.85 (.13)	6.91 (.17)	7.01 (.11)
<b>RW</b>	.16 (.13)	.27 (.14)	.14 (.12)	.08 (.11)	6.36 (.19)	6.57 (.18)	6.50 (.20)	6.64 (.21)
	% Fehler				% Fehler, Wdh		% Fehler, Ws	
	globale		lokale		jüngere	ältere	jüngere	ältere
	jüngere	ältere	jüngere	ältere				
<b>konstant</b>	-	-	-	-	2.14 (1.93)	2.06 (1.47)	-	-
<b>RWH</b>	1.94 (3.21)	3.47 (4.64)	.93 (3.73)	1.09 (3.55)	4.08 (3.52)	5.54 (4.91)	5.02 (4.34)	6.63 (5.80)
<b>IWH</b>	5.19 (4.48)	5.51 (4.67)	.15 (4.5)	1.13 (4.47)	7.34 (5.23)	7.57 (4.85)	7.49 (6.11)	8.71 (5.43)
<b>RW</b>	3.78 (6.54)	12.34 (12.09)	1.41 (3.64)	2.29 (6.52)	5.92 (7.32)	14.40 (12.48)	7.34 (7.39)	16.70 (13.80)