

Programmierung isometrischer Kraftimpulse

Dissertation

der Fakultät für Informations- und Kognitionswissenschaften
der Eberhard-Karls-Universität Tübingen
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

vorgelegt von

Dipl.-Psych. Hannes Schröter

aus Detmold

Tübingen

2003

Tag der mündlichen Qualifikation: 12. Februar 2003
Dekan: Prof. Dr. Ulrich Güntzer
1. Berichterstatter: Prof. Dr. Rolf Ulrich
2. Berichterstatter: Dr. Hartmut Leuthold
(University of Glasgow, Schottland)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Programmierung isometrischer Kraftimpulse. Isometrische Kraftimpulse lassen sich mit wenigen Parametern beschreiben und können als kleinste Einheiten von komplexeren motorischen Handlungen angesehen werden. Um so erstaunlicher ist es, dass wenig klare Erkenntnisse darüber bestehen, wie die Programmierung und Ausführung dieser einfachen Handlungen im Detail gewährleistet wird.

Die vielen – zumindest scheinbaren – Widersprüche, auf die ich während meiner Arbeit stieß, waren manchmal frustrierend. Es überwog jedoch immer die Neugier, mehr über die menschliche Motorik – und sei es auch nur in einem sehr begrenzten Bereich – zu erfahren. Die Leichtigkeit, mit der wir uns bewegen und unsere Handlungen koordinieren, lässt oft vergessen, welche unglaubliche Leistungen unser Körper alltäglich vollbringt.

Ich bedanke mich herzlich bei denjenigen, die mich bei der Fertigstellung dieser Arbeit so tatkräftig unterstützt haben. Meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr. Ulrich, danke ich für die vielen Anregungen, die mir bei der Planung der Experimente und bei dem Verfassen der Arbeit sehr weiterhalfen. Herrn Dr. Rinkenauer danke ich dafür, dass seine Tür – im wahrsten Sinn der Worte – immer für mich offen stand. Die zahlreichen Diskussionen und seine Hilfe bei „technischen“ Problemen haben mir zu vielen Lösungen und neuen Ideen verholfen.

Frau Eva Kühlwein, Frau Steffi Plenio und Herrn Kai-Markus Müller danke ich für die Mithilfe bei der Durchführung der Experimente. Herrn Dr. Hartmut Leuthold, Herrn Prof. Dr. Jeff Miller sowie der Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Werner Sommer danke ich für die Diskussionen über die Ergebnisse der Arbeit. Herrn Prof. Dr. Jeff Miller danke ich darüber hinaus für die Bereitstellung des Statistik-Programms „MrF“, mit dem sämtliche Analysen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Der „Landesgraduiertenförderung Baden-Württemberg“ danke ich für das mir gewährte Stipendium, das mir die Finanzierung meiner Arbeit vor der Einstellung als wissenschaftlicher Angestellter am Psychologischen Institut der Universität Tübingen ermöglichte.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für die moralische Unterstützung, gerade in der Endphase der Arbeit. Mein besonderer

Dank gilt meiner Frau Anja für Ihre Geduld und Ihr Verständnis, wenn ich – wie leider so oft – später als erwartet aus dem Institut nach Hause kam.

Hinweise zur Makro- und Mikrotypografie

Die vorliegende Arbeit wurde mit Hilfe des $L^A T_E X$ -Pakets „KOMAScript“ unter Berücksichtigung der mikrotypografischen Regeln nach Neubauer (1996, 1997) gesetzt. An Stelle des üblichen Dezimalkommas wurde im gesamten Text der Dezimalpunkt zur Abtrennung der Dezimalstellen verwendet, um die Lesbarkeit der Darstellung der statistischen Analysen zu erhöhen.

Die Darstellung der Ergebnisse der statistischen Analysen, der Abbildungen und Tabellen, sowie der Verweise auf die verwendete Literatur erfolgte – mit Anpassungen an den deutschen Sprachgebrauch – nach den Richtlinien der „American Psychological Association“.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
1 Einleitung	8
1.1 Klassifikation motorischer Reaktionen	9
1.2 Isometrische Kraftimpulse	10
1.2.1 Kontrolle der Reaktionskraft	12
1.2.2 Kontrolle der Kraftanstiegszeit	16
1.2.3 Das Parallel Force Unit Model	17
1.3 Programmierung motorischer Reaktionen	20
1.3.1 Einfluss von Reaktionseigenschaften auf die Reaktionszeit	23
1.3.2 Einfluss der Kraftanstiegszeit auf die Reaktionszeit	25
1.4 Vorbereitung motorischer Reaktionen	30
1.4.1 Das Response Priming-Paradigma	30
1.4.2 Das Hinweisreiz-Paradigma	31
1.4.3 Das Modell der Parameterspezifizierung	33
1.4.4 Das Lateralisierte Bereitschaftspotential	35
1.5 Zusammenfassung und Zielsetzung dieser Arbeit	38
2 Experiment 1	42
2.1 Methode	43
2.1.1 Versuchspersonen	43
2.1.2 Versuchsapparatur und Reize	43
2.1.3 Prozedur	45
2.2 Versuchsplan	49
2.3 Ergebnisse	49
2.3.1 Definition von falschen Reaktionen	50

2.3.2	Aufgabenbewältigung	50
2.3.3	Reaktionszeiten und Fehler	53
2.3.4	Optimale Reaktionen	55
2.4	Diskussion	57
3	Experiment 2	59
3.1	Methode	60
3.1.1	Versuchspersonen	61
3.1.2	Prozedur	61
3.2	Versuchsplan	62
3.3	Ergebnisse	62
3.3.1	Aufgabenbewältigung	62
3.3.2	Reaktionszeiten und Fehler	64
3.4	Diskussion	67
4	Experiment 3	70
4.1	Methode	72
4.1.1	Versuchspersonen	72
4.1.2	Prozedur	72
4.2	Versuchsplan	73
4.3	Ergebnisse	73
4.3.1	Aufgabenbewältigung	73
4.3.2	Reaktionszeiten und Fehler	75
4.4	Diskussion	77
5	Experiment 4	80
5.1	Methode	84
5.1.1	Versuchspersonen	84
5.1.2	Prozedur	85
5.2	Versuchsplan	89
5.3	Ergebnisse	89
5.3.1	Aufgabenbewältigung	89
5.3.2	Reaktionszeiten und Fehler	92
5.3.3	Elektrophysiologische Ergebnisse	94
5.4	Diskussion	100
5.4.1	Verhaltensdaten	100
5.4.2	CNV	101

5.4.3	P300	102
5.4.4	LRP	104
6	Allgemeine Diskussion	106
7	Zusammenfassung	120
	Literaturverzeichnis	121
	Anhang	133
A	Tabellarische Zusammenfassung der Verhaltensdaten	134
A.1	Experiment 1	134
A.2	Experiment 2	135
A.3	Experiment 3	136
A.4	Experiment 4	137
B	Varianzanalysen (Verhalten)	139
B.1	Experiment 1	139
B.2	Experiment 2	141
B.3	Experiment 3	143
B.4	Experiment 4	145
C	Tabellarische Zusammenfassung der elektrophysiologischen Daten	147
C.1	LRP und HEOG	147
C.2	CNV und P300	148
D	Varianzanalysen (Elektrophysiologie)	149
D.1	LRP und HEOG	149
D.2	CNV und P300	150
	Lebenslauf	151

1 Einleitung

Um mit unserer Umwelt zu interagieren, sind wir von der Tätigkeit unserer Muskeln abhängig, welche die für unsere motorischen Aktionen und Reaktionen benötigte Kraft bereitstellen. Die kontrollierte Steuerung der erzeugten Kraft ist z.B. Voraussetzung für unsere Fähigkeit zu greifen und Objekte zu manipulieren (Johansson & Westling, 1990). In einigen Modellen zur motorischen Kontrolle bildet die Steuerung der Reaktionskraft die Ausgangsbasis, da die Kraft als Bindeglied zwischen zentralem Steuerungsmechanismus und motorischer Reaktion¹ angesehen wird (Carlton & Newell, 1993; Schmidt & Lee, 1999; Schmidt, Zelaznik, Hawkins, Frank & Quinn, 1979). Nach diesen Modellen werden die Eigenschaften einer schnellen Bewegung (Kinematik) durch die vorausgehende Aktivität der Muskeln (Kinetik) weitgehend bestimmt, so dass man von der kinetischen Ebene auf die beobachtbare Bewegung schließen kann (vgl. Rinkenauer, 2000). Aus diesem Grund ist die Untersuchung der Reaktionskraft für viele Forschungsdisziplinen, wie Medizin, Sportwissenschaften, Kognitive Psychologie und Neurowissenschaften interessant, da man sich durch sie ein besseres Verständnis motorischer Reaktionen und den ihnen zugrunde liegenden motorischen Programmen erhofft. Unter einem motorischen Programm kann dabei in Analogie zu einem Computerprogramm eine Anzahl von „Reaktionskommandos“ verstanden werden, die für die Ausführung einer motorischen Reaktion notwendig und hinreichend sind (z.B. Keele, 1968; Keele, Cohen & Ivry, 1990; Rosenbaum, 1980; Schmidt & Lee, 1999).

¹Da in der überwiegenden Anzahl der in dieser Arbeit vorgestellten Studien Versuchspersonen motorische Handlungen auf Reize durchführten, wurde nachfolgend aus Gründen der Übersichtlichkeit auf eine explizite Unterscheidung von motorischen Reaktionen und motorischen Aktionen verzichtet.

1.1 Klassifikation motorischer Reaktionen

Motorische Reaktionen lassen sich anhand ihrer Eigenschaften klassifizieren. Eine wichtige Unterscheidung ist, ob die Reaktion willkürlich oder unwillkürlich ausgeführt wird. Die Ausführung willkürlicher Reaktionen unterliegt der kognitiven Kontrolle des Ausführenden. Unter unwillkürlichen Bewegungen versteht man hingegen Reflexe, die nicht der kognitiven Kontrolle des Ausführenden unterliegen und festgelegt ablaufen. Eine Mittelstellung bilden rhythmische motorische Muster wie Gehen, Laufen oder Kauen. Bei diesen motorischen Reaktionen unterliegen normalerweise nur die Initiierung und die Beendigung kognitiver Kontrolle, wohingegen die Ausführung in einer stereotypischen, reflex-ähnlichen Weise geschieht (Ghez, 1991).

Eine andere Klassifikation motorischer Reaktionen ist anhand der Belastungsart der beteiligten Muskulatur möglich. Als statisch oder isometrisch werden solche Reaktionen bezeichnet, die nicht zu einer Bewegung führen. Bei diesen Reaktionen entwickeln die beteiligten Muskeln Kraft, ohne dabei ihre Länge zu verändern. Dynamische Reaktionen führen hingegen zu einer Bewegung und lassen sich in drei weitere Unterklassen einteilen. Bei isotonischen Reaktionen ist die Spannung der beteiligten Muskeln konstant, bei auxotonischen variiert die Spannung der Muskeln. Bei der dritten Unterklasse von dynamischen Reaktionen, den isokinetischen Reaktionen, ist die Geschwindigkeit der Bewegung konstant.

Eine weitere Klassifizierung motorischer Reaktionen ist anhand der Reaktionssteuerung möglich, d.h., inwieweit der Ablauf einer Reaktion nach ihrem Beginn beeinflusst werden kann. Kontrollierte bzw. zielgerichtete Reaktionen können während ihrer Ausführung korrigiert werden, falls sich z.B. der zu greifende Gegenstand bewegt². Diese Korrektur wird durch interne Feedback-Mechanismen ermöglicht, die den Ist-Zustand der Bewegung mit dem Soll-Zustand vergleichen. Von ballistischen Reaktionen spricht man hingegen, falls die Dauer der Reaktion zu kurz ist, als dass für Feedbackprozesse genügend Zeit bliebe. Man

²Zielgerichtete Bewegungen bestehen genau genommen aus zwei aufeinander folgenden Komponenten, nämlich einer ballistischen Beschleunigungsphase und der nachfolgenden Korrekturphase (Woodworth, 1899; vgl. Brooks, 1979).

nimmt an, dass ballistische Reaktionen genau so ausgeführt werden, wie sie vom zugrunde liegenden motorischen Programm spezifiziert wurden. Aus diesem Grund werden ballistische Reaktionen häufig in Untersuchungen verwendet, die Fragestellungen zur Programmierung motorischer Reaktionen bearbeiten (einen Überblick geben z.B. Keele et al., 1990).

1.2 Isometrische Kraftimpulse

Ein großer Teil der Arbeiten zur Reaktionskraft innerhalb der Kognitiven Psychologie untersucht willkürliche isometrische Reaktionen. Die Verwendung von isometrischen Reaktionen hat vor allem methodische Gründe, um möglichst viele potentielle Einflussvariablen zu kontrollieren (vgl. Ghez & Gordon, 1987). So entstehen bei dynamischen Reaktionen komplexe Änderungen von Kräften, die auf die Gelenke einwirken, wenn sich die Position der Gliedmaßen während der Bewegung verändert. Ein weiteres Problem bilden Streckreflexe, die durch Veränderungen der Muskellänge hervorgerufen werden und mit zentralen Steuersignalen interagieren, welche die Bewegungstrajektorie steuern.

Abbildung 1.1 zeigt beispielhaft eine empirische Kraftkurve³, d.h., den Verlauf der Kraft über die Zeit, die durch eine isometrische Reaktion hervorgerufen wurde. Reaktionsbeginn und Reaktionsende werden durch das Über- bzw. Unterschreiten einer festgelegten Kraftschwelle definiert. Die Impuls- oder Reaktionsdauer bezeichnet das Intervall von Reaktionsbeginn bis Reaktionsende. Die Kraftamplitude ist als das Maximum der Kraft-Zeit-Funktion, und die Kraftanstiegszeit als das Intervall von Beginn der Kraftkurve bis zur Kraftamplitude definiert. Üblicherweise entspricht die Länge der Kraftanstiegszeit 40-50 % der Länge der Impulsdauer. Der Kraftimpuls entspricht dem Integral der Kraftkurve. Ein weiteres wichtiges Maß ist die (durchschnittliche) Kraftanstiegsrate, die als Quotient aus Kraftamplitude durch Kraftanstiegszeit definiert ist. Bei konstanter Kraftamplitude haben die Kraftanstiegszeit und die Kraftanstiegsrate somit eine umgekehrt-proportionale Beziehung.

³Diese Kraftkurve stammt von der Reaktion einer Versuchsperson des ersten Experiments dieser Arbeit.

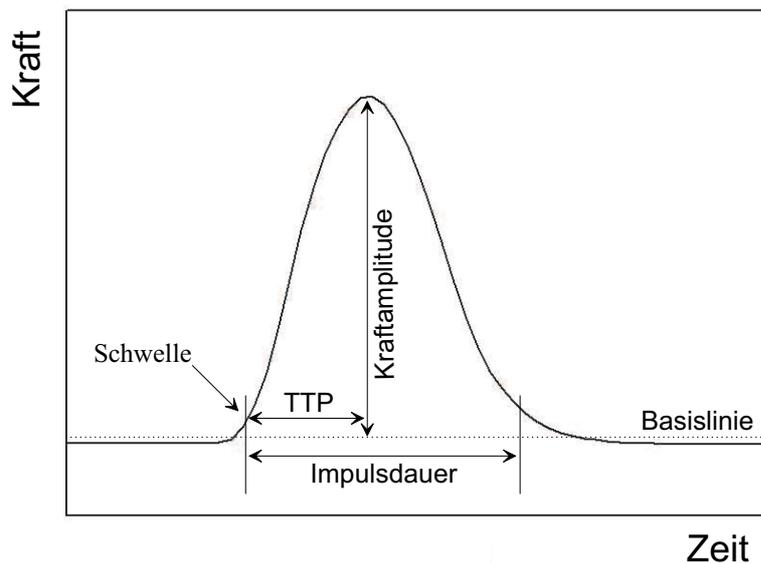


Abbildung 1.1: Beispielhafte Darstellung einer Kraftkurve und ihrer Parameter. Die dargestellte Kraftkurve resultierte aus einer isometrischen Reaktion. TTP (*time to peak force*) = Kraftanstiegszeit.

Die Standardeinheit der Kraft ist das Newton (N). Einige ältere Studien benutzen stattdessen die Einheit Kilogramm (kg), wobei 1 kg genau 9.81 N und somit 1 g ungefähr 1 cN entspricht. Als zusätzliche Einheit wird für die Bestimmung des Kraftimpulses und seiner Parameter in neueren Studien häufig der Prozentsatz der maximalen freiwilligen Kraft (*maximal voluntary force*, MVF) angegeben. Die MVF entspricht der Kraft, die eine Versuchsperson nach Aufforderung maximal entwickeln kann. Das Maß der %MVF wird benutzt, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass unterschiedliche Versuchspersonen eine unterschiedlich hohe Maximalkraft entwickeln können. Dies kann bei Verwendung eines absoluten Maßes zu Konfundierungen bei der Bestimmung einzelner Parameter des Kraftimpulses führen. Zudem lassen sich durch das Maß der %MVF auch Reaktionen unterschiedlicher Muskeln, die unter-

schiedliche absolute Kräfte entwickeln können, besser miteinander vergleichen. Für die Bestimmung der Reaktionszeit wird jedoch üblicherweise ein absolutes Schwellenkriterium benutzt.

1.2.1 Kontrolle der Reaktionskraft

Eine zentrale Frage bezüglich der Steuerung der Reaktionskraft ist, wie die Kraftamplitude einer isometrischen Reaktion kontrolliert wird und wie sich dies auf andere Parameter des Kraftimpulses auswirkt. Nach dem Modell der prototypischen Funktion (Meyer, Smith & Wright, 1982; Schmidt et al. 1979) unterliegt der Verlauf der Beschleunigungs-Zeit-Funktion während der ballistischen Phase einer Bewegung einer stereotypischen Form (vgl. auch Ulrich, Wing & Rinkenauer, 1995). Unterscheiden sich die Bewegungen in Amplitude oder Dauer, wird nach diesem Modell die Beschleunigung nach Größe oder Zeit skaliert. Das Prinzip der Skalierung ist dabei folgendermaßen definiert. Beschreibt die Funktion $f(t)$ den Verlauf der Kraft über die Zeit, besagt die Hypothese der Skalierung, dass eine bestimmte Funktion $f(t)$ durch Skalierung einer zugrunde liegenden Kraft-Zeit-Funktion $g(t)$ entsteht, d.h.

$$f(t) = a \cdot g(t \cdot b), \quad a > 0 \text{ und } b > 0. \quad (1.1)$$

Die Konstanten a bzw. b kontrollieren hierbei die Amplitude bzw. die Dauer von $f(t)$.

Wenngleich es widersprüchliche Evidenz für das Modell der prototypischen Funktion bei dynamischen Reaktionen gibt (Abrams, Meyer & Kornblum, 1989; Wing & Miller, 1984; Zelaznik, Schmidt & Gielen, 1986), könnte es sein, dass die bei isometrischen Reaktionen entstehenden Kraftimpulse einer Skalierung im Sinne der prototypischen Funktion unterliegen. Ein Grund für das Fehlen eindeutiger Evidenz für Skalierung bei Bewegungen könnten auftretende Veränderungen der Muskellänge (Winters & Stark, 1987) sein, die eine auf der kinetischen Ebene bestehende Skalierung maskieren (vgl. Ulrich et al., 1995).

Die Abbildung 1.2 zeigt die Auswirkungen verschiedener Skalierungen auf die Parameter des Kraftimpulses nach dem prototypischen Modell (modifiziert nach Ulrich et al., 1995). Werden sowohl Dauer als auch Amplitude skaliert, d.h. sowohl die Konstante a als auch die Konstante

1.2 Isometrische Kraftimpulse

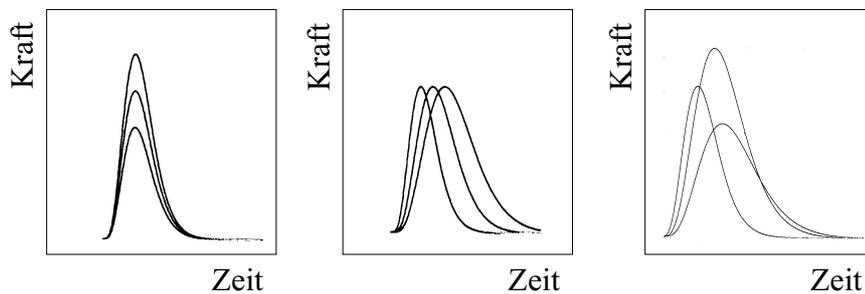


Abbildung 1.2: Beispiele für die Skalierung von Kraftimpulsen (modifiziert nach Ulrich et al., 1995). Dargestellt sind Beispiele für reine Amplitudenskalierung (links), reine Dauerskalierung (mitte) und gleichzeitige Amplituden- und Dauerskalierung (rechts).

b verändert, unterscheiden sich die Kraftanstiegszeiten und die Kraftamplituden der Kraftimpulse, wohingegen die Form der Kraftimpulse konstant bleibt. Bei reiner Amplitudenskalierung (nur die Konstante a wird verändert) unterscheiden sich die Kraftamplituden, aber Form und Kraftanstiegszeit⁴ sind für alle Kraftimpulse identisch. Bei reiner Dauerskalierung (nur die Konstante b wird verändert) unterscheiden sich die Kraftanstiegszeit, aber Form und Kraftamplitude sind für alle Kraftimpulse identisch.

Erste Hinweise dafür, dass die Kraftamplitude durch Amplitudenskalierung kontrolliert wird, lieferte die Studie von Freund und Büdingen (1978). Diese Autoren untersuchten anhand isometrischer Flexionen die Beziehung zwischen sehr kurzen Kraftimpulsen und deren Kraftamplitude. In der Zielbedingung (*target condition*) sollten die Versuchspersonen so schnell wie möglich eine Kraftamplitude erreichen, die nicht mehr als 10 % von der vorgegeben Zielkraft abweichen durfte. In der

⁴Diese Vorhersage stimmt streng genommen nur, wenn der Bestimmung der Kraftanstiegszeit eine relative Kraftschwelle (z.B. 5 % der Kraftamplitude) zugrunde liegt. Bei Verwendung einer absoluten Schwelle würde man hingegen einen leichten Anstieg der Kraftanstiegszeit mit zunehmender Kraftamplitude erwarten. Leichte Abweichungen von der vorhergesagten Invarianz der Kraftanstiegszeit in einigen der nachfolgend beschriebenen Studien könnten auf dieses „Berechnungsartefakt“ zurückzuführen sein.

freien Bedingung (*nontarget condition*) war keine Zielkraft vorgegeben. Die Versuchspersonen wurden in dieser Bedingung lediglich instruiert, Kraftimpulse mit minimaler Dauer zu produzieren, wobei sie die Kraftamplitude der Impulse von Durchgang zu Durchgang variieren sollten. Ein wichtiger Befund war, dass die Versuchspersonen keine Kontraktionen mit einer Kraftanstiegszeit von unter ca. 80 ms produzieren konnten. Kraftanstiegszeiten dieser Größenordnung scheinen ein physiologisches Limit darzustellen, dass nach Meinung der Autoren jedoch nicht aufgrund der mechanischen Eigenschaften der Muskelfasern zu bestehen scheint.

Der zweite wichtige Befund war, dass die Kraftkurven der produzierten Kraftimpulse nahezu die gleiche Form aufwiesen und die Kraftanstiegszeiten auch für Reaktionen mit unterschiedlicher Kraftamplitude innerhalb der freien Bedingung nahezu konstant waren. Reaktionen mit unterschiedlicher Kraftamplitude aber konstanter Kraftanstiegszeit können nur dadurch erreicht worden sein, dass die Versuchspersonen die Höhe der Kraftanstiegsrate variierten. Der stark lineare Zusammenhang zwischen Kraftamplitude und Kraftanstiegsrate und die Formkonstanz der Kraftkurven in den Daten von Freund und Büdingen (1978) deutet darauf hin, dass die Kraftamplitude durch Amplitudenskalierung im Sinne des prototypischen Modells kontrolliert wurde.

Gordon und Ghez (1987) überprüften, ob die Invarianz der Kraftanstiegszeit bei den Experimenten von Freund und Büdingen (1978) möglicherweise nur durch die Instruktion hervorgerufen wurde, möglichst schnelle Kontraktionen und somit Kraftanstiegszeiten am unteren Limit zu produzieren. Die Versuchspersonen mussten in dieser Wahlreaktionsstudie isometrische Flexionen mit ihrem Bizeps durchführen, um jeweils eine von drei möglichen Zielkräften zu erreichen, die ein Verhältnis von 1:2:3 aufwiesen. Das Reaktionssignal spezifizierte, welche der drei Zielkräfte in einem Durchgang erreicht werden musste, die maximale Zielkraft lag zwischen 37 und 53 %MVF. Zusätzlich variierten Gordon und Ghez (1987) blockweise die Art der Instruktion. In der Geschwindigkeitsbedingung (*fast condition*) wurden die Versuchspersonen instruiert, die Zielkraft möglichst schnell zu erreichen, d.h., Kraftimpulse mit möglichst geringer Kraftanstiegszeit zu produzieren. In der Genauigkeitsbedingung (*accurate condition*) wurden sie instruiert, eine möglichst genaue Reaktion durchzuführen, d.h., eine möglichst geringe

Abweichung von der Zielkraft zu produzieren. In beiden Bedingungen unterlagen die Versuchspersonen keinem Reaktionszeitlimit, so dass sie die Reaktion beginnen konnten, wann sie wollten. Jede aus einer Reaktion resultierende Kraftkurve wurde den Versuchspersonen unmittelbar nach jeder Reaktion auf einem Oszilloskop dargeboten, so dass die Versuchspersonen die Güte ihrer Reaktion überprüfen konnten.

Die Versuchspersonen setzten die unterschiedlichen Instruktionen um, was sich in einer geringeren Kraftamplitudenvarianz und einer durchschnittlich längeren Kraftanstiegszeit in der Genauigkeitsbedingung als in der Geschwindigkeitsbedingung zeigte. Wichtig ist, dass die unterschiedlichen Zielkräfte wie in den Experimenten von Freund und Büdingen (1978) durch eine proportionale Veränderung der Kraftanstiegsrate erreicht wurden, wohingegen die Kraftanstiegszeiten für Reaktionen unterschiedlicher Kraftamplitude zumindest in der Genauigkeitsbedingung konstant waren. Die Kraftamplituden der Reaktionen in dieser Bedingung schienen somit durch Amplitudenskalierung kontrolliert worden zu sein. In der Geschwindigkeitsbedingung stiegen die Kraftanstiegszeiten mit zunehmender Kraftamplitude minimal an, was einen leichten Verstoß gegen die Annahme einer reinen Amplitudenskalierung darstellt. Allerdings schien dieser Zusammenhang nach Meinung von Gordon und Ghez (1987) zu schwach zu sein, als dass die Variation der Kraftanstiegszeit in dieser Bedingung maßgeblich an der Kontrolle der Kraftamplitude beteiligt sein könnte.

Die Daten des dritten Experiments von Carlton, Carlton und Newell (1987) legen nahe, dass eine Invarianz der Kraftimpulsform auch dann vorliegt, wenn die Kraftamplitude der Kraftimpulse stark variiert wird. In diesem Experiment mussten die Versuchspersonen isometrische Flexionen mit ihrem Zeigefinger durchführen, wobei zwei unterschiedliche Impulslängen (200 ms bzw. 400 ms) und verschiedene Kraftamplituden (zwischen 1 und 9 N) vorgegeben waren. Die Kraftanstiegszeiten für Kraftimpulse mit einer vorgegeben Impulsdauer von 200 ms stiegen bei einer Verdreifachung der Kraftamplitude nur um ca. 10% von 84 ms auf 94 ms an. Bei der vorgegebenen Impulsdauer von 400 ms lagen die Kraftanstiegszeiten für Kraftamplituden zwischen 3 N und 9 N sogar bei nahezu konstanten 145 ms. Dieses Ergebnis liefert Evidenz dafür, dass auch hohe Änderungen der Kraftamplitude durch Amplitudenskalierung erreicht werden können.

1.2.2 Kontrolle der Kraftanstiegszeit

Wenngleich es vielfältige Belege dafür gibt, dass die Kraftamplitude kurzer isometrischer Reaktionen durch Amplitudenskalierung kontrolliert wird, ist unklar, ob dieses Prinzip auch für Kraftimpulse mit längerer Kraftanstiegszeit gilt. Zudem lieferten die vorgestellten Studien keine Hinweise darauf, ob die Dauer des Kraftimpulses durch die vom prototypischen Modell postulierte Dauerskalierung kontrolliert wird, da die Form von Kraftimpulsen mit unterschiedlicher Kraftanstiegszeit nicht miteinander verglichen wurde. Evidenz für eine Dauerskalierung würde immer dann vorliegen, wenn sich die Form der Kraftimpulse mit unterschiedlicher Kraftanstiegszeit (z.B. Genauigkeitsbedingung vs. Geschwindigkeitsbedingung in der Studie von Gordon & Ghez, 1987) nicht voneinander unterscheiden würden.

Ulrich et al. (1995) überprüften diese Fragestellungen mit Hilfe dreier Experimente. Aufgabe der Versuchspersonen war es, isometrische Flexionen mit dem Zeigefinger durchzuführen. Das erste Experiment stellt eine Erweiterung der Studie von Freund und Büdingen (1978) dar. In der Bedingung „konstante Kraftanstiegszeit“ (*condition fixed rise time*) sollten die Versuchspersonen die Kraftamplitude ihrer Reaktionen von Durchgang zu Durchgang zwischen 20 bis 60 %MVF variieren, aber die Kraftanstiegszeit in einem engen Bereich um 150 ms halten. In der Bedingung „konstante Kraftamplitude“ (*condition fixed peak force*) sollten die Versuchspersonen hingegen die Kraftanstiegszeit ihrer Reaktionen von Durchgang zu Durchgang zwischen 75 und 225 ms variieren, aber die Kraftamplitude in einem engen Bereich um 40 %MVF halten. Die Form der Kraftimpulse wurde mittels der Wellenform-Moment-Analyse (Cacioppo & Dorfman, 1987) analysiert.

Die Analyse ergab, dass die produzierten Kraftimpulse in der Bedingung „konstante Kraftanstiegszeit“ wie in der Studie von Freund und Büdingen (1978) eine nahezu identische Form aufwiesen. Somit scheint auch die Kraftamplitude von isometrischen Reaktionen durch Amplitudenskalierung kontrolliert zu werden, deren Kraftanstiegszeit nicht am unteren physiologischen Limit liegt. Die Formanalyse der Kraftimpulse in der Bedingung „konstante Kraftamplitude“ ergab hingegen, dass es starke Abweichungen zwischen Reaktionen mit unterschiedlicher Kraftanstiegszeit gab. Insbesondere nahm die Schiefe der Kraftimpulse bei

längeren Kraftanstiegszeiten ab. Dieses Ergebnis widerspricht der Annahme des Modells der prototypischen Funktion, dass auch die Dauer eines Impulses durch Skalierung kontrolliert wird.

Das zweite Experiment, in dem Ulrich et al. (1995) drei unterschiedliche Kraftanstiegszeiten mit drei Kraftamplituden faktoriell kombinierten und das dritte Experiment, in dem das Hauptaugenmerk auf isometrischen Reaktionen mit geringer Kraftamplitude lag, unterstützten die Ergebnisse des ersten Experiments. Während klare Anzeichen dafür gefunden wurden, dass die Kraftamplitude isometrischer Reaktionen mit gleicher Kraftanstiegszeit durch Amplitudenskalierung kontrolliert wird, konnte keine Evidenz für die vom Modell der prototypischen Funktion vorhergesagte Dauerskalierung gefunden werden.

1.2.3 Das Parallel Force Unit Model

Das *Parallel Force Unit Model* (PFUM) von Ulrich und Wing (1991, 1993), bietet einen Erklärungsansatz dafür an, warum üblicherweise Amplitudenskalierung aber keine Dauerskalierung bei isometrischen Kraftimpulsen unterschiedlicher Kraftamplitude und gleicher Kraftanstiegszeit bzw. gleicher Kraftamplitude und unterschiedlicher Kraftanstiegszeit festgestellt wird. Die Basisannahme von PFUM ist, dass die beobachtbare Kraft von der Summe der Kräfte abhängt, die durch eine Untergruppe sehr vieler Krafteinheiten erzeugt wird, deren Aktivität voneinander unabhängig ist. Eine Krafteinheit kann dabei als eine Gruppe von Motoreinheiten verstanden werden, deren Aktivität voneinander abhängt. Bei einer kurzen isometrischen Kontraktion sind viele Krafteinheiten beteiligt. Die Kraft, die von einer einzelnen Krafteinheit zu jedem Zeitpunkt der Kontraktion beigesteuert wird, ist dabei als Zufallsvariable definiert. Es wird angenommen, dass nach der Aktivierung einer einzelnen Einheit durch ein zentrales Kommando eine zufällige Verzögerung auftritt, in der die beigesteuerte Kraft der einzelnen Krafteinheit gleich null ist. Nach der Verzögerung steuert die Krafteinheit Kraft nach einer deterministischen, nicht-negativen Kraft-Zeit-Funktion bei, die zeitlich genau in der Länge der Verzögerung versetzt ist. Mit der Vereinfachung, dass die Kraft-Zeit-Funktion einer einzelnen Krafteinheit eine rechtwinklige Form aufweist, folgt, dass zum Zeitpunkt L_i , der

dem zentralen Kommando nachfolgt, die Krafteinheit i zu rekrutieren, eine konstante Kraft a_i für die Dauer d_i wirkt. Somit kann die durchschnittliche Kraft-Zeit-Funktion als

$$E[(F_0(t))] = b \cdot a \cdot [F(t) - F(t - d)], \quad a > 0 \text{ und } b > 0 \quad (1.2)$$

dargestellt werden, wobei $F(\cdot)$ als kumulative Verteilungsfunktion der Latenz L , und b als Anzahl der rekrutierten Krafteinheiten definiert ist (nach Ulrich & Wing, 1993, S. 39). Abbildung 1.3 illustriert dieses Summationsprinzip nach PFUM.

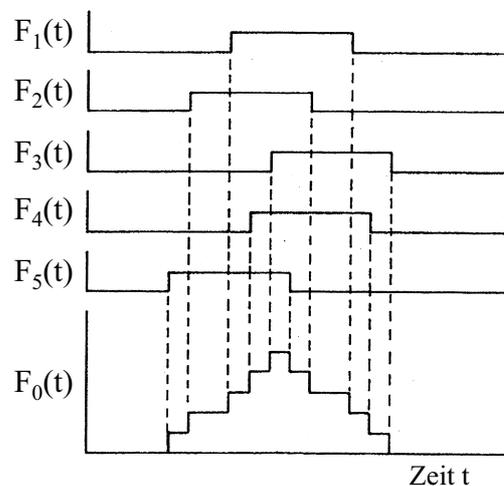


Abbildung 1.3: Illustration des Summationsprinzips nach PFUM. In jedem Durchgang führt ein zentrales Kommando zum Zeitpunkt $t = 0$ nach einer zufälligen Verzögerung zu einer Kraftproduktion vieler Krafteinheiten. Zu jedem Zeitpunkt entspricht die Gesamtkraft, die durch den Muskel erzeugt wird, der Summe der Kräfte aller beteiligten Krafteinheiten (nach Ulrich & Wing, 1993).

Nach PFUM kann die Kraftamplitude grundsätzlich über drei Variablen kontrolliert werden. Eine Kontrollvariable ist die Anzahl der aktivierten Krafteinheiten. Die Kraftamplitude kann dadurch erhöht werden, indem mehr Krafteinheiten rekrutiert werden. Die Form des

Kraftimpulses wird nicht verändert, wenn die Kraftamplitude nur durch die Anzahl der rekrutierten Krafteinheiten kontrolliert wird, d.h., PFUM sagt für diesen Fall Amplitudenskalierung und eine Invarianz der Kraftanstiegszeit voraus. Das gleiche gilt, wenn die Kraftamplitude allein durch das Ausmaß der bereitgestellten Kraft der einzelnen Krafteinheiten kontrolliert wird, oder die Anzahl der Krafteinheiten und die bereitgestellte Kraft der einzelnen Krafteinheiten gleichzeitig verändert werden. Wiederum sollten nach PFUM Kraftimpulse mit unterschiedlicher Kraftamplitude die gleiche Kraftanstiegszeit aufweisen und skalierbar sein.

Wird die Kraftamplitude hingegen auch durch die Aktivierungsdauer der einzelnen Krafteinheiten gesteuert, d.h., durch eine Veränderung der Zeit, während der die einzelne Krafteinheit Kraft bereitstellt, verändert sich zwangsläufig auch die Form des Kraftimpulses. Die spezifische Vorhersage von PFUM für diese Reaktionen ist, dass für Reaktionen mit einer Kraftanstiegszeit am unteren Limit die resultierenden Kraftimpulse rechtsschief sind und Kraftimpulse mit längerer Kraftanstiegszeit zunehmend symmetrisch werden. Eine Erhöhung der Aktivierungsdauer führt – bei einer gleich bleibenden Anzahl von rekrutierten Krafteinheiten – zudem zu einer Verlängerung der Kraftanstiegszeit und einer Erhöhung der Kraftamplitude. Dies liegt daran, dass es durch die Verlängerung der Aktivierungsdauer zu einer größeren Überschneidung der von den einzelnen Krafteinheiten bereitgestellten Kräfte kommt, die sich somit zu einer höheren Gesamtamplitude summieren. Somit sagt PFUM voraus, dass eine Kontrolle der Kraftamplitude durch eine Veränderung der Aktivierungsdauer der einzelnen Krafteinheiten zu nicht skalierbaren Kraftimpulsen und zu einer positiven Korrelation von Kraftamplitude und Kraftanstiegszeit führt.

PFUM macht somit relativ genaue Vorhersagen darüber, wie die Amplitude kurzer isometrischer Kraftimpulse unter unterschiedlichen Vorgaben kontrolliert wird. Werden die Versuchspersonen z.B. instruiert, Kraftimpulse mit unterschiedlicher Kraftamplitude aber konstanter Kraftanstiegszeit zu produzieren, kann die Kontrolle der Kraftamplitude allein durch eine Veränderung der Anzahl rekrutierter Einheiten gewährleistet werden. Die vorgestellten empirischen Daten in der freien Bedingung bei Freund und Büdingen (1978), in der Genauigkeitsbedingung bei Gordon und Ghez (1987) sowie in der Bedingung „konstante

Kraftanstiegszeit“ bei Ulrich et al. (1995) unterstützen diese Vorhersage von PFUM. Werden die Versuchspersonen hingegen instruiert, die Kraftanstiegszeit ihrer Kraftimpulse zu variieren, bedeutet dies, dass zwangsläufig die Aktivierungsdauer der einzelnen Krafteinheiten verändert werden muss. Um eine gleich bleibende Kraftamplitude zu gewährleisten, müsste die Anzahl der rekrutierten Einheiten bei Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit gesenkt werden. Wird die Anzahl der rekrutierten Einheiten hingegen konstant gehalten, sollten Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit eine leicht erhöhte Kraftamplitude aufweisen. Die empirischen Daten in der Zielbedingung bei Freund und Büdingen (1978), in der Geschwindigkeitsbedingung von Gordon und Ghez (1987) und in der Bedingung „konstante Kraftamplitude“ bei Ulrich et al. (1995) liefern Hinweise darauf, dass ein solcher positiver Zusammenhang zwischen Kraftanstiegszeit und Kraftamplitude besteht, wenn es wahrscheinlich ist, dass die Kraftamplitude auch durch die Aktivierungsdauer der Krafteinheiten kontrolliert wird. Zudem unterstützen die Ergebnisse von Ulrich et al. (1995) die von PFUM vorhergesagte Verletzung der Dauerskalierung.

1.3 Programmierung motorischer Reaktionen

Die Annahme des Modells, dass zwei unterschiedliche Modi für die Kontrolle von ballistischen, isometrischen Kraftimpulsen genutzt werden, lässt vermuten, dass der Programmierungsaufwand für unterschiedliche Kraftimpulse unter bestimmten Voraussetzungen nicht einheitlich ist. Unterschiedliche Modelle zur Programmierung motorischer Reaktionen wie das *memory drum model* (Henry, 1980, 1981; Henry & Rogers, 1960) oder das Modell der Parameterspezifizierung von Rosenbaum (1980, 1983)⁵ gehen davon aus, dass sich der Aufwand einer Programmierung durch die Zeit beschreiben lässt, die für die Programmierung benötigt wird. Eine nach dieser Definition aufwendigere Programmierung benötigt für ihren Abschluss somit mehr Zeit als eine vergleichsweise einfache Programmierung. Dieser Zeitunterschied in der Programmierung sollte zu unterschiedlichen Reaktionslatenzen führen,

⁵Dieses Modell wird unter dem Abschnitt „Vorbereitung motorischer Reaktionen“ genauer dargestellt.

d.h., dass die Reaktionszeit nach diesen Modellen als Indikator für die Zeit genutzt werden kann, die das System zur Programmierung der Reaktion benötigt.

Nach Rosenbaum (1983, 1985) können Theorien zu Programmierung motorischer Reaktionen in drei Gruppen eingeteilt werden, die unterschiedliche Annahmen darüber machen, was den Prozess der Programmierung beinhaltet. Eine extreme Position ist, dass für jede denkbare motorische Reaktion ein eigenes, vorgefertigtes motorisches Programm besteht, welches vor der Reaktion abgerufen wird. Kritik an dieser Sichtweise beinhaltet vor allem das Argument, dass es aufgrund der unendlichen Anzahl von möglichen Reaktionen nicht möglich ist, für jede Reaktion ein eigenes Programm bereitzuhalten (vgl. Rosenbaum, 1985).

Die entgegengesetzte extreme Position ist, dass es überhaupt keine vorgefertigten motorischen Programme gibt und vor jeder Reaktion ein entsprechendes Programm aus einzelnen Bausteinen zusammengesetzt wird. Dieses Konzept wurde ebenfalls kritisiert, da es wenig effizient wäre, für jede Reaktion ein eigenes Programm zu generieren und zudem eine unendliche Anzahl von zum Teil nur leicht unterschiedlichen Bausteinen bereitgehalten werden müsste (vgl. Lépine, Glencross & Requin, 1989).

Die dritte Position vereinbart Teilaspekte der beiden extremen Positionen. Nach dieser Sichtweise gibt es zwei Ebenen, auf der die Programmierung einer motorischen Reaktion erfolgt. Auf der höheren Ebene besteht eine Anzahl von prototypischen motorischen Programmen (*“generalized entities“*, Schmidt, 1980; *“abstract representations“*, Keele, 1981; *“movement prototypes“*, Rosenbaum, 1983), die die grundsätzlichen Eigenschaften der Reaktion beschreiben. Erst auf der zweiten Ebene werden diese prototypischen motorischen Programme durch die Spezifizierung von Reaktionsparametern an die genauen Anforderungen angepasst. Unter Reaktionsparametern können dabei „Werte“ für unterschiedliche Dimensionen der Reaktion wie z.B. Richtung, Effektor, oder Dauer verstanden werden, durch deren Festlegung die gewünschte Ausführung der Reaktion gewährleistet wird.

Henry und Rogers (1960) verstanden unter Programmierung das Auslesen eines bestehenden motorischen Programms aus dem Langzeitgedächtnis und lassen sich somit als Vertreter der ersten Position einordnen. Sie postulierten, dass die „Komplexität“ einer Reaktion ausschlag-

gebend für den Aufwand der Programmierung bzw. deren Implementation ist. Die Programmierung, d.h., die Auslesung komplexerer Reaktionen soll danach mehr Zeit benötigen und zu einer erhöhten Reaktionszeit im Vergleich zu einfacheren Reaktionen führen. Das Konzept der „Komplexität“ ist jedoch nicht eindeutig, da komplexere Reaktionen in der ursprünglichen Studie von Henry und Rogers (1960) sowohl eine längere Reaktionsdauer, eine größere Anzahl von Teilbewegungen und eine größere Anzahl von beteiligten Muskelgruppen implizierten und der Reaktionszeitnachteil für komplexere Reaktionen nicht unbedingt auf Unterschiede in der Programmierung zurückzuführen sein müssen (z.B. Anson, 1982).

Nach der dritten, „parametrischen“ Position (z.B. Rosenbaum, 1980, 1983; Schmidt, 1980; Schmidt & Lee, 1999) kann der Aufwand der motorischen Programmierung durch die Zeit definiert werden, die für die Spezifikation aller notwendigen Reaktionsparameter einer Reaktion benötigt wird. Der (zeitliche) Programmieraufwand kann somit prinzipiell durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden. So sollte die Programmierung um so später abgeschlossen werden, je mehr Reaktionsparameter spezifiziert werden müssen. Dies gilt selbst für den Fall, wenn eine parallele Spezifizierung der Reaktionsparameter möglich wäre, da anzunehmen ist, dass die Spezifizierungsdauer der Reaktionsparameter variiert. Unter der Voraussetzung $var(X) > 0$ und $var(Y) > 0$ gilt⁶

$$E[\max(X, Y)] \geq E[X] \quad (1.3)$$

wobei X die Spezifizierungsdauer eines Reaktionsparameters und Y die Spezifizierungsdauer eines anderen Reaktionsparameters darstellen. Auch die Art der Reaktionsdimension kann sich auf den Programmieraufwand auswirken, wenn die Spezifizierung von Werten unterschiedlicher Dimensionen unterschiedlich schnell erfolgt. Ein dritter möglicher Faktor ist, dass die Spezifizierung unterschiedlicher Werte der gleichen Dimension unterschiedlich schnell abgeschlossen wird.⁷

⁶Beweis. Es muss allgemein gelten $\max(X, Y) - X \geq 0$ und daher $E[\max(X, Y) - X] \geq 0 \Rightarrow E[\max(X, Y)] - E[X] \geq 0 \Rightarrow E[\max(X, Y)] \geq E[X]$.

⁷In der Literatur finden sich widersprüchliche Standpunkte, welche der genannten Faktoren tatsächlich einen Einfluss auf den Programmieraufwand haben und ob nicht noch weitere Faktoren bestehen. Insbesondere wird die Ansicht vertreten,

1.3.1 Einfluss von Reaktionseigenschaften auf die Reaktionszeit

Die Frage, ob die Reaktionszeit einer Reaktion durch deren Eigenschaften beeinflusst werden kann, beschäftigte schon Forscher am Ende des 19. Jahrhunderts (Delabarre, Logan & Reed, 1897). Diese frühen Studien lieferten jedoch zum Teil wegen erheblicher methodischer Probleme keine eindeutigen Belege für einen solchen Einfluss, so dass einige Autoren davon ausgingen, dass keinerlei Beziehung zwischen den Eigenschaften einer Reaktion und der Reaktionszeit besteht (Woodworth, 1938; vgl. Carlton & Newell, 1987). Erste Evidenz dafür, dass bestimmte Eigenschaften einer Reaktion die Reaktionszeit beeinflussen können, ergaben Studien, die den Einfluss der Reaktionsdauer auf die Reaktionszeit untersuchten (Klapp, 1977; Klapp & Erwin, 1976; Klapp, Wyatt & Lingo, 1974). In diesen Studien müssen die Versuchspersonen entweder mit einem kurzen oder einem langen Tastendruck⁸ auf ein Reaktionssignal reagieren. In Anlehnung an den internationalen Morsecode werden kurze Reaktionen als *dit*-Reaktionen und lange Reaktionen als *dah*-Reaktionen bezeichnet. Das Hauptergebnis dieses Paradigmas ist, dass die Reaktionszeiten für Reaktionen mit kurzer Dauer häufig kürzer sind als für Reaktionen mit langer Reaktionsdauer. Dieser Effekt wurde häufig als Beleg für die Gültigkeit des *memory drum model* (Henry, 1980, 1981; Henry & Rogers, 1960) angeführt. Die längeren Reaktionszeiten für *dah*-Reaktionen sollen danach den längeren Programmierungs- / Auslesungsprozess dieser Reaktionen reflektieren.

Die Ursachen des *dit-dah*-Effekts werden jedoch kontrovers diskutiert (z.B. Klapp, 1995; Klapp, McRae & Long, 1978; Vidal, Bonnet & Macar, 1991; Vidal, Macar & Bonnet, 1996). So tritt z.B. dieser Effekt zumeist nur bei Wahlreaktionen aber nicht bei Einfachreaktionen auf, bei denen die erforderliche Reaktionsdauer vor der Reaktion bekannt ist⁹(z.B. Klapp

dass die Spezifizierungsdauer unterschiedlicher Werte einer Dimension einheitlich ist und somit keine unterschiedlichen Reaktionszeiten für Reaktionen mit unterschiedlichen Werten innerhalb einer Reaktionsdimension auftreten sollten (z.B. Rosenbaum, 1980).

⁸Die ursprünglichen Studien verwendeten verbale Antworten, die sich in der Silbenanzahl unterschieden (z.B. Klapp, 1974).

⁹Ein Erklärungsansatz für das Fehlen des *dit-dah*-Effekts bei Einfachreaktionen wird

et al. 1974, Vidal et al., 1996).

Auch lässt sich der *dit-dah*-Effekt mit parametrischen Modellen vereinbaren, unter der Annahme, dass die Reaktionsdauer einen Parameter im motorischen Programm darstellt und die Spezifizierung einer längeren Reaktionsdauer mehr Zeit erfordert als die Spezifizierung einer kürzeren Reaktionsdauer. Unterstützung der parametrischen Programmierungssichtweise lieferten Untersuchungen, die darauf hinwiesen, dass nicht die Reaktionsdauer per se im motorischen Programm spezifiziert wird, sondern andere Reaktionseigenschaften, die häufig mit der Reaktionsdauer variieren. So wurde der Einfluss unterschiedlicher Reaktionseigenschaften, wie der Kraftanstiegsrate bei isometrischen Reaktionen (Carlton et al., 1987) bzw. der Bewegungsgeschwindigkeit (Falkenberg & Newell, 1980), der Bewegungsdistanz (Glencross, 1972, 1973; Klapp, 1975) und der Reaktionskraft (Nagasaki, Aoki & Nakamura, 1983) bei dynamischen Reaktionen, auf die Reaktionszeit postuliert.

Allerdings müssen die Ergebnisse dieser Studien zumindest aus zwei Gründen mit Vorsicht interpretiert werden. Zum einen ist die Evidenz für die Abhängigkeit der Reaktionszeit von einzelnen Reaktionseigenschaften – insbesondere bei dynamischen Reaktionen – sehr widersprüchlich. Zum anderen muss ein Effekt einer Reaktionseigenschaft auf die Reaktionszeit nicht automatisch bedeuten, dass diese Eigenschaft einen Reaktionsparameter im motorischen Programm darstellt (vgl. Falkenberg & Newell, 1980). So könnte eine Reaktionseigenschaft, die augenscheinlich die Reaktionszeit beeinflusst, selbst durch die eigentlichen Reaktionsparameter beeinflusst oder kontrolliert werden.

Die Beantwortung der Frage, welche Parameter direkt im motorischen Programm einer motorischen Reaktion spezifiziert werden, um eine geforderte Reaktion zu gewährleisten und welche Reaktionseigenschaften nur indirekt durch die spezifizierten Parameter beeinflusst werden, ist somit von großer Bedeutung für ein besseres Verständnis der zugrunde liegenden motorischen Programme.

im Abschnitt „Vorbereitung motorischer Reaktionen“ dargestellt.

1.3.2 Einfluss der Kraftanstiegszeit auf die Reaktionszeit

Eine Besonderheit in Beziehung auf die der Reaktion zugrunde liegenden motorischen Programmierung sollten nach PFUM (Ulrich & Wing, 1991, 1993) isometrische Kontraktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit bilden. Grundsätzlich müssen nach PFUM die beiden Kontrollparameter Rekrutierungsanzahl und Aktivierungsdauer spezifiziert und miteinander abgeglichen werden, um die durch die Instruktion vorgegebenen Eigenschaften der Reaktion, z.B. eine spezielle Kraftamplitude oder Kraftanstiegszeit, zu gewährleisten. Bei Reaktionen mit einer minimalen Kraftanstiegszeit entfällt jedoch die Spezifizierung der Aktivierungsdauer, da diese durch den kleinsten möglichen Wert festgelegt ist und der gesamte Kraftimpuls über den Kontrollparameter Rekrutierungsanzahl kontrolliert werden kann. Bei Reaktionen mit konstanter, aber längerer Kraftanstiegszeit wird die Kraftamplitude nach PFUM zwar auch allein über die Anzahl der rekrutierten Einheiten kontrolliert. Allerdings muss in diesem Fall auch ein für die jeweilige Kraftanstiegszeit und Kraftamplitude angemessener Wert für den Parameter Aktivierungsdauer berechnet werden. Dies ist umso aufwendiger, da die beiden Parameter nicht unabhängig voneinander auf die Kraftamplitude wirken.

Im Sinne der parametrischen Modelle zur Programmierung motorischer Reaktionen (z.B. Rosenbaum 1980, 1983; Schmidt, 1980; Schmidt & Lee, 1999) sollte die Programmierung von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit schneller abgeschlossen werden können, da ein Reaktionsparameter weniger spezifiziert werden muss. Folglich sollten Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit geringere Reaktionszeiten aufweisen als Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit.

Wenngleich sich keine, dem Verfasser bekannte, Arbeit direkt mit der Frage beschäftigte¹⁰, ob die postulierte unterschiedliche Programmierung von Reaktionen mit minimaler bzw. längerer Kraftanstiegszeit zu einem Reaktionszeitvorteil für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegs-

¹⁰Eine gewisse Ausnahme bildet die nachfolgend beschriebene Studie von van Boxtel, van den Boogaart & Brunia (1993), die jedoch in erster Linie die Frage untersuchte, ob die späte kontingente negative Variation (CNV) aus zwei unterschiedlichen Komponenten besteht.

zeit führt, so gibt es doch eine Reihe von Evidenz für die Existenz eines solchen Reaktionszeitvorteils.

Carlton et al. (1987) überprüften in einer Serie von drei Experimenten, ob die Reaktionszeit eher von der Dauer einer Reaktion oder von der Kraftanstiegsrate einer Reaktion beeinflusst wird. Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, isometrische Flexionen mit dem Zeigefinger ihrer dominanten Hand durchzuführen, wobei die Dauer der Reaktion vorgegeben wurde, die Kraftamplitude der Reaktion jedoch nicht festgelegt war.

In der Wahlreaktionsbedingung des ersten Experiments mussten die Versuchspersonen auf einen von zwei möglichen Zielreizen reagieren, wobei der eine Reiz eine Reaktion mit längerer Impulsdauer und der andere Reiz eine Reaktion mit kürzerer Impulsdauer erforderte. Reaktionen mit vier unterschiedlichen Impulsdauern waren vorgegeben, die alle miteinander kombiniert wurden. Somit ergaben sich sechs Kombinationen (150 vs. 300, 150 vs. 450, 150 vs. 600, 300 vs. 450, 300 vs. 600 und 450 vs. 600 ms), die in zufälliger Reihenfolge von den Versuchspersonen blockweise bearbeitet wurden.

Das im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit wichtigste Ergebnis war, dass in allen Versuchsbedingungen, in denen Reaktionen mit einer Impulsdauer von 150 ms eine der Reaktionsalternativen bildeten (150 vs. 300/400/600 ms), diese grundsätzlich signifikant kürzere Reaktionszeiten aufwiesen als die mit ihnen kombinierten Reaktionen. In den anderen Kombinationen (300 vs. 450/600, 450 vs. 600 ms) ergaben sich hingegen keinerlei Reaktionszeitunterschiede zwischen den Reaktionsalternativen.

Die Reaktionen mit einer Impulsdauer von 150 ms hatten dabei eine Kraftanstiegszeit von durchschnittlich 70-75 ms, während die Kraftanstiegszeit für Reaktionen mit längerer Impulsdauer zwischen 130 ms (Impulsdauer 300 ms) und 270 ms (Impulsdauer 600 ms) lagen. Für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit würde man die von Carlton et al. (1987) beobachtete verkürzte Reaktionszeit erwarten, wenn die von PFUM abgeleitete Annahme zutrifft, dass die Programmierung dieser Reaktionen besonders schnell abgeschlossen wird.¹¹

¹¹Auch die Arbeit von Carlton und Newell (1987) deutet darauf hin, dass Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit eine kürzere Reaktionszeit aufweisen als Reaktio-

1.3 Programmierung motorischer Reaktionen

Auch in den Daten von Sommer, Leuthold und Ulrich (1994) finden sich Hinweise dafür, dass Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit besonders kurze Reaktionszeiten aufweisen. Auch in dieser Studie mussten die Versuchspersonen isometrische Flexionen mit den Zeigefingern durchführen. Die Faktoren Kraftamplitude (10 %MVF, 50 %MVF) und Kraftanstiegszeit (100 ms, 200 ms) wurden faktoriell kombiniert und jede Versuchsbedingung blockweise getestet. Die Reaktionszeiten waren für Kraftimpulse mit kurzer Kraftanstiegszeit rund 30 ms kürzer als für Kraftimpulse mit langer Kraftanstiegszeit¹². In der Arbeit von Ulrich et al. (1995), in der ein ähnlicher Reaktionszeiteffekt aufgetreten sein müsste, wurden leider keine Reaktionszeiten berichtet.

Weitere Evidenz bilden Daten von van Boxtel, van den Boogaart und Brunia (1993). In dieser Studie mussten die Versuchspersonen isometrische Kraft mit einem Pinzettengriff ihres Daumens und Zeigefingers auf einen Dynamometer (*force-transducer*) ausüben. Die Zielkraft von 15 %MVF (Toleranzbereich 11.25 - 18.75 %MVF) musste entweder mit minimaler Kraftanstiegszeit (im Mittel 92 ms) oder mit längerer Kraftanstiegszeit (im Mittel 306 ms) erreicht werden. In der Bedingung „mit Vorinformation“ gab ein Hinweisreiz den Versuchspersonen in jedem Durchgang die Kraftanstiegszeit an, mit der sie reagieren sollten. In der Bedingung „ohne Vorinformation“ gab erst das Reaktionssignal Auskunft über die erforderliche Kraftanstiegszeit. Diese beiden Bedingungen wurden von den Versuchspersonen blockweise bearbeitet, der Faktor Reaktionshand wurde ebenfalls geblockt. Die Autoren berichteten signifikant kürzere Reaktionszeiten¹³ für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit als für Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit. Dieser Effekt lag nach der grafischen Darstellung bei ungefähr 30 ms in der Bedingung „ohne Vorinformation“ und war in der Bedingung „mit Vorinformation“ nahezu verschwunden. Trotz dieses numerischen Unter-

nen mit längerer Kraftanstiegszeit. Allerdings wurden in dieser Studie nur drei Versuchspersonen getestet, so dass diese Studie nicht ausführlicher dargestellt wird.

¹²Dieser Effekt war jedoch nur auf dem 10%-Niveau signifikant.

¹³Van Boxtel et al. (1993) verwendeten in dieser Studie die so genannte „prämotorische“ Reaktionszeit als abhängige Variable. Diese ist als die Dauer des Intervalls vom Präsentationsbeginn des Reaktionssignals bis zum Beginn der Muskelaktivität definiert. Der Begriff „prämotorisch“ ist kritisch zu bewerten, da er impliziert, dass dieses Maß unabhängig von motorischen Prozessen ist.

schieds verfehlte die Wechselwirkung von Kraftanstiegszeit und Art der Vorinformation das Signifikanzniveau.

In der Arbeit von van Boxtel und Brunia (1994) bearbeiteten die Versuchspersonen eine nahezu identische Aufgabe mit Hilfe der gleichen Versuchsausrüstung. Wiederum sollten die Versuchspersonen Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit und Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit produzieren. Allerdings waren in diesem Experiment die beiden zulässigen Kraftanstiegszeitbereiche genauer festgelegt (10-100 ms bzw. 110-200 ms) und die maximal zulässige Reaktionszeit war auf 500 ms beschränkt. Die Autoren berichteten auch in dieser Arbeit signifikant kürzere (prämotorische) Reaktionszeiten für schnelle (221 ms) als für langsamere Kontraktionen (260 ms).

Eine eindeutige Bewertung der vorgestellten Ergebnisse ist schwierig, da zumindest Sommer et al. (1994) bzw. van Boxtel und Brunia (1994) die besonders kurzen Reaktionszeiten für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit nicht diskutierten, da dieser Effekt nicht im Mittelpunkt der Studien lag. Zudem gibt es einige methodische Gründe, die einer eindeutigen Interpretation dieses Reaktionszeiteffekts entgegenstehen. So wurde z.B. in der Untersuchung von Sommer et al. (1994) der Faktor Kraftanstiegszeit geblockt. Somit könnten die gefundenen Reaktionszeitunterschiede auf strategische Effekte zurückzuführen sein (Ulrich, Leuthold & Sommer, 1998). In der Arbeit von Carlton et al. (1987) bestand ein hoher positiver Zusammenhang von Bewegungsdauer bzw. Kraftanstiegszeit und Kraftamplitude, so dass die gefundenen Reaktionszeiteffekte möglicherweise nicht allein auf die unterschiedlichen Kraftanstiegszeiten zurückzuführen sind.

In der Arbeit von van Boxtel und Brunia (1994) waren die Fehlerquoten wegen des engen Zielkraftbereichs und der rigiden Reaktionszeitanforderung äußerst hoch und die sehr unterschiedlichen Fehlerquoten für die einzelnen Bedingungen legen nahe, dass die einzelnen Bedingungen unterschiedlich schwierig waren. Außerdem ist nicht ersichtlich, anhand welchen Kraftkriteriums die Reaktionszeiten bestimmt wurden und ob dieses Kriterium möglicherweise zu den Reaktionszeitunterschieden beigetragen haben könnte.

In der Studie von van Boxtel et al. (1993) ist unklar, wie stark die zulässigen Kraftanstiegszeitbereiche reglementiert waren. Laut den Autoren sollte die Zielkraft entweder in kürzester Zeit oder in einer doppelt so

langen Zeit erreicht werden. Die angegebenen durchschnittlichen Kraftanstiegszeiten sprechen aber dafür, dass Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit im Mittel eine mehr als dreifache Kraftanstiegszeit aufwiesen als Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit. Die durchschnittliche Kraftanstiegszeit für diese Reaktionen von über 300 ms lässt zudem vermuten, dass zumindest ein Teil dieser Reaktionen nicht mehr rein ballistisch ausgeführt wurde. Ein weiteres Problem könnte die Tatsache bilden, dass den Versuchspersonen in den Arbeiten von van Boxtel et al. (1993) und van Boxtel und Brunia (1994) durch ein direktes Feedback angezeigt wurde, wann sie die nötige Zielkraft erreicht hatten.

Carlton et al. (1987) und van Boxtel et al. (1993) interpretierten ihre Ergebnisse als Evidenz für die Annahme, dass ein negativer Zusammenhang von Kraftanstiegsrate und Reaktionslatenz besteht und schlossen auf eine besondere Bedeutung dieses Parameters bei der Programmierung der Reaktionen. Dies mag auf den ersten Blick gleich bedeutend mit der Annahme sein, dass die Kraftanstiegszeit ein wichtiger Parameter bei der Programmierung der Reaktionen ist, da bei einer konstanten Kraftamplitude zwischen Kraftanstiegszeit und Kraftanstiegsrate ein umgekehrt-proportionales Verhältnis besteht. Wichtig ist jedoch, dass sowohl van Boxtel et al. (1993) als auch Carlton et al. (1987) ihre Interpretation auf die Reaktionszeiten von Reaktionen stützen, die eine minimale Kraftanstiegszeit aufweisen. Der entscheidende Punkt ist, dass PFUM (Ulrich & Wing, 1991, 1993) nur für diese Reaktionen eine besonders kurze Reaktionszeit voraussagen würde.

Der Unterschied in den Vorhersagen wird deutlich, wenn man zwei Gedankenexperimente aufstellt. Im ersten Gedankenexperiment sollen die Versuchspersonen entweder Kraftimpulse mit minimaler Kraftanstiegszeit oder Kraftimpulse mit längerer Kraftanstiegszeit produzieren, wobei die Kraftanstiegsrate der Reaktionen konstant sein soll. Um dieses zu erreichen, müssten die Versuchspersonen bei Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit eine kleinere Kraftamplitude erreichen, d.h. schwächer reagieren, als bei Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit. Bei diesem Gedankenexperiment würde man nach PFUM kürzere Reaktionszeiten für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit vorhersagen. Nach Carlton et al. (1987) und van Boxtel et al. (1993) würde man hingegen keine unterschiedlichen Reaktionszeiten erwarten.

Im zweiten Gedankenexperiment sollen die Versuchspersonen mit

Reaktionen gleicher Kraftanstiegszeit aber unterschiedlicher Kraftanstiegsrate produzieren. Auch dieses kann dadurch erreicht werden, dass die Versuchspersonen in der einen Bedingung schwächer reagieren als in der anderen. Bei diesem Gedankenexperiment würde man nach PFUM keine Reaktionszeitunterschiede erwarten. Nach Carlton et al. (1987) und van Boxtel et al. (1993) würde man hingegen kürzere Reaktionszeiten für Reaktionen mit höherer Kraftanstiegsrate erwarten.¹⁴

Die Experimente der vorliegenden Arbeit sollten eine klarere Überprüfung der Frage ermöglichen, ob isometrische Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit tatsächlich kürzere Reaktionszeiten aufweisen als Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit. Zudem sollte untersucht werden, ob die Versuchspersonen Vorinformation über die Kraftanstiegszeit zur Vorbereitung ihrer Reaktionen nutzen können. Deswegen basieren alle durchgeführten Experimente auf dem im folgenden Abschnitt dargestellten Hinweisreiz-Paradigma (Rosenbaum, 1980, 1983), welches eine gleichzeitige Untersuchung der beiden Fragestellungen ermöglichte.

1.4 Vorbereitung motorischer Reaktionen

Es gibt zahlreiche Evidenz dafür, dass verschiedene Informationen für die Vorbereitung von Reaktionen genutzt werden. Zwei Verfahren werden insbesondere eingesetzt, um die Vorbereitung motorischer Reaktionen zu untersuchen.

1.4.1 Das Response Priming-Paradigma

Die *response priming*-Technik wurde von Rosenbaum und Kornblum (1982) entwickelt und hat ihre Wurzeln in den *priming*-Methoden von LaBerge, Van Gelder und Yellott (1970) bzw. Posner und Snyder (1975).

¹⁴Die Realisierung dieser Gedankenexperimente erfolgte in der vorliegenden Arbeit nicht. Der Grund hierfür war, dass die gleichzeitige Manipulation der Kraftamplitude einerseits, und der Kraftanstiegszeit bzw. der Kraftanstiegsrate andererseits, eine Interpretation der Ergebnisse erschwert hätte. So ist beispielsweise unklar, ob auch die Höhe der Kraftamplitude selbst einen Einfluss auf die Reaktionszeit hat (z.B. Nagasaki et al., 1983) oder nicht (z.B. Ivry, 1986; Ulrich & Mattes, 1996).

In *response priming*-Experimenten wird in jedem Durchgang vor dem Reaktionssignal ein Reiz (*prime*) dargeboten, der mit hoher Wahrscheinlichkeit die erforderliche Reaktion vollständig und korrekt ankündigt (*valides priming*). In einigen Durchgängen ist die Vorinformation jedoch falsch, d.h., die Versuchspersonen müssen eine andere als die durch den *prime* angekündigte Reaktion ausführen (*invalides priming*).

Rosenbaum und Kornblum (1982) präsentierten in jedem Durchgang als *prime* einen Ton, der den Versuchspersonen anzeigte, welchen Finger sie vorbereiten sollten (z.B. hoher Ton: linker Zeigefinger, tiefer Ton: rechter Zeigefinger). Eine Sekunde später wurde ein zweiter Ton dargeboten, auf den die Versuchspersonen per Tastendruck reagieren mussten. In 75 % aller Durchgänge waren erster und zweiter Ton identisch (*valide priming*-Bedingung), in 25 % nicht (*invalide priming*-Bedingung). Die Reaktionszeiten für Durchgänge der validen *priming*-Bedingung waren um mindestens 100 ms kürzer als für Durchgänge der invaliden *priming*-Bedingung.

Dieses Ergebnis wird durch andere Untersuchungen unterstützt. Grundsätzlich ergeben sich kürzere Reaktionszeiten und geringere Fehlerquoten mit validen *primes* als mit invaliden *primes*. Zudem steigen die Reaktionszeiten und Fehlerquoten bei invalidem *priming* um so mehr an, je größer die Differenz zwischen angekündigter und tatsächlich erforderter Reaktion ist (Requin, 1985; Rosenbaum & Kornblum, 1982). Ergebnisse elektrophysiologischer Untersuchungen legen nahe, dass die durch den *prime* angekündigten Reaktionen tatsächlich vorbereitet werden (Eimer, 1995; Gratton et al., 1990).

1.4.2 Das Hinweisreiz-Paradigma

Das zweite Standardverfahren zur Untersuchung motorischer Vorbereitung bildet das Hinweisreiz-Paradigma (*movement precuing paradigm*), das von Rosenbaum (1980, 1983) entwickelt wurde, um Aufschluss über das einer Reaktion zugrunde liegende motorische Programm zu erlangen. In diesem Paradigma müssen die Versuchspersonen so schnell wie möglich auf ein Reaktionssignal reagieren, wobei jede mögliche Reaktion einem separaten Reaktionssignal zugeordnet ist. Vor dem Reaktionssignal wird ein Hinweisreiz (*precue*) dargeboten, der volle, teilweise

oder keine Vorinformation über die auszuführende Reaktion beinhaltet.

In der ursprünglichen Studie von Rosenbaum (1980) mussten die Versuchspersonen Zeigebewegungen mit der linken und rechten Hand auf räumlich angeordnete Tasten durchführen. Zu Beginn jedes Durchgangs ruhten die Hände auf separaten Ausgangstasten. Vor und hinter jeder Ausgangstaste befanden sich je zwei Zieltasten, eine in geringerer, eine in weiterer Entfernung. Jede der acht Zieltasten war in einer unterschiedlichen Farbe markiert. Als Reaktionssignal wurde ein farbiger Punkt dargeboten, die Versuchspersonen mussten bei der Präsentation des Reaktionssignals die Zieltaste mit der entsprechenden Farbe drücken.

Vor dem Reaktionssignal wurde ein Hinweisreiz in Form von drei Buchstaben dargeboten. Jeder Buchstabe spezifizierte eine der drei Reaktionsdimensionen Arm (*L-left, R-right*), Richtung (*F-orward, B-ackward*) bzw. Entfernung (*N-ear, D-istant*), der Buchstabe X beinhaltete keine Vorinformation über die geforderte Reaktion. Hinweisreize mit voller Vorinformation (z.B. LBN = *left, backward, near*) spezifizierten alle Reaktionsdimensionen der in diesem Durchgang verlangten Reaktion. Hinweisreize mit partieller Vorinformation enthielten Information über zwei (z.B. LBX) oder lediglich eine (z.B. LXX) der Reaktionsdimensionen, der Hinweisreiz XXX enthielt keinerlei Vorinformation über die auszuführende Reaktion.

Rosenbaum fand um so kürzere Reaktionszeiten, je mehr Vorinformation der Hinweisreiz über die erforderliche Reaktion bereitstellte. Vorinformation bezüglich unterschiedlicher Reaktionsdimensionen trug dabei in unterschiedlichem Maße zum Reaktionszeitvorteil bei. Vorinformation bezüglich der Hand (z.B. LXX) führte zum größten, Vorinformation bezüglich der Entfernung (z.B. XXN) zum geringsten Reaktionszeitvorteil gegenüber Durchgängen ohne Vorinformation (XXX). Zudem zeigte sich im Vergleich mit der Reaktionszeiterparnis durch Vorinformation über zwei Reaktionsparameter eine monotone Beziehung, da die Reaktionszeiterparnis bei Vorinformation über die Hand und die Richtung (LBX) am größten, und bei Vorinformation über Richtung und Distanz (XBN) am geringsten gegenüber Durchgängen ohne Vorinformation war. Ein weiteres Ergebnis war, dass asymmetrische Abhängigkeiten bezüglich der Vorinformation zwischen den Reaktionsdimensionen auftraten. So schien Vorinformation über die Reaktionsdimensionen

Hand und Richtung den Vorinformationseffekt der Reaktionsdimension Distanz zu beeinflussen, wohingegen dies umgekehrt nicht der Fall war.

1.4.3 Das Modell der Parameterspezifizierung

Rosenbaum (1980, 1983) interpretierte seine Ergebnisse als Unterstützung für sein Modell der Parameterspezifizierung. Nach diesem Modell müssen die Parameter des einer Reaktion zugrunde liegenden motorischen Programms vor der Reaktion spezifiziert werden, wobei diese Spezifizierung Zeit benötigt und sich somit auf die Reaktionszeit auswirkt.¹⁵ Vorinformation ermöglicht es, die Spezifizierung des motorischen Programms vollständig (bei voller Vorinformation) bzw. teilweise (bei Vorinformation über einen Teil der Reaktionsparameter) vor Erscheinen des Reaktionssignals vorwegzunehmen, so dass die motorischen Prozesse innerhalb des Informationsverarbeitungssystems um so mehr verkürzt werden, je mehr Reaktionsparameter vor Erscheinen des Reaktionssignals bekannt sind.

Aus dem unterschiedlich großen Vorinformationseffekt für unterschiedliche Reaktionsdimensionen folgte Rosenbaum (1980, 1983), dass die Spezifizierung unterschiedlicher Reaktionsparameter unterschiedlich schnell abgeschlossen ist. Da eine monotone Beziehung zwischen den Vorinformationseffekten für Vorinformation über lediglich eine und über zwei Reaktionsdimensionen auftrat, erfolgt die Spezifizierung der Reaktionsparameter nach Rosenbaum (1980, 1983) in einer seriellen Abfolge. Da Vorinformation über jede einzelne Reaktionsdimension eine Reaktionszeitverkürzung bewirkte, scheint diese serielle Abfolge variabel zu sein. Wäre die Abfolge nicht variabel sondern hierarchisch, hätte alleinige Vorinformation über einen Reaktionsparameter, der nicht an oberster Stelle der Hierarchie angesiedelt ist, keine Spezifizierung dieses Parameters vor dem Erscheinen des Reaktionssignals ermöglicht.¹⁶ Wenngleich die Ergebnisse für eine variable Abfolge der Parameterspezifizierung sprechen, so scheint es dennoch eine bevor-

¹⁵vgl. dazu den Abschnitt „Programmierung motorischer Reaktionen“.

¹⁶Könnte beispielsweise die Reaktionsrichtung erst dann spezifiziert werden, nachdem die Reaktionshand spezifiziert worden ist, sollten Reaktionen der Bedingung „alleinige Vorinformation über die Reaktionsrichtung“ keinen Reaktionszeitvorteil gegenüber Reaktionen der Bedingung „ohne Vorinformation“ haben.

zugte Abfolge für die Spezifizierung einzelner Reaktionsparameter zu geben, da Rosenbaum (1980) asymmetrische Abhängigkeiten bezüglich des Vorinformationseffekts zwischen den verschiedenen Reaktionsdimensionen beobachtete.

Das Modell der Parameterspezifizierung könnte auch das Fehlen des *dit-dah*-Effekts bei Einfachreaktionen erklären. Bei Wahlreaktionen wird die geforderte Reaktionsdauer erst durch das Reaktionssignal vermittelt und muss nachfolgend spezifiziert werden. Der *dit-dah*-Effekt könnte dadurch erklärt werden, dass die Spezifizierung einer längeren Reaktionsdauer mehr Zeit erfordert als die Spezifizierung einer kurzen Reaktionsdauer¹⁷. Bei Einfachreaktionen ist die Reaktionsdauer der Reaktion vor dem Präsentationsbeginn des Reaktionssignals bekannt und kann somit sehr früh spezifiziert werden. Da dieser Spezifizierungsprozess nach dem Modell schon vor dem Erscheinen des Reaktionssignals und somit vor Beginn der Reaktionszeitmessung abgeschlossen ist, können sich unterschiedliche Spezifizierungszeiten für Reaktionen mit kurzer und langer Reaktionsdauer nicht mehr auf die Reaktionszeit auswirken (vgl. Rosenbaum, 1983).

Eine Vielzahl von Experimenten, die zum Teil abgewandelte Versionen des Hinweisreiz-Paradigmas verwendeten, bestätigen im wesentlichen diese Ergebnisse. Mit der Zunahme von Vorinformation findet man zunehmend kürzere Reaktionszeiten und geringere Fehlerquoten (z.B. Anson, Hyland, Kötter & Wickens 2000; Bonnet, Requin & Stelmach, 1982; Miller, 1982), wobei jedoch uneinheitliche Evidenz für eine variable bzw. eine hierarchische Spezifizierungsabfolge gefunden wurde (Goodman & Kelso, 1980; Megaw, 1972; Miller, 1982; Zelaznik, 1981; einen Überblick gibt Rosenbaum, 1983).

Allerdings wurde auch der grundsätzliche Standpunkt von Rosenbaum, dass die Effekte von Vorinformation Auskunft über den Aufbau und die Spezifizierung des zugrunde liegenden motorischen Programms geben können, kontrovers diskutiert. Andere Forscher vertra-

¹⁷Hierfür muss jedoch die zusätzliche Annahme gemacht werden, dass unterschiedliche Werte einer Reaktionsdimension unterschiedlich schnell spezifiziert werden. Rosenbaum (1980) vertrat zumindest in der ursprünglichen Version seines Modells den Standpunkt, dass dieses nicht der Fall ist. Dies widerspricht jedoch zum Teil seinen eigenen Ergebnissen, da Reaktionen mit größerer Distanz eine längere Reaktionszeit aufwiesen als Reaktionen mit kürzerer Distanz.

ten die Meinung, dass die Vorinformation lediglich die Zahl der möglichen Reaktionsalternativen reduziert (z.B. Goodman & Kelso, 1980). Dadurch könnten die nach dem Reaktionssignal an der Reaktionsauswahl beteiligten Prozesse beschleunigt werden und somit die Reaktionszeitersparnis verursachen. Ein weiteres Problem sei, dass möglicherweise mehrere der möglichen Reaktionen vorbereitet werden (z.B. alle Reaktionen mit der rechten Hand, wenn der Hinweisreiz ankündigt, dass das Reaktionssignal eine Reaktion mit der rechten Hand erfordert). Reaktionszeitunterschiede in den unterschiedlichen Vorinformationsbedingungen könnten somit auf Unterschiede bezüglich der Diskriminabilität der vorbereiteten Reaktionen zurückzuführen sein. Zudem vertraten Goodman und Kelso (1980) die Ansicht, dass spezifische Vorinformationseffekte für einzelne Reaktionsparameter nur dann auftreten, wenn eine geringe Reiz-Reaktions-Kompatibilität, d.h., eine „künstliche“ Zuordnung von Reizen zu Reaktionen, vorliegt.¹⁸

Somit wurde vermutet, dass der Reaktionszeitvorteil durch Vorinformation nicht auf einer späten, „motorischen“ Stufe sondern auf einer früheren, „zentralen“ Stufe des Informationsverarbeitungssystems lokalisiert ist.

1.4.4 Das Lateralisierte Bereitschaftspotential

Diese Kontroverse ließ sich mit Verhaltensexperimenten nicht lösen, da der motorische Anteil an der Reaktionszeit nicht zu isolieren ist. Näheren Aufschluss über die Lokalisation des Effekts von Vorinformation über die auszuführende Reaktion lieferten erst Untersuchungen, die als Maß eine Komponente des ereigniskorrelierten Hirnpotentials (EKP) verwendeten. Bei dieser Komponente handelt es sich um das Lateralisierte Bereitschaftspotential (*lateralized readiness potential*, LRP). Das LRP wurde erstmalig unabhängig von zwei verschiedenen Forschergruppen berichtet (De Jong, Wierda, Mulder & Mulder, 1988; Gratton, Coles, Sirevaag, Eriksen & Donchin, 1988). Mehrere hundert Millisekunden vor einhändigen Reaktionen erfolgt eine elektrische Negativierung des EKPs über dem kontralateralen primären Motorkortex. Diese Ne-

¹⁸Auf diesen Kritikpunkt wird in der Allgemeinen Diskussion ausführlich eingegangen.

gativierung zeigt eine handspezifische Reaktionsaktivierung an, deren Beginn als Indikator für den zeitlichen Verlauf reaktionsspezifischer Verarbeitungsstufen angesehen werden kann.

Das LRP wird folgendermaßen erfasst (vgl. Leuthold, Sommer & Ulrich, 1996). Das Elektroencephalogramm (EEG) wird über den Handarealen des Motorkortices (C3', C4' - 1 cm vor C3 bzw. C4 nach dem internationalen 10-20 System; vgl. Jasper, 1958) abgeleitet. Für jeden einzelnen Versuchsdurchgang wird die Differenz zwischen der kontra- und der ipsilateralen Elektrode gebildet, d.h., für Durchgänge, die eine Reaktion mit der linken Hand erfordern, wird die Differenz C4'-C3' berechnet, für Durchgänge, die eine Reaktion mit der rechten Hand erfordern, entsprechend die Differenz C3'-C4'. Die beiden resultierenden Differenzkurven werden zunächst für jede Reaktionsseite und dann über die beiden Seiten gemittelt. Durch diese Mittelung in zwei Schritten werden alle nicht handlungsbezogenen Komponenten eliminiert, das LRP erfasst somit nur reaktionsbezogene EKP-Asymmetrien (De Jong et al., 1988; Gratton et al., 1988). Ein elektrisch negatives LRP kann als Maß für korrekte Reaktionsaktivierung betrachtet werden, ein positives LRP indiziert inkorrekte Aktivierung.

Mit Hilfe des LRP lässt sich die Reaktionszeit in zwei Abschnitte unterteilen, da das LRP sowohl reizbezogen (*stimulus locked* LRP, SLRP), als auch reaktionsbezogen (*response locked* LRP, RLRP) berechnet werden kann. Durch die reizbezogene Auswertung kann der Beginn motorischer Aktivierung bestimmt werden, mit der reaktionsbezogenen Auswertung erhält man die Dauer der motorischen Aktivierung bis zur Reaktionsauslösung (vgl. Osman & Moore, 1993). Ein verkürztes LRP-R-Intervall (Intervall vom Beginn des LRP bis zur Reaktion) reflektiert somit eine Verkürzung später, eher „motorischer“ Prozesse. Ein verkürztes S-LRP-Intervall (Intervall vom Darbietungsbeginn des Reaktionssignals bis zum Beginn des LRP) zeigt hingegen eine Verkürzung früher, eher „vormotorischer“ Prozesse an.

Leuthold et al. (1996) überprüften anhand eines LRP-Experiments, ob der im Hinweisreizparadigma auftretende Reaktionszeitvorteil durch Vorinformation tatsächlich auf motorische Vorbereitung zurückzuführen ist. Die Untersuchung erweiterte die Arbeit von Ulrich, Moore und Osman (1993) durch die Integration zusätzlicher Hinweisreizbedingungen. Die Versuchspersonen mussten Streck- bzw. Beugere-

aktionen mit ihrem linken bzw. rechten Zeigefinger ausführen, wobei jede der vier Reaktionsalternativen einem separaten Reaktionssignal zugeordnet war. Vor dem Reaktionssignal wurde einer von vier möglichen Hinweisreizen dargeboten. Der vollständige Hinweisreiz (*full precue*, FP) spezifizierte sowohl die Reaktionsrichtung (Beugung oder Streckung) als auch die Hand (links, rechts), der Richtungs-Hinweisreiz (*direction precue*, DP) spezifizierte lediglich die Bewegungsrichtung, der Hand-Hinweisreiz (*hand precue*, HP) lediglich die Reaktionshand. Der nicht-informative Hinweisreiz (*no precue*, NP) gab keinerlei Vorinformation bezüglich der auszuführenden Reaktion.

Leuthold et al. (1996) fanden auf der Ebene der Reaktionszeiten die bekannten Effekte. Die schnellsten Reaktionen erfolgten in Durchgängen, in denen der FP vor dem Reaktionssignal dargeboten wurde, die langsamsten Reaktionen erfolgten in Durchgängen, in denen der NP dargeboten wurde. Mittlere Reaktionszeiten in den Bedingungen HP und DP auf, d.h., auch alleinige Vorinformation über die Reaktionshand bzw. die Richtung führte zu einem Reaktionszeitvorteil gegenüber der Bedingung NP. Wichtig ist in diesem Zusammenhang der Vergleich der LRPs zwischen den Bedingungen DP und NP¹⁹. Sollte der Effekt der Vorinformation über die Richtung auf motorische Vorbereitung zurückzuführen sein, sollte nur die Länge des LRP-R-Intervalls, nicht aber der Beginn des reizbezogenen LRP durch diese Vorinformation beeinflusst worden sein. Die Daten von Leuthold et al. (1996) bestätigten diese Hypothese. Das LRP-R Intervall war in der Bedingung DP kürzer als in der Bedingung NP, das S-LRP-Intervall unterschied sich in den beiden Bedingungen hingegen nicht.

Andere Untersuchungen zeigten, dass der Vorbereitungseffekt anderer Reaktionseigenschaften nicht zwingend in späten Stufen der Informationsverarbeitung lokalisiert sein muss. Müller-Gethmann, Rinke-nauer, Stahl und Ulrich (2000) untersuchten in einer ihrer Versuchsbedingungen die Vorbereitung der Kraftamplitude. Die Versuchspersonen mussten isometrische Flexionen mit ihrem linken bzw. rechten Zeigefinger ausführen. Entweder sollte die Kraftamplitude ihrer Reaktionen

¹⁹Da sich durch Vorinformation über die Hand ein LRP noch vor der Präsentation des Reaktionssignals entwickelt (Vorperioden-LRP) können die Bedingungen FP und HP nicht in die Analyse einbezogen werden.

unterhalb („schwach“) oder oberhalb („stark“) eines bestimmten Kriteriums liegen. Vor dem Reaktionssignal wurde ihnen ein Hinweisreiz präsentiert, der entweder Vorinformation oder keine Vorinformation über die Höhe der benötigten Reaktionskraft gab. Die Auswertung der Verhaltensdaten ergab, dass die Versuchspersonen die Vorinformation nutzen konnten. Mit Vorinformation waren die Reaktionszeiten rund 100 ms kürzer als ohne Vorinformation. Die Auswertung des LRP ergab, dass nur die Länge des S-LRP-Intervalls nicht aber die des LRP-R-Intervalls durch die Vorinformation verkürzt wurde. Der Vorbereitungseffekt für die Reaktionskraft scheint somit im Gegensatz zur Bewegungsrichtung auf einer eher zentralen Stufe der Informationsverarbeitung lokalisiert zu sein.

Ob auch die Kraftanstiegszeit wie andere Reaktionseigenschaften vorbereitet werden kann und wo ein eventuell auftretender Vorbereitungseffekt für die Kraftanstiegszeit innerhalb des Informationsverarbeitungssystems zeitlich lokalisiert ist, wurde nach Kenntnis des Verfassers noch nicht mit Hilfe des Hinweisreiz-Paradigmas und des LRP überprüft. Auch diese Fragestellung wurde in der vorliegenden Arbeit untersucht.

1.5 Zusammenfassung und Zielsetzung dieser Arbeit

Nach PFUM (Ulrich & Wing, 1991, 1993) wird die Kontrolle der Kraftamplitude isometrischer Kraftimpulse von zwei²⁰ Variablen gewährleistet, nämlich der Anzahl der rekrutierten Krafteinheiten und der Aktivierungsdauer der einzelnen Einheiten. PFUM sagt voraus, dass die Kraftamplitude von Kraftimpulsen mit gleicher Kraftanstiegszeit allein durch die Anzahl der rekrutierten Krafteinheiten kontrolliert wird und dieses keinen Einfluss auf die Form eines Kraftimpulses hat. Kraftimpulse mit unterschiedlicher Kraftamplitude aber gleicher Kraftanstiegszeit werden somit nach der Amplitude skaliert. Die Kontrolle der Kraftamp-

²⁰Eigentlich wird noch eine dritte Variable, nämlich die absolute Höhe der bereitgestellten Kraft einer Krafteinheit, angenommen. Auf diese wird, aus Gründen der Vereinfachung, hier nicht eingegangen.

litute von Kraftimpulsen unterschiedlicher Kraftanstiegszeit verlangt hingegen nach PFUM immer eine Änderung der Aktivierungsdauer der einzelnen Krafteinheiten. Dieses hat einen Einfluss auf die Form der Kraftimpulse, so dass Kraftimpulse mit unterschiedlicher Kraftanstiegszeit nicht nach der Dauer skaliert werden. Zudem führt nach PFUM eine längere Aktivierungsdauer der einzelnen Krafteinheiten bei einer konstanten Anzahl aktivierter Krafteinheiten zu einer Erhöhung der Kraftamplitude des Kraftimpulses. Somit sagt PFUM eine positive Korrelation zwischen Kraftanstiegszeit und Kraftamplitude voraus. Diese Vorhersagen von PFUM werden durch eine Reihe von empirischen Daten gestützt (Freund & Büdingen, 1978; Gordon & Ghez, 1987; Ulrich et al., 1995).

Freund und Büdingen (1978) zeigten, dass keine Kraftimpulse mit einer Kraftanstiegszeit von unter ca. 80 ms produziert werden können. Nach PFUM muss bei der Programmierung jedes Kraftimpulses ein Abgleich zwischen der Anzahl rekrutierter Krafteinheiten und der Aktivierungsdauer der Krafteinheiten stattfinden, um die gewünschte Kraftamplitude und Kraftanstiegszeit des Kraftimpulses zu gewährleisten. Dieser Abgleich sollte bei Kraftimpulsen mit minimaler Kraftanstiegszeit entfallen, da die Aktivierungsdauer durch den kleinsten möglichen Wert festgelegt ist und nur noch eine geeignete Anzahl von zu rekrutierenden Krafteinheiten spezifiziert werden muss.

Parametrische Modelle zur Programmierung motorischer Reaktionen (Rosenbaum, 1980, 1983; Schmidt, 1980; Schmidt & Lee, 1999) gehen davon aus, dass die Anzahl der zu spezifizierenden Reaktionsparameter den zeitlichen Aufwand der motorischen Programmierung beeinflusst. Je mehr Reaktionsparameter vor der Reaktion spezifiziert werden müssen, desto später ist die Programmierung der motorischen Reaktion abgeschlossen und desto später kann die Reaktion ausgeführt werden. Unterstützung erhalten diese Modelle durch Studien, die das Hinweisreiz-Paradigma verwendeten (z.B. Bonnet et al., 1982; Miller, 1982; Rosenbaum, 1980). Das typische Ergebnis dieser Studien ist, dass die Reaktionszeit einer Reaktion um so kürzer ist, je mehr Reaktionseigenschaften der erforderlichen Reaktion schon vor der Darbietung des Reaktionssignals bekannt sind.

Zumindest ein Teil dieses Reaktionszeiteffekts reflektiert nach den parametrischen Modellen den unterschiedlichen zeitlichen Aufwand des

Programmierungsprozesses für diese Reaktionen. Können bestimmte Reaktionsparameter schon vor der Darbietung des Programmes im motorischen Programm spezifiziert werden, ist die Programmierung vergleichsweise schnell abgeschlossen und die Reaktion kann schneller ausgeführt werden. Untersuchungen, die neben Verhaltensmaßen auch das Lateralisierte Bereitschaftspotential als abhängiges Maß verwendeten, lieferten widersprüchliche Evidenz dafür, ob die im Hinweisreiz-Paradigma auftretende Reaktionszeitverkürzung durch Vorinformation zumindest teilweise auf späten, „motorischen“ Stufen der Informationsverarbeitung lokalisiert ist, wie dies von parametrischen Modellen zur Programmierung motorischer Reaktionen postuliert wurde (z.B. Leuthold et al., 1996; Müller-Gethmann et al., 2000).

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit bildete die Überprüfung der Frage, ob sich die Programmierung von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit von der Programmierung von Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit unterscheidet. Daher mussten die Versuchspersonen in den Experimenten isometrische Kraftimpulse mit unterschiedlicher Kraftanstiegszeit produzieren. Die spezifische Vorhersage lautete, dass die Programmierung von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit schneller abgeschlossen ist als die Programmierung von Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit. Dies sollte sich in einer kürzeren Reaktionszeit für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit im Vergleich zu Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit zeigen.

Das zweite Ziel der vorliegenden Arbeit bildete die Überprüfung der Frage, ob Vorinformation über die Kraftanstiegszeit zur Vorbereitung der Reaktion genutzt werden kann. Zudem sollte untersucht werden, ob Reaktionen mit minimaler bzw. längerer Kraftanstiegszeit unterschiedlich stark von Vorinformation profitieren. Deswegen basierten alle Experimente auf dem Hinweisreiz-Paradigma (Rosenbaum, 1980, 1983), wobei den Versuchspersonen in der Hälfte der Durchgänge Vorinformation über die erforderliche Kraftanstiegszeit der nachfolgenden Reaktion gegeben wurde.

Die Vorhersage lautete, dass Vorinformation die Spezifizierung der von PFUM postulierten Reaktionsparameter, die die Eigenschaften des Kraftimpulses bestimmen, schon vor Erscheinen des Reaktionssignals ermöglichen sollte. Dies sollte sich in kürzeren Reaktionszeiten in Durchgängen mit Vorinformation als in Durchgängen ohne Vorin-

formation zeigen. Zudem sollte sich der zeitlich aufwendigere Programmierungsprozess für Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit in Durchgängen mit Vorinformation nicht mehr bzw. nur noch vermindert auf die Reaktionszeit auswirken. Daher sollte der Reaktionszeitvorteil für Reaktionen mit minimaler Reaktionszeit in Durchgängen mit Vorinformation geringer ausfallen als in Durchgängen ohne Vorinformation.

In Experiment 1 wurden diese Fragestellungen unter Verwendung von zwei unterschiedlichen Kraftanstiegszeitbedingungen untersucht. Experiment 2 erweiterte die Studie durch die Verwendung einer dritten Kraftanstiegszeitbedingung und Experiment 3 überprüfte den Einfluss potentieller strategischer Effekte. Mit Hilfe von Experiment 4 sollte zudem untersucht werden, wo ein potentiell auftretender Vorbereitungseffekt innerhalb der Informationsverarbeitung zeitlich lokalisiert ist. Aus diesem Grund wurden in diesem Experiment auch das LRP sowie weitere Komponenten des EKP als abhängige Variablen erfasst. Die spezifischen Vorhersagen für die zu erwartenden Ergebnisse auf Ebene des EKP wurden in der Einleitung des Experiments 4 dargestellt.

2 Experiment 1

In Experiment 1 mussten die Versuchspersonen isometrische Flexionen mit einer Kraftanstiegszeit von 100 ms oder einer Kraftanstiegszeit von 200 ms produzieren, wobei sie in der Hälfte der Durchgänge valide Vorinformation über die Kraftanstiegszeit und in der anderen Hälfte keine Vorinformation über die Kraftanstiegszeit erhielten.

Es sollte überprüft werden, ob die Programmierung von Kraftimpulsen mit minimaler Kraftanstiegszeit (um 100 ms) schneller abgeschlossen ist als die Programmierung von Kraftimpulsen mit längerer Kraftanstiegszeit (um 200 ms).¹ Eine unterschiedlich schnelle Programmierung sollte sich in kürzeren Reaktionszeiten für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit im Vergleich zu Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit zeigen. Des Weiteren sollte überprüft werden, ob die Kraftanstiegszeit der Kraftimpulse ähnlich wie andere Reaktionseigenschaften vorbereitet werden kann. Eine solche Vorbereitung sollte zu kürzeren Reaktionszeiten in Durchgängen mit Vorinformation über die Kraftanstiegszeit als in Durchgängen ohne Vorinformation über die Kraftanstiegszeit führen. Unter der Annahme, dass Vorinformation die Spezifizierung der Kraftanstiegszeit noch vor dem Erscheinen des Reaktionssignals erlaubt, ist zudem eine Modulierung des Effekts der Kraftanstiegszeit durch Vorinformation zu erwarten. Die vorhergesagte aufwendigere Programmierung von Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit sollte sich in Durchgängen mit Vorinformation nicht bzw. in einem geringeren Ausmaß auf die Reaktionszeit auswirken als in Durchgängen ohne Vorinformation. Mit Vorinformation über die Kraftanstiegszeit sollte der Reaktionszeitvorteil für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit somit geringer ausgeprägt sein als in Durchgängen ohne Vorinformation.

¹Der Wert von 100 ms liegt leicht über den in der Literatur berichteten minimalen Kraftanstiegszeiten. Dieser Wert wurde gewählt, um auch für Reaktionen mit sehr kurzer Kraftanstiegszeit einen realistischen unteren Toleranzbereich festlegen zu können (vgl. den Abschnitt „Methode“).

2.1 Methode

2.1.1 Versuchspersonen

16 Studenten der Universität Tübingen (sieben weiblich, neun männlich) im Alter von 18 bis 41 Jahren ($M = 25.1$) nahmen an einer jeweils 90-minütigen Sitzung teil. 15 der Versuchspersonen gaben an, Rechtshänder zu sein, eine Versuchsperson war Linkshänderin. Eine weitere Versuchsperson (weiblich, 20, Rechtshänderin) wurde getestet, jedoch wegen einer zu hohen Fehlerquote (12.5 %) von der Datenanalyse ausgeschlossen. Die Versuchspersonen bekamen für ihre Teilnahme entweder eine Bescheinigung über abgeleistete Versuchspersonenstunden, die Pflichtbestandteil ihres Grundstudiums waren, oder eine Aufwandsentschädigung in Höhe von € 10.

2.1.2 Versuchsausrüstung und Reize

Die Sitzung fand in einer abgedunkelten und schallgedämpften Kabine statt, in der die Luftfeuchtigkeit durch einen Luftbefeuchter bei 60 % relativer Luftfeuchtigkeit gehalten wurde. Während des Experiments ruhte der Kopf der Versuchspersonen auf einer Kinn- und Stirnstütze, um Kopfbewegungen zu minimieren, die Fixation auf die Bildschirmmitte zu gewährleisten und den Abstand des Kopfes zum Bildschirm bei konstant 80 cm zu halten. Die Reizdarbietung und die Erfassung von Reaktionen, Reaktionszeiten und Kraftkurven wurde durch einen IBM-kompatiblen Computer kontrolliert.

Reizmaterial

Alle Reize wurden zentral in weiß gegen den blauen Hintergrund eines Farbmonitors mit einer horizontalen Auflösung von 600 Pixeln und einer vertikalen Auflösung von 400 Pixeln präsentiert. Das Fixationskreuz wurde in einer Größe von $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ Sehwinkel dargeboten. Als informative Hinweisreize dienten in Durchgängen mit Vorinformation die Wörter „KURZ“ und „LANG“, deren Größe in etwa $2.2^\circ \times 0.6^\circ$ Sehwinkel betrug und die die erforderliche Kraftanstiegszeit der Reaktion immer korrekt ankündigten. In Durchgängen ohne Vorinformation wurde

2 Experiment 1

ein – bezogen auf die Kraftanstiegszeit – nicht-informativer Hinweisreiz dargeboten, der aus 5 Pluszeichen (+++++) bestand und ebenfalls eine Größe von etwa $2.2^\circ \times 0.6^\circ$ Sehwinkel aufwies. Als Reaktionssignale wurden die Zahlen 1-4 verwendet, deren Größe jeweils ungefähr $0.5^\circ \times 0.6^\circ$ Sehwinkel betrug. Die Rückmeldung erfolgte mittels eines weißen Gitters mit einer Größe von $5.7^\circ \times 5.7^\circ$ Sehwinkel, das aus 25 Quadraten gleicher Größe bestand. Je nach Güte der Reaktion wurde eines der Quadrate des Gitters farbig (grün, gelb oder rot) aufgefüllt.

Erfassung der Reaktionskraft

Die Reaktionskraft wurde mit je einer kraftsensitiven Taste für den linken und rechten Zeigefinger gemessen. Die Krafttasten waren am Ende eines Brettes befestigt, auf dem die Unterarme und Handflächen der Versuchspersonen während eines Experimentalblocks ruhten. Die Tasten bestanden aus einem Federblatt, an dessen einem Ende eine Reaktionshülse für die Zeigefingerspitzen angebracht, und dessen anderes Ende in eine Halterung eingespannt war. Die hohe Steifigkeit der Tasten gewährleistete nahezu rein isometrische Bewegungen. Eine Kraft von 1000 cN bog das freie Ende des Federblatts um ca. 2 mm durch. Die Zeigefingerspitzen der Versuchspersonen ruhten während eines Experimentalblocks entspannt in den Reaktionshülsen, die einen vertikalen Abstand von etwa 2 cm zum Brett hatten. Um eine Reaktion auszuführen, musste die Fingerspitze eines Zeigefingers nach unten gedrückt werden. Am Halterungsende des Federblatts waren jeweils vier Dehnungsmessstreifen befestigt (Hottwinger Baldwin Messtechnik, Typ 6/120LY41), mit deren Hilfe die bei einer Reaktion auf die Reaktionshülse einwirkende Kraft über einen Verstärker als analoges Signal registriert werden konnte. Die Aufzeichnung der Kraft mit einer Abtastrate von 100 Hz begann 200 ms vor der Darbietung des Hinweisreizes. Eine Reaktion wurde registriert, sobald die Reaktionskraft die Schwelle von 50 cN überschritt. Die Reaktionszeit war somit als Intervall vom Präsentationsbeginn des Reaktionssignals bis zur Überschreitung dieser absoluten Schwelle definiert. Der Bestimmung der Kraftanstiegszeit lag hingegen eine relative Schwelle von 5 %MVF zugrunde. Die Kraftanstiegszeit war als die Länge des Intervalls von Überschreitung dieser relativen Schwelle bis zum Maximum der Kraftamplitude der Reaktion definiert.

Die Kraftamplitude der Reaktion wurde in jedem Durchgang relativ zur Ruhelinie berechnet, wobei die Ruhelinie als die durchschnittliche Kraft in den 200 ms vor dem Präsentationsbeginn des Hinweisreizes definiert war.

2.1.3 Prozedur

Übungssitzung

Die Versuchspersonen übten die Aufgabe in einer separaten Sitzung, die sich im Ablauf nicht von der Experimentalsitzung unterschied. Die Übungssitzung wurde beendet, sobald die Fehlerquote des zuletzt bearbeiteten Blocks unter 15 % lag. Hierfür brauchten die Versuchspersonen durchschnittlich 2.1 Blöcke. Direkt im Anschluss an die Übungssitzung begann die Experimentalsitzung.

Ermittlung der maximalen freiwilligen Kraft

Zu Beginn der Übungs- und Experimentalsitzung wurde für jede Versuchsperson die maximale freiwillige Kraft ermittelt, die sie mit dem linken bzw. rechten Zeigefinger ausüben konnte. Hierbei wurden die Versuchspersonen instruiert, beide Zeigefinger gleichzeitig so kräftig wie möglich kurz nach unten zu drücken, wobei die Kraftanstiegszeit der Reaktion nicht über 300 ms liegen durfte. Diese Messung wurde fünfmal durchgeführt. Die maximale freiwillige Kraft für den linken bzw. rechten Zeigefinger wurde durch das arithmetische Mittel der jeweils fünf Messwerte gebildet.

Aufgabe, Reiz-Reaktions-Zuordnung und Festlegung der Kraftimpulsparameter

Je nach Reaktionssignal mussten die Versuchspersonen eine Reaktion mit einer Kraftanstiegszeit (*time to peak force*, TTP) von 100 ms (TTP100) bzw. von 200 ms (TTP200) mit dem linken bzw. rechten Zeigefinger ausführen. Jedes Reaktionssignal erforderte eine andere der vier möglichen Reaktionen. Da nie Vorinformation über die erforderliche Reaktionshand gegeben wurde, spezifizierte erst das Reaktionssignal die

2 Experiment 1

erforderliche Reaktion eindeutig. Die Zuordnung der Reaktionssignale zu den Reaktionen wurde für jede Versuchsperson zufällig ausgewählt. Abbildung 2.1 zeigt beispielhaft die Reiz-Reaktions-Zuordnung für eine Versuchsperson. Die Versuchspersonen wurden instruiert, jeweils mit

	Linke Hand	Rechte Hand
TTP100	1	4
TTP200	2	3

Abbildung 2.1: Beispiel für die Reiz-Reaktions-Zuordnung für eine Versuchsperson.

gleicher Kraftamplitude bei Reaktionen mit kurzer und langer Kraftanstiegszeit zu reagieren. Der Optimalbereich der Kraftamplitude wurde bei 40-60 %MVF ($M = 50\%MVF$) festgelegt, der untere Toleranzbereich lag bei 20-40%MVF und der obere Toleranzbereich bei 60-80%MVF. Die Festlegung der Optimal- und Toleranzbereiche für Reaktionen mit langen bzw. kurzen Kraftanstiegszeiten erfolgte nach dem Weberschen Gesetz. Der Optimalbereich für kurze Kraftanstiegszeiten (TTP100) lag bei 80-120 ms ($M = 100$ ms), der untere Toleranzbereich bei 40-80 ms und der obere Toleranzbereich bei 120-160 ms. Der Optimalbereich für lange Kraftanstiegszeiten (TTP200) lag bei 160-240 ms ($M = 200$ ms), der untere Toleranzbereich bei 80-160 ms und der obere Toleranzbereich bei 240-320 ms. Die Versuchspersonen wurden zudem instruiert, auf den Hinweisreiz zu achten und ihn zur Vorbereitung ihrer Reaktion zu nutzen.

Block-und Durchgangsablauf

Die Versuchspersonen mussten in der Experimentalsitzung insgesamt 9 Blöcke mit jeweils 40 Durchgängen bearbeiten, wobei der erste Block nicht in die Auswertung einbezogen wurde. Jede der acht Versuchsbedingungen wurde fünfmal pro Block getestet, wobei die Abfolge der Durchgänge innerhalb eines Blocks randomisiert wurde. Abbildung 2.2

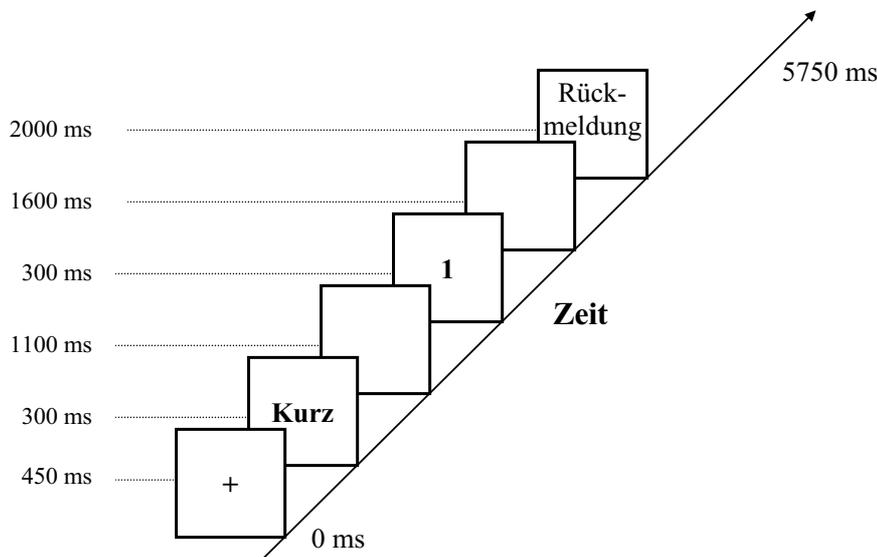


Abbildung 2.2: Schematischer Ablauf eines Durchgangs. In diesem Durchgang wird Vorinformation über die erforderliche Kraftanstiegszeit gegeben und es muss auf das Reaktionssignal „1“ mit einer Reaktion mit „kurzer“ Kraftanstiegszeit (TTP100) reagiert werden. Der Zeitpunkt 0 bezeichnet den Beginn des Durchgangs, der nach 5750 ms beendet war.

zeigt schematisch den Ablauf eines Durchgangs. Jeder Durchgang begann mit der Darbietung des Fixationskreuzes für 450 ms. Danach wurde der Hinweisreiz für 300 ms präsentiert. Nach einem Inter-Stimulus-Intervall (ISI) von 1100 ms wurde das Reaktionssignal für 300 ms darboten, mit dessen Präsentationsbeginn die Reaktionszeitmessung begann. 1600 ms nach Präsentationsende des Reaktionssignals bekamen die Versuchspersonen Rückmeldung über die Güte ihrer Reaktion für 2000 ms. Nach einer Pause (*Inter-Trial-Intervall*, ITI) von 1900 ms begann der nächste Durchgang. Nach einem Block konnten die Versuchspersonen eine Pause machen, in der ihnen die durchschnittliche Reaktionszeit und Fehlerquote des letzten und aller vorangegangenen Blöcke präsentiert wurde. Die Versuchspersonen konnten den nächsten Block selbstständig mit der Leertaste starten.

Durchgangsrückmeldung

Um den Versuchspersonen eine möglichst genaue Rückmeldung über die Güte ihrer Reaktion zu geben, wurde am Ende jedes Durchgangs eine grafische Darstellung ihrer Reaktion in Form eines Gitters präsentiert, das aus 5 x 5 Quadraten bestand. Die Abszisse des Gitters bezeichnete die Güte der Reaktion bezogen auf die Kraftanstiegszeit. Die fünf Abschnitte der Abszisse waren kodiert mit „zu kurz“, „etwas zu kurz“, „optimal“, „etwas zu lang“, und „zu lang“. Die Ordinate des Gitters bezeichnete die Güte der Reaktion bezogen auf die Kraftamplitude. Die fünf Abschnitte der Ordinate waren kodiert mit „zu schwach“, „etwas zu schwach“, „optimal“, „etwas zu stark“, und „zu stark“. Abbildung 2.3 zeigt schematisch das verwendete Rückmeldungsgitter.

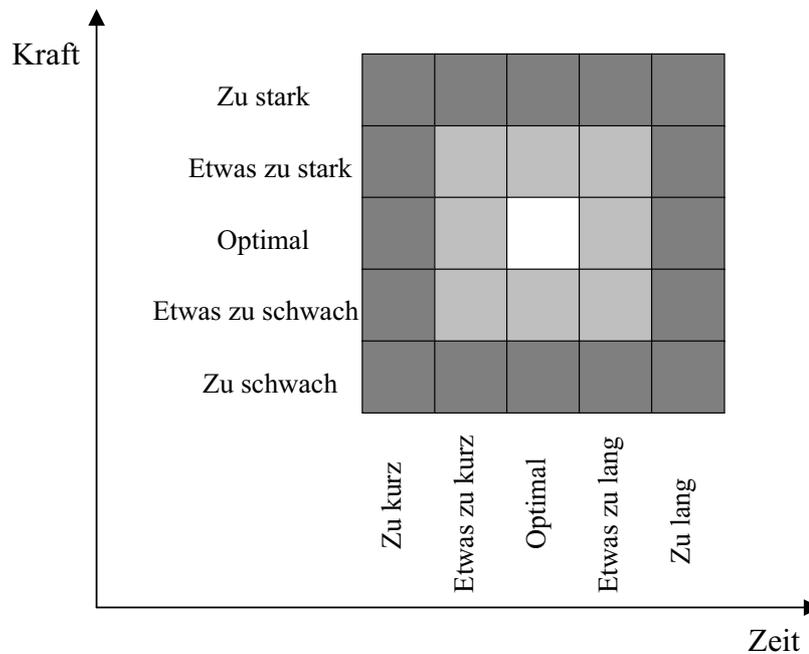


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des Rückmeldungsgitters. Die Kodierung der einzelnen Quadrate wurde im Experiment nicht dargestellt. Vergleiche Text für Details.

Für 1000 ms wurde zunächst nur das weiße Gitter dargeboten. Danach

wurde das, der Güte der Reaktion auf Kraftanstiegszeit- und Kraftamplitudendimension entsprechende, Quadrat farbig aufgefüllt. Bei einer optimalen Reaktion bezogen auf Kraftanstiegszeit und Kraftamplitude wurde das zentrale der 25 Quadrate grün aufgefüllt. Waren entweder die Kraftamplitude, oder die Kraftanstiegszeit oder beide Parameter außerhalb des Optimalbereichs, aber noch innerhalb des Toleranzbereichs, wurde das entsprechende der acht Quadrate, die das zentrale Quadrat umschlossen, gelb aufgefüllt. Waren entweder die Kraftamplitude, oder die Kraftanstiegszeit, oder beide Parameter außerhalb des Toleranzbereichs wurde das entsprechende der 16 äußeren Quadrate des Gitters rot aufgefüllt. Nach weiteren 1000 ms wurde das Gitter gelöscht. Vor dem Experiment und in den ersten Durchgängen der Übungssitzung wurde den Versuchspersonen der logische Aufbau des Gitters erklärt, die Präsentation des Gitters erfolgte grundsätzlich ohne die Kodierungszeichnungen.

Neben der Rückmeldung in Form des Gitters konnten noch die folgenden Rückmeldungen auftreten: (a) „Zu schnell reagiert!“, bei Reaktionszeiten unter 100 ms (Antizipationsfehler); (b) „Zu langsam reagiert!“, bei Reaktionszeiten über 1000 ms; (c) „Falsche Hand!“, bei Reaktionen mit der falschen Hand; (d) „Beide Hände!“, bei Reaktionen mit beiden Händen. In diesen Fällen wurde kein Gitter dargeboten.

2.2 Versuchsplan

Es bestand ein faktorieller Versuchsplan mit Messwiederholung auf den jeweils zweistufigen Faktoren Vorinformation über die Kraftanstiegszeit (mit, ohne), Reaktionshand (links, rechts) und Kraftanstiegszeitbedingung (TTP100, TTP200).²

2.3 Ergebnisse

Da keine Vorhersagen für einen Einfluss des Faktors Reaktionshand auf die Daten bestanden, wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit die

²Nachfolgend wird der Faktor „Vorinformation über die Kraftanstiegszeit“ aus Gründen der Übersichtlichkeit „Vorinformation“ genannt.

Daten dieses und aller weiteren Experimente immer über den Faktor Reaktionshand gemittelt dargestellt. Eventuell aufgetretene Haupteffekte des Faktors Reaktionshand und Wechselwirkungen mit diesem Faktor wurden in den jeweiligen Ergebnisabschnitten selbstverständlich berichtet. Ebenfalls aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden für die einzelnen Fehlerarten in den jeweiligen Ergebnisabschnitten nur signifikante Haupteffekte und Wechselwirkungen ($p < .05$), jedoch keine statistischen Trends ($.05 < p < .1$) berichtet.

In den Tabellen wurden die international üblichen, englischen Abkürzungen für die Reaktionszeit (*reaction time*, RT), die Kraftanstiegszeit (*time to peak force*, TTP), die Kraftamplitude (*peak force*, PF) und die Standardabweichung (*standard deviation*, SD) verwendet.

Im Anhang wurden für die einzelnen Experimente die Daten für alle Versuchsbedingungen (inklusive des Faktors Reaktionshand) tabellarisch zusammengefasst. Zudem wurden im Anhang die vollständigen Ergebnisse aller durchgeführten Varianzanalysen dargestellt.

2.3.1 Definition von falschen Reaktionen

Reaktionen, die außerhalb des tolerierten Bereichs bezüglich Kraftanstiegszeit bzw. Kraftamplitude lagen (Rückmeldungsgitter mit rotem Quadrat), sowie Reaktionen mit zu kurzer Reaktionszeit (< 100 ms), zu langer Reaktionszeit (> 1000 ms), oder Reaktionen mit der falschen Hand bzw. beiden Händen wurden als Fehler gewertet.

2.3.2 Aufgabenbewältigung

Durchschnittlich 4.1 % aller Durchgänge waren Fehlerdurchgänge, die von der Auswertung ausgeschlossen wurden. Die häufigsten Fehler waren Reaktionen mit der falschen Hand oder beiden Händen (1.5 % aller Durchgänge), gefolgt von Reaktionen mit falscher Kraftanstiegszeit (1.2 %). In jeweils 0.7 % aller Durchgänge wurde zu langsam bzw. mit falscher Kraftamplitude reagiert. Antizipationsfehler traten in 0.1 %, und Reaktionen mit sowohl falscher Kraftanstiegszeit als auch falscher Kraftamplitude in unter 0.1 % aller Durchgänge auf.

Neben den geringen Fehlerquoten legen auch die geringen Abweichungen von den vorgegebenen Werten für Kraftanstiegszeit und Kraftamplitude nahe, dass die Versuchspersonen die Aufgabe gut bewältigen konnten. Abbildung 2.4 zeigt für die korrekten Reaktionen die durchschnittlichen Kraftanstiegszeiten und Kraftamplituden und Tabelle 2.1 die Standardabweichungen der Kraftanstiegszeiten und Kraftamplituden, jeweils in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation. Die Varianzanalyse für die Kraftanstiegszeiten ergab, dass

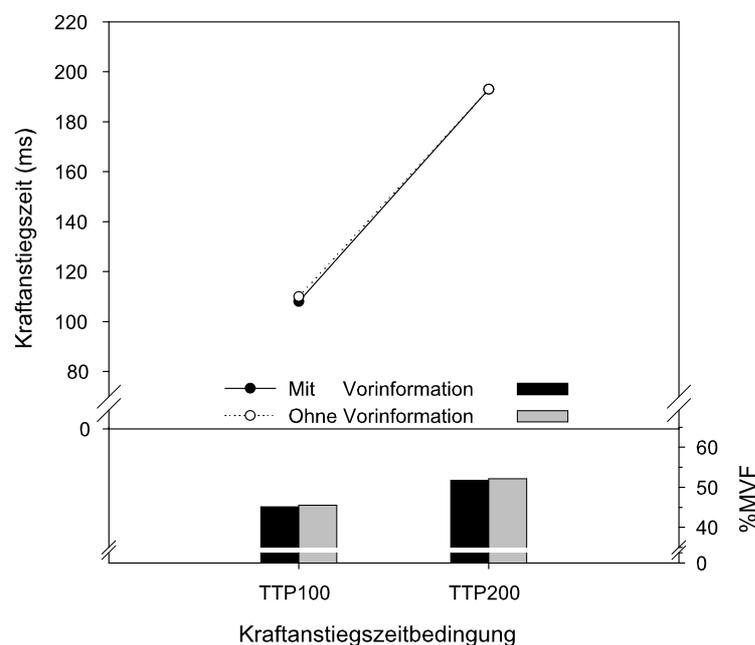


Abbildung 2.4: Durchschnittliche Kraftanstiegszeiten (in ms) und Kraftamplituden (in %MVF), in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation.

die Versuchspersonen in der Bedingung TTP100 Reaktionen mit deutlich geringerer Kraftanstiegszeit (109 ms) als in der Bedingung TTP200 (193 ms) produzierten, $F(1,15) = 205.78$, $MSE = 1093.30$, $p < .01$. Die Faktoren Vorinformation ($F < 1$) bzw. Reaktionshand, $F(1,15) = 2.07$, $MSE = 200.57$, $p > .05$, sowie alle Wechselwirkungen der Faktoren erwiesen

2 Experiment 1

Tabelle 2.1: Durchschnittliche Standardabweichungen der Kraftanstiegszeit (in ms) und Kraftamplitude (in %MVF) in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation.

Bedingung	SD	
	TTP	PF
<i>Mit Vorinformation</i>		
TTP100	14.8	7.8
TTP200	35.2	7.3
<i>Ohne Vorinformation</i>		
TTP100	15.4	7.7
TTP200	34.9	7.9

Anmerkung. SD: Standardabweichung; TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude.

sich hingegen als nicht signifikant (alle $F's < 1$).

Die Varianzanalyse für die Standardabweichungen der Kraftanstiegszeiten ergab ebenfalls lediglich einen signifikanten Effekt der Kraftanstiegszeitbedingung, $F(1,15) = 78.73$, $MSE = 161.68$, $p < .01$. Wie aufgrund des Weberschen Gesetzes zu erwarten ist, ergab sich eine höhere Standardabweichung in der Bedingung TTP200 (35.0 ms) als in der Bedingung TTP100 (15.1 ms).

Die Varianzanalyse für die Kraftamplituden ergab einen signifikanten Einfluss der Kraftanstiegszeitbedingung, $F(1,15) = 29.35$, $MSE = 47.92$, $p < .01$. In der Bedingung TTP100 reagierten die Versuchspersonen schwächer (45.3 %MVF) als in der Bedingung TTP200 (51.9 %MVF). Der Faktor Vorinformation und die Wechselwirkung der Faktoren Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation hatten hingegen keinen signifikanten Einfluss auf die Höhe der Kraftamplituden (beide $F's < 1$).

Die Varianzanalyse für die Standardabweichungen der Kraftamplitude ergab lediglich einen Trend des Faktors Vorinformation, $F(1,15) = 3.50$, $MSE = 0.71$, $p = .08$, sowie einen Trend für die Wechselwirkung von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation, $F(1,15) = 4.46$, $MSE = 0.63$, $p = .05$.

2.3.3 Reaktionszeiten und Fehler

Abbildung 2.5 zeigt die durchschnittlichen Reaktionszeiten und den Anteil falscher Reaktionen in Abhängigkeit von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung.

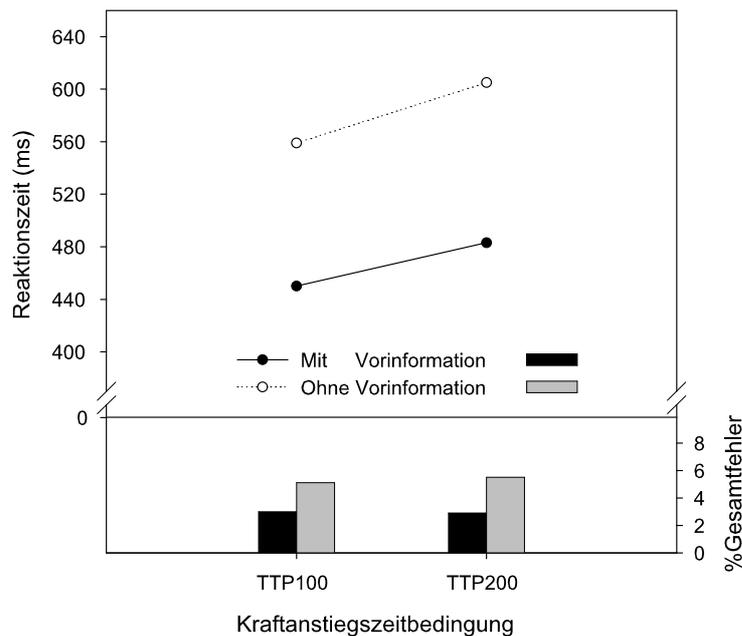


Abbildung 2.5: Durchschnittliche Reaktionszeiten (in ms) und Gesamtfehlerquoten (in %), in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation.

Für die Reaktionszeiten ergab die Varianzanalyse einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Kraftanstiegszeitbedingung, $F(1,15) = 6.21$, $MSE = 8168.30$, $p < .05$. Die Reaktionszeiten in der Bedingung TTP100 waren um 40 ms kürzer als die Reaktionszeiten in der Bedingung TTP200 (504 ms vs. 544 ms). Ebenso ergab sich ein signifikanter Haupteffekt der Vorinformation, $F(1,15) = 76.15$, $MSE = 5578.60$, $p < .01$. Mit Vorinformation über die Kraftanstiegszeit waren die Reaktionszeiten um 115 ms kürzer als ohne Vorinformation (467 ms vs. 582 ms).

2 Experiment 1

Die Wechselwirkung von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung verfehlte hingegen das Signifikanzniveau, $F(1,15) = 3.11$, $MSE = 427.57$, $p = .098$. Jedoch war der Reaktionszeitvorteil für Reaktionen der Bedingung TTP100 gegenüber Reaktionen der Bedingung TTP200 in Durchgängen ohne Vorinformation numerisch größer (46 ms) als in Durchgängen mit Vorinformation (33 ms). Der Faktor Reaktionshand, die Wechselwirkungen von Vorinformation und Reaktionshand bzw. Kraftanstiegszeitbedingung und Reaktionshand (alle F 's < 1), sowie die Dreifach-Interaktion der Faktoren Vorinformation, Reaktionshand und Kraftanstiegszeitbedingung, $F(1,15) = 1.49$, $MSE = 817.03$, $p > .05$, erwiesen sich als nicht signifikant.

Die Varianzanalyse für die Gesamtfehlerprozent ergab lediglich einen signifikanten Einfluss der Vorinformation, $F(1,15) = 13.55$, $MSE = 12.97$, $p < .01$. In Durchgängen ohne Vorinformation (5.3%) unterliefen den Versuchspersonen mehr Fehler als in Durchgängen mit Vorinformation (2.9%).

Die analogen Varianzanalysen für die verschiedenen Fehlerarten zeigten, dass dieser Effekt zum großen Teil auf den höheren Anteil von zu langsamen Reaktionen, $F(1,15) = 22.59$, $MSE = 1.35$, $p < .01$, und auf den höheren Anteil von Fehlern auf der Ebene der Kraftanstiegszeit, $F(1,15) = 9.79$, $MSE = 5.10$, $p < .01$, in Durchgängen ohne Vorinformation als in Durchgängen mit Vorinformation zurückzuführen ist. Für Fehler auf der Ebene der Kraftamplitude ergab sich eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Faktoren Kraftanstiegszeitbedingung und Reaktionshand, $F(1,15) = 7.29$, $MSE = 1.51$, $p < .05$. Bei Reaktionen mit der linken Hand wurden mehr Fehler auf der Ebene der Kraftamplitude in Durchgängen der Bedingung TTP200 als in der Bedingung TTP100 gemacht, bei Reaktionen mit der rechten Hand war dieses umgekehrt. Für alle anderen Fehlerarten ergaben die entsprechenden Varianzanalysen keine signifikanten Effekte. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über den Anteil der verschiedenen Fehlerarten getrennt nach den Versuchsbedingungen.

Insgesamt hatten die Faktoren einen geringen Einfluss auf die Fehlerquoten. Lediglich der Faktor Vorinformation wirkte sich in nennenswerter Weise auf die Gesamtfehlerquoten aus. Entscheidend ist jedoch, dass kein Hinweis darauf besteht, dass die Verhaltensdaten einem *speed-accuracy tradeoff* (vgl. z.B. Osman et al., 2000; Wickelgren, 1977) unter-

lagen. So war die Fehlerquote der Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit nicht höher als die Fehlerquote der Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit und in Durchgängen ohne Vorinformation wurden sowohl längere Reaktionszeiten als auch höhere Gesamtfehlerquoten beobachtet als in Durchgängen mit Vorinformation. In der Diskussion wird daher nur auf die Effekte auf der Ebene der Reaktionszeit eingegangen.

Tabelle 2.2: Anteil falscher Reaktionen (in %), getrennt nach Versuchsbedingungen und Fehlerarten.

Bedingung	Gesamtfehler	Fehlerarten					
		Hand	TTP	PF	TTP+PF	$> RT_{max}$	$< RT_{min}$
<i>Mit Vorinformation</i>							
TTP100	3.0	1.1	0.9	0.5	0.0	0.2	0.2
TTP200	2.9	1.7	0.2	0.7	0.0	0.2	0.1
<i>Ohne Vorinformation</i>							
TTP100	5.1	1.1	2.5	0.7	0.0	0.8	0.0
TTP200	5.5	2.0	1.1	0.8	0.0	1.6	0.0

Anmerkung. TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude; RT: Reaktionszeit; $RT_{max} = 1000$ ms; $RT_{min} = 100$ ms. Abweichungen zwischen der Gesamtfehlerquote und der Summe der einzelnen Fehlerquoten ergeben sich durch Rundung.

2.3.4 Optimale Reaktionen

Um zu überprüfen, ob die relativ großen Toleranzbereiche bezüglich Kraftanstiegszeit und Kraftamplitude die Reaktionszeiten systematisch beeinflussten, wurde eine Varianzanalyse durchgeführt, in die nur solche Durchgänge einbezogen wurden, in denen die Versuchspersonen optimal reagiert hatten³. Dies waren im Durchschnitt knapp die Hälfte aller Reaktionen (49.3 %). Tabelle 2.3 zeigt den Anteil optimaler Reaktionen, sowie die durchschnittlichen Reaktionszeiten, Kraftanstiegszeiten

³Die eigentlich vorzuziehende Auswertung wäre eine Varianzanalyse mit dem zusätzlichen zweistufigen Faktor „Reaktionsgüte“ (optimal, toleriert). Diese Analyse wurde jedoch nicht durchgeführt, da einige Versuchspersonen in einzelnen Bedingungen immer optimal reagierten und somit aus der Analyse ausgeschlossen hätten werden müssen.

2 Experiment 1

und Kraftamplituden dieser Reaktionen für die einzelnen Versuchsbedingungen. Die durchschnittlichen Reaktionszeiten optimaler Reaktio-

Tabelle 2.3: Anteil optimaler Reaktionen und deren durchschnittlichen Reaktionszeiten, Kraftanstiegszeiten und Kraftamplituden, in Abhängigkeit von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung.

Bedingung	Anteil (in %)	RT (in ms)	TTP (in ms)	PF (in %MVF)
<i>Mit Vorinformation</i>				
TTP100	49.8	450	104	47.4
TTP200	52.9	480	194	50.6
<i>Ohne Vorinformation</i>				
TTP100	47.6	554	105	47.9
TTP200	46.7	608	196	50.3

Anmerkung. RT: Reaktionszeit; TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude.

nen unterschieden sich in den einzelnen Versuchsbedingungen nahezu überhaupt nicht von den Reaktionszeiten aller (optimaler und tolerierter) korrekten Reaktionen. Die Varianzanalyse für die Reaktionszeiten optimaler Reaktionen bestätigte den Eindruck, dass die Güte der korrekten Reaktionen keinen nennenswerten Einfluss auf die Reaktionszeiten gehabt haben konnte. Wie für alle korrekten Reaktionen ergab die Varianzanalyse für optimale Reaktionen signifikante Effekte der Faktoren Kraftanstiegszeitbedingung, $F(1,15) = 5.39$, $MSE = 10553.00$, $p < .05$, und Vorinformation, $F(1,15) = 74.64$, $MSE = 5737.80$, $p < .01$, sowie einen Trend für die Interaktion der beiden Faktoren, $F(1,15) = 3.73$, $MSE = 1210.60$, $p = .07$. Es scheint somit angemessen zu sein, alle korrekten Reaktionen als Basis für die Auswertung zu nutzen, um eine möglichst genaue Schätzung der „wahren“ Mittelwerte für die einzelnen Versuchsbedingungen zu erhalten⁴.

⁴In der Auswertung der weiteren Experimente wird daher nicht mehr zwischen optimalen und tolerierten Reaktionen unterschieden.

2.4 Diskussion

In Experiment 1 waren die Reaktionszeiten für Reaktionen mit sehr kurzer Kraftanstiegszeit rund 40 ms kürzer als für Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit. Dies deutet unter der Annahme der kombinierten Vorhersagen von PFUM (Ulrich & Wing, 1991, 1993) und dem Modell der Parameterspezifizierung (Rosenbaum 1980, 1983) darauf hin, dass sich die Programmierung von Reaktionen mit einer Kraftanstiegszeit am unteren möglichen Limit von der Programmierung von Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit unterscheidet. PFUM nimmt an, dass für die Programmierung von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit die Spezifizierung eines einzigen Reaktionsparameters, nämlich die der Anzahl zu rekrutierender Krafteinheiten, ausreichend ist. Für die Programmierung von Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit muss hingegen nach PFUM ein weiterer Parameter, nämlich die Aktivierungsdauer der einzelnen Krafteinheiten, spezifiziert und mit der Anzahl der zu rekrutierenden Krafteinheiten abgeglichen werden. Nach dem Modell der Parameterspezifizierung erhöhen sich der Programmierungsaufwand und folglich die Reaktionszeit, je mehr Reaktionsparameter im motorischen Programm spezifiziert werden müssen.

Ein weiteres Ergebnis liefert zusätzliche Evidenz für die Annahmen von PFUM. Obwohl die Versuchspersonen instruiert wurden, mit gleicher Kraftamplitude in allen Bedingungen zu reagieren, war die durchschnittliche Kraftamplitude in Durchgängen der Bedingung TTP200 signifikant höher als in Durchgängen der Bedingung TTP100. PFUM sagt eine solche positive Korrelation von Kraftanstiegszeit und Kraftamplitude voraus, wenn die Kraftamplitude vorwiegend über die Dauer der Aktivierung der beteiligten Krafteinheiten kontrolliert wird. Ergebnisse experimenteller Studien zur Kontrolle der Kraftamplitude unterstützen diese Vorhersage (Carlton et al., 1987).

Die deutlich kürzeren Reaktionszeiten in Durchgängen mit Vorinformation als in Durchgängen ohne Vorinformation legen nahe, dass die Versuchspersonen die Vorinformation zur Vorbereitung ihrer Reaktionen nutzen konnten. Allerdings ist ein Teil des Effekts mit großer Wahrscheinlichkeit auf den schnelleren Abschluss von Prozessen der Reaktionsauswahl zurückzuführen, da Vorinformation die Anzahl der möglichen Reaktionsalternativen halbierte (Frith & Done, 1986; Hick, 1952;

Miller & Ulrich, 1998).

Der höhere zeitliche Programmierungsaufwand für Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit kann nach dem Modell der Parameterspezifizierung (Rosenbaum, 1980, 1983) zum beobachteten Reaktionszeitnachteil für diese Reaktionen führen. Allerdings sagt dieses Modell auch eine Wechselwirkung zwischen Vorinformation und Kraftanstiegszeit voraus, die zwar numerisch aufgetreten ist, jedoch das Signifikanzniveau verfehlte. Im strengen Sinne des Modells der Parameterspezifizierung sollte der Reaktionszeitunterschied zwischen Reaktionen mit minimaler und längerer Kraftanstiegszeit überhaupt nicht mehr auftreten, wenn (a) sich die Programmierung dieser Reaktionen nur bezüglich des zeitlichen Aufwands unterscheidet, und (b) die Spezifikation der relevanten Reaktionsparameter durch Vorinformation vollständig vor Erscheinen des Reaktionssignals abgeschlossen werden kann.

Dies war im vorliegenden Experiment jedoch nicht der Fall. Selbst wenn die Wechselwirkung nur aufgrund zu geringer statistischer Macht der Analyseverfahren das Signifikanzniveau verfehlte, so scheint auch mit Vorinformation über die Kraftanstiegszeit ein stabiler Reaktionszeitvorteil für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit zu bestehen.

Der in Experiment 1 aufgetretene Reaktionszeitvorteil für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit kann jedoch auch anders erklärt werden. Durch die Verwendung von lediglich zwei unterschiedlichen Kraftanstiegszeiten kann nicht ausgeschlossen werden, dass dieser Reaktionszeitvorteil dem *dit-dah*-Effekt entspricht, da Reaktionen der Bedingung TTP100 eine kürzere Reaktionsdauer aufwiesen als Reaktionen der Bedingung TTP200 (Klapp, 1977; Klapp et al., 1974). Auch die von anderen Autoren (z.B. Carlton et al., 1987) genannte Vermutung, dass die Kraftanstiegsrate einen entscheidenden Einfluss auf die Reaktionszeit hat und Reaktionen mit höherer Kraftanstiegsrate eine kürzere Reaktionszeit aufweisen, kann auf der Basis von Experiment 1 nicht ausgeschlossen werden. Reaktionen der Bedingung TTP100 wiesen – auch unter Berücksichtigung der im Durchschnitt etwas geringeren Kraftamplitude – eine höhere Kraftanstiegsrate auf als Reaktionen der Bedingung TTP200, da zwischen Kraftanstiegsrate und Kraftanstiegszeit bei konstanter Kraftamplitude ein umgekehrt-proportionales Verhältnis besteht. Das Experiment 2 wurde durchgeführt, um zwischen diesen möglichen Erklärungsalternativen unterscheiden zu können.

3 Experiment 2

Experiment 2 entsprach Experiment 1 bis auf die Verwendung der zusätzlichen Kraftanstiegszeitbedingung TTP150. In Durchgängen dieser Bedingung sollten die Versuchspersonen Reaktionen mit einer Kraftanstiegszeit von 150 ms produzieren. Die Verwendung von drei Kraftanstiegszeitbedingungen sollte die Überprüfung der Frage ermöglichen, ob die von PFUM abgeleitete Vorhersage zutreffend ist, dass nur Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit eine besonders kurze Reaktionszeit aufweisen, oder ob der in Experiment 1 beobachtete Reaktionszeitvorteil für diese Reaktionen anders erklärt werden kann.

Der eine alternative Erklärungsansatz, dass die Reaktionsdauer einen maßgeblichen Einfluss auf die Reaktionszeit hat und Reaktionen mit längerer Reaktionsdauer höhere Reaktionszeiten aufweisen (Klapp, 1995; Klapp et al., 1974), macht folgende Vorhersagen für das Experiment 2. Da mit zunehmender Kraftanstiegszeit die Reaktionsdauer ansteigt, sollte die Reaktionszeit um so höher sein, je höher die Kraftanstiegszeit der Reaktionen ist. Somit sollten nach diesem Erklärungsansatz die kürzesten Reaktionszeiten in der Bedingung TTP100, mittlere Reaktionszeiten in der Bedingung TTP150 und die längsten Reaktionszeiten in der Bedingung TTP200 auftreten. Der andere alternative Erklärungsansatz, dass die Kraftanstiegsrate einen maßgeblichen Einfluss auf die Reaktionszeit hat und Reaktionen mit geringerer Kraftanstiegsrate kürzere Reaktionszeiten aufweisen (Carlton et al., 1987; van Boxtel et al., 1993), macht die gleichen Vorhersagen. Da die Kraftanstiegsrate wegen der konstanten Kraftamplitude in der Bedingung TTP100 am höchsten und in der Bedingung TTP200 am geringsten ist, sagt dieser Erklärungsansatz ebenfalls voraus, dass die kürzesten Reaktionszeiten in der Bedingung TTP100, mittlere Reaktionszeiten in der Bedingung TTP150 und die längsten Reaktionszeiten in der Bedingung TTP200 auftreten sollten.

Die von PFUM abgeleitete Hypothese, dass sich die Programmie-

rung von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit von der Programmierung von Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit unterscheidet macht hingegen die Vorhersage, dass nur Reaktionen in der Bedingung TTP100 eine besonders kurze Reaktionszeit aufweisen sollten. Bei diesen Reaktionen muss nach PFUM nur ein Reaktionsparameter spezifiziert werden, so dass die Programmierung besonders schnell abgeschlossen ist. Die Programmierung von Reaktionen der Bedingungen TTP150 und TTP200 sollte sich nach PFUM hingegen nicht voneinander unterscheiden, da bei beiden Bedingungen zwei Reaktionsparameter spezifiziert werden müssen. Die Programmierung dieser Reaktionen sollte somit zeitgleich abschließen werden, so dass kein Unterschied in den Reaktionszeiten für Reaktionen der Bedingungen TTP150 und TTP200 auftreten sollte.

Das Modell der Parameterspezifizierung sagt zudem eine Wechselwirkung zwischen Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation voraus, die in Experiment 1 jedoch knapp das Signifikanzniveau verfehlte. Wenn die geforderte Kraftanstiegszeit vor dem Reaktionssignal angekündigt wird und somit die Programmierung der Reaktion zumindest teilweise vorweggenommen werden kann, sollte der Reaktionszeitvorteil für Reaktionen mit geringerem Programmierungsaufwand in Durchgängen mit Vorinformation kleiner sein als in Durchgängen ohne Vorinformation. Im Detail machen die verschiedenen Erklärungsansätze jedoch unterschiedliche Vorhersagen. Die beiden alternativen Erklärungsansätze sagen vorher, dass die Reaktionen der Bedingung TTP200 am stärksten, Reaktionen der Bedingung TTP150 mit mittlerem Ausmaß und Reaktionen der Bedingung TTP100 am geringsten von Vorinformation profitieren sollten. Nach PFUM sollten die Reaktionen der Bedingungen TTP150 und TTP200 hingegen im gleichen Maße – und stärker als Reaktionen der Bedingung TTP100 – von Vorinformation profitieren.

3.1 Methode

Experiment 2 entsprach Experiment 1 bis auf die nachfolgend beschriebenen Änderungen.

3.1.1 Versuchspersonen

12 Studenten der Universität Tübingen (neun weiblich, drei männlich) im Alter von 18 bis 37 Jahren ($M = 23.8$ Jahre) nahmen an einer jeweils 110-minütigen Sitzung teil. 10 Versuchspersonen gaben an, Rechtshänder zu sein, zwei waren Linkshänder. Zwei weitere Versuchspersonen (Rechtshänder, 47 Jahre; Rechtshänderin, 44 Jahre) nahmen an der Sitzung teil, wurden jedoch wegen einer zu hohen Fehlerquote (27.3 % bzw. 46.6 %) von der Auswertung ausgeschlossen. Drei weitere Versuchspersonen bearbeiteten nur die Übungssitzung. Da ihre Fehlerquote in keinem der acht Blöcke der Übungssitzung unter 15 % lag, wurden sie nicht zur Experimentalsitzung zugelassen. Die Versuchspersonen bekamen für ihre Teilnahme entweder eine Bescheinigung über abgeleistete Versuchspersonenstunden oder eine Aufwandsentschädigung in Höhe von € 12. Keine Versuchsperson hatte zuvor an Experiment 1 teilgenommen.

3.1.2 Prozedur

Übungssitzung

Wie in Experiment 1 bearbeiteten die Versuchspersonen zunächst eine Übungssitzung, bis die Fehlerquote des letzten Blocks unter 15 % lag. Hierfür brauchten die Versuchspersonen durchschnittlich 2.9 Blöcke.

Reiz-Reaktions-Zuordnung und Festlegung der Kraftimpulsparameter

Neben den Kraftanstiegszeitbedingungen TTP100 und TTP200 wurde die zusätzliche Kraftanstiegszeitbedingung TTP150 verwendet. Der Optimalbereich auf Ebene der Kraftanstiegszeit für Reaktionen dieser Bedingung lag bei 120-180 ms ($M = 150$ ms), der untere Toleranzbereich bei 60-120 ms und der obere Toleranzbereich bei 180-240 ms. Die Einführung dieser zusätzlichen Kraftanstiegszeitbedingung ergab folgende Änderungen. Als informativer Hinweisreiz für Reaktionen in der Bedingung TTP150 wurde das Wort „MITTEL“ verwendet, das eine Größe von ca. $3.0^\circ \times 0.6^\circ$ Sehwinkel hatte. Als Reaktionssignale wurden die Zahlen 1-6 verwendet, von denen jede eine andere der sechs möglichen

Reaktionen erforderte. Die Versuchspersonen mussten in diesem Experiment 60 statt 40 Durchgänge pro Block bearbeiten. Dadurch blieb die Anzahl der Versuchsdurchgänge pro Bedingung im Vergleich zu Experiment 1 konstant.

3.2 Versuchsplan

Es bestand ein faktorieller Versuchsplan mit Messwiederholung auf den zweistufigen Faktoren Vorinformation (mit, ohne) und Reaktionshand (links, rechts), sowie dem dreistufigen Faktor Kraftanstiegszeitbedingung (TTP100, TTP150, TTP200). Bei Verletzung der Spherizitätsannahme wurden die erhaltenen p -Werte mit der Greenhouse-Geisser Prozedur korrigiert (vgl. Huynh, 1978).

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Aufgabenbewältigung

Durchschnittlich 5.0 % aller Durchgänge waren Fehlerdurchgänge, die von der Auswertung ausgeschlossen wurden. Die häufigste Fehlerart waren zu langsame Reaktionen (1.6 %). In 1.1 % aller Durchgänge wurde mit der falschen Hand oder beiden Händen reagiert. Reaktionen mit falscher Kraftamplitude und Reaktionen mit falscher Kraftanstiegszeit traten ebenfalls in jeweils 1.1 % aller Durchgänge auf. In 0.1 % aller Durchgänge reagierten die Versuchspersonen zu früh, in unter 0.1 % aller Durchgänge mit sowohl falscher Kraftanstiegszeit als auch falscher Kraftamplitude. Abbildung 3.1 zeigt für die korrekten Reaktionen die durchschnittlichen Kraftanstiegszeiten und Kraftamplituden und Tabelle 3.1 die Standardabweichungen der Kraftanstiegszeiten und Kraftamplituden, jeweils in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation.

Die Varianzanalyse für die Kraftanstiegszeiten ergab lediglich einen signifikanten Effekt des Faktors Kraftanstiegszeitbedingung, $F(2,22) = 93.46$, $MSE = 979.87$, $p < .01$. Post-hoc Kontraste nach dem Tukey-Verfahren ergaben, dass sich die Kraftanstiegszeiten der Reaktionen in

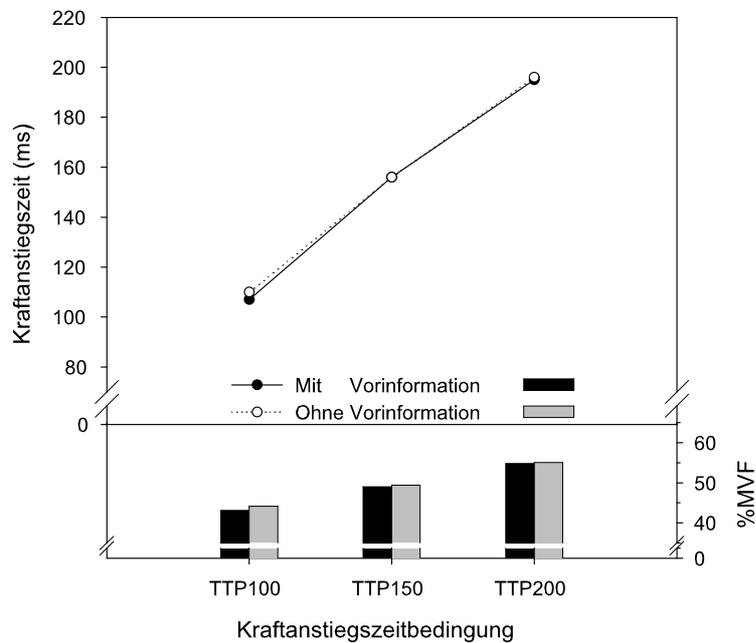


Abbildung 3.1: Durchschnittliche Kraftanstiegszeiten (in ms) und Kraftamplituden (in %MVF), in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation.

allen Kraftanstiegszeitbedingungen signifikant voneinander unterschieden (alle p 's < .05; kritischer Wert: 16.1 ms). In der Bedingung TTP100 betrug die durchschnittliche Kraftanstiegszeit der korrekten Reaktionen 108 ms. In der Bedingung TTP150 reagierten die Vpn durchschnittlich mit einer Kraftanstiegszeit von 156 ms, und in der Bedingung TTP200 mit einer Kraftanstiegszeit von 196 ms.

Die Varianzanalyse für die Standardabweichungen der Kraftanstiegszeit ergab lediglich den erwarteten signifikanten Einfluss des Faktors Kraftanstiegszeitbedingung, $F(2,22) = 164.68$, $MSE = 27.02$, $p < .01$. In der Bedingung TTP100 war die Standardabweichung der Kraftanstiegszeiten am geringsten und in der Bedingung TTP200 am höchsten (vgl. Tabelle 3.1).

Die Varianzanalyse für die Kraftamplituden ergab ebenfalls einen si-

3 Experiment 2

Tabelle 3.1: Durchschnittliche Standardabweichungen der Kraftanstiegszeit (in ms) und Kraftamplitude (in %MVF) in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation.

Bedingung	SD	
	TTP	PF
<i>Mit Vorinformation</i>		
TTP100	14.8	8.3
TTP150	26.1	8.3
TTP200	33.6	9.0
<i>Ohne Vorinformation</i>		
TTP100	15.4	8.4
TTP150	28.7	8.3
TTP200	34.5	8.7

Anmerkung. SD: Standardabweichung; TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude.

gnifikanten Einfluss der Kraftanstiegszeitbedingung, $F(2,22) = 30.92$, $MSE = 50.24$, $p < .01$. Post-hoc Kontraste ergaben, dass sich die Kraftamplituden der Reaktionen in allen Kraftanstiegszeitbedingungen signifikant voneinander unterschieden (alle p 's $< .05$; kritischer Wert: 3.64 %MVF). In der Bedingung TTP100 reagierten die Versuchspersonen am schwächsten (43.6 %MFV), in der Bedingung TTP150 mit einer mittleren Stärke (49.2 %MFV) und in der Bedingung TTP200 am stärksten (55.0 %MVF). Die Varianzanalyse ergab zudem einen statistischen Trend für die Wechselwirkung von Reaktionshand und Kraftanstiegszeitbedingung, $F(2,22) = 2.81$, $MSE = 5.64$, $p = .09$. Ansonsten traten keine signifikanten Haupteffekte oder Wechselwirkungen auf.

Für die Standardabweichungen der Kraftamplitude ergaben sich keine signifikanten Haupteffekte oder Wechselwirkungen.

3.3.2 Reaktionszeiten und Fehler

Abbildung 3.2 zeigt die durchschnittlichen Reaktionszeiten und den Anteil falscher Reaktionen in Abhängigkeit von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung. Die Varianzanalyse für die Reaktionszeiten ergab einen signifikanten Haupteffekt der Kraftanstiegszeitbedingung, $F(2,22) = 14.26$, $MSE = 1589.80$, $p < .01$. Kontraste nach dem Tukey-

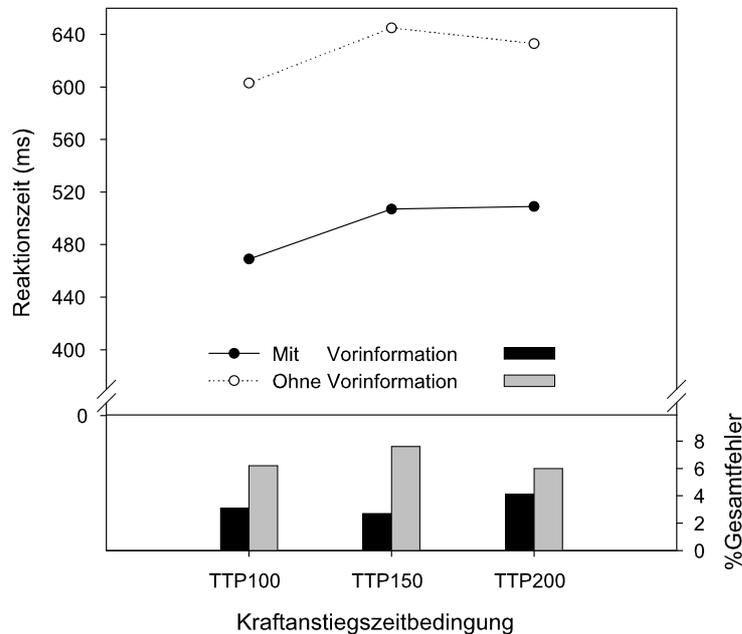


Abbildung 3.2: Durchschnittliche Reaktionszeiten (in ms) und Gesamtfehlerquoten (in %), in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation.

Verfahren ergaben, dass die Reaktionszeiten in der Bedingung TTP100 (536 ms) kürzer waren als in den Bedingungen TTP150 (576 ms) und TTP200 (571 ms) (beide p 's < .05; kritischer Wert: 20.5 ms). Die Reaktionszeiten in den Bedingungen TTP150 und TTP200 unterschieden sich hingegen nicht signifikant voneinander ($p > .05$). Ebenso ergab sich ein signifikanter Haupteffekt der Vorinformation, $F(1,11) = 79.92$, $MSE = 7882.00$, $p < .01$. Mit Vorinformation über die Kraftanstiegszeit waren die Reaktionen durchschnittlich um 132 ms schneller als ohne Vorinformation (495 ms vs. 627 ms). Die Varianzanalyse ergab hingegen keine signifikante Wechselwirkung von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung, $F(2,22) = 0.57$, $MSE = 1075.40$, $p > .05$. In Durchgängen mit Vorinformation trat ein Reaktionszeitvorteil von 39 ms für Reaktionen der Bedingung TTP100 gegenüber Reaktionen mit längerer Kraft-

3 Experiment 2

anstiegszeit (gemittelt über die Bedingungen TTP150 und TTP200) auf, in Durchgängen ohne Vorinformation betrug der Reaktionszeitvorteil 36 ms. Der Faktor Reaktionshand, die Wechselwirkung von Vorinformation und Reaktionshand, die Dreifach-Interaktion der Faktoren Vorinformation, Reaktionshand und Kraftanstiegszeitbedingung (alle F 's < 1), sowie die Wechselwirkung von Kraftanstiegszeitbedingung und Reaktionshand, $F(2,22) = 1.89$, $MSE = 834.18$, $p > .05$, erwiesen sich ebenfalls als nicht signifikant.

Die Varianzanalyse für die Gesamtfehlerprozent ergab einen signifikanten Einfluss der Vorinformation, $F(1,11) = 7.99$, $MSE = 49.00$, $p < .05$. In Durchgängen ohne Vorinformation unterliefen den Versuchspersonen mehr Fehler als in Durchgängen mit Vorinformation (6.6% vs. 3.3%). Der Faktor Kraftanstiegszeitbedingung hatte keinen signifikanten Einfluss ($F < 1$), wohingegen ein statistischer Trend für die Wechselwirkung der beiden Faktoren beobachtet wurde, $F(2,22) = 2.72$, $MSE = 9.64$, $p = .098$. Diese Ergebnisse legen nahe, dass, wie schon in Experiment 1, die Verhaltensdaten nicht durch einen *speed-accuracy tradeoff* (Osman et al., 2000; Wickelgren, 1977) beeinflusst wurden.

Die analogen Varianzanalysen für die verschiedenen Fehlerarten ergaben einen höheren Anteil von zu langsamen Reaktionen, $F(1,11) = 11.06$, $MSE = 17.09$, $p < .01$, in Durchgängen ohne Vorinformation als in Durchgängen mit Vorinformation. Zudem zeigte sich für den Anteil von Reaktionen mit falscher Kraftamplitude ein signifikanter Einfluss des Faktors Kraftanstiegszeitbedingung, $F(2,22) = 7.46$, $MSE = 7.34$, $p < .05$. Kontraste nach dem Tukey-Verfahren ergaben, dass die relative Häufigkeit von Reaktionen mit falscher Kraftamplitude in der Bedingung TTP200 (2.3%) höher als in den Bedingungen TTP150 und TTP100 (jeweils 0.5%) war (beide p 's $< .05$; kritischer Wert 1.39%). Für alle anderen Fehlerarten ergaben die entsprechenden Varianzanalysen keine signifikanten Effekte.

Tabelle 3.2 gibt einen Überblick über den Anteil der verschiedenen Fehlerarten getrennt nach den Versuchsbedingungen.

Tabelle 3.2: Anteil falscher Reaktionen (in %), getrennt nach Versuchsbedingungen und Fehlerarten.

Bedingung	Gesamt- fehler	Fehlerarten					
		Hand	TTP	PF	TTP+PF	> RT _{max}	< RT _{min}
<i>Mit Vorinformation</i>							
TTP100	3.1	0.8	1.4	0.4	0.0	0.4	0.1
TTP150	2.7	0.8	0.8	0.2	0.0	0.6	0.2
TTP200	4.1	0.8	0.4	2.5	0.1	0.2	0.0
<i>Ohne Vorinformation</i>							
TTP100	6.2	1.8	2.1	0.5	0.0	1.8	0.0
TTP150	7.6	1.2	1.6	0.8	0.0	4.1	0.0
TTP200	6.0	1.3	0.3	2.2	0.0	2.3	0.0

Anmerkung. TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude; RT: Reaktionszeit; RT_{max} = 1000 ms; RT_{min} = 100 ms. Abweichungen zwischen der Gesamtfehlerquote und der Summe der einzelnen Fehlerquoten ergeben sich durch Rundung.

3.4 Diskussion

Experiment 2 replizierte den Hauptbefund des Experiments 1 und ermöglichte eine bessere Interpretation dieses Befundes. Wiederum waren die Reaktionszeiten von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit (TTP100) um rund 40 ms kürzer als die Reaktionszeiten von Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit. Die durchschnittlichen Reaktionszeiten in den Bedingungen TTP150 und TTP200 unterschieden sich hingegen nicht voneinander.

Dieser Befund steht im Widerspruch zu Theorien, die einen großen Einfluss der Reaktionsdauer (Klapp, 1995; Klapp et al., 1974) bzw. der Kraftanstiegsrate (z.B. Carlton et al., 1987; van Boxtel et al., 1993) auf die Reaktionszeit annehmen und diese Reaktionseigenschaften als wichtige Reaktionsparameter der zugrunde liegenden motorischen Programme ansehen. Nach diesen Theorien hätten sich auch die Reaktionszeiten für Reaktionen der beiden Bedingungen TTP150 und TTP200 voneinander unterscheiden sollen, da eine längere Reaktionsdauer bzw. eine geringere Kraftanstiegsrate zu einem höheren zeitlichen Programmieraufwand und in Folge zu höheren Reaktionszeiten führen sollte.

3 Experiment 2

Die Ergebnisse entsprechen jedoch den Vorhersagen von PFUM, nach denen nur für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit eine besonders kurze Reaktionszeit auftreten sollte, da bei der Programmierung dieser Reaktionen ein Reaktionsparameter weniger spezifiziert werden muss. Die Programmierung von Reaktionen mit nicht-minimaler, aber unterschiedlicher Kraftanstiegszeit sollte nach PFUM hingegen keinen unterschiedlichen Zeitaufwand aufweisen, da die gleiche Anzahl von Parametern spezifiziert werden muss. Folglich sollten für diese Reaktionen auch keine Unterschiede in der Reaktionszeit auftreten.

Wie in Experiment 1 ergab sich auch in Experiment 2 ein deutlicher Reaktionszeitvorteil für Reaktionen in Durchgängen mit Vorinformation. Dies deutet darauf hin, dass die Versuchspersonen die Vorinformation über die Kraftanstiegszeit zur Vorbereitung ihrer Reaktionen nutzten.

Ein überraschendes Ergebnis des Experiments 2 ist, dass keine signifikante Wechselwirkung von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation aufgetreten ist und nicht einmal, wie in Experiment 1, ein statistischer Trend für eine solche Wechselwirkung beobachtet wurde. Der Reaktionszeitvorteil von Reaktionen der Bedingung TTP100 gegenüber Reaktionen der Bedingungen TTP150 und TTP200 war in Durchgängen mit Vorinformation nicht geringer als in Durchgängen ohne Vorinformation. Dies widerspricht den Vorhersagen des Modells der Parameterspezifizierung, welches annimmt, dass durch Vorinformation die betreffenden Reaktionsparameter schon vor der Präsentation des Reaktionssignals zumindest teilweise spezifiziert werden können. Somit sollte sich nach diesem Modell die längere Programmierung für Reaktionen mit einer höheren Anzahl von zu spezifizierenden Reaktionsparametern nicht mehr im gleichen Masse auf die Reaktionszeit auswirken wie in Durchgängen ohne Vorinformation¹.

Die Ergebnisse des Experiments 2 stützen nachdrücklich die von PFUM abgeleitete Hypothese, dass Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit eine besonders kurze Reaktionszeit aufweisen. Allerdings könnte der in den Experimenten 1 und 2 beobachtete Reaktionszeitvor-

¹Da die Ergebnisse des Experiments 4 Hinweise darauf geben, dass möglicherweise aufgrund zu geringer statistischer Macht der Analyseverfahren keine signifikante Wechselwirkung in den Experimenten 1 und 2 beobachtet wurde, wurde auf eine genauere Diskussion des Befundes an dieser Stelle verzichtet.

teil für diese Reaktionen möglicherweise nicht durch die postulierten Unterschiede in der Programmierung, sondern durch strategische Effekte bewirkt worden sein. Experiment 3 wurde durchgeführt, um den potentiellen Einfluss strategischer Effekte zu überprüfen.

4 Experiment 3

Experiment 3 sollte überprüfen, ob der in den Experimenten 1 und 2 aufgetretene Reaktionszeitvorteil für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit auf strategische Effekte zurückzuführen ist, die möglicherweise durch die Aufgabeninstruktion hervorgerufen wurden. Der bekannteste und vielfach untersuchte Effekt der Instruktion auf Reaktionszeiten und Fehlerquoten ist der *speed-accuracy tradeoff* (einen Überblick gibt z.B. Wickelgren, 1977; vgl. auch Osman et al., 2000). Im diesbezüglichen Paradigma wird das Verhältnis zwischen der Genauigkeit der Reaktionsausführung und der Reaktionszeit direkt durch die Instruktion manipuliert. Der Hauptbefund dieses Paradigmas ist, dass die Versuchspersonen das Risiko einer falschen Reaktion und den Zeitpunkt ihres Reaktionsbeginns dahingehend abwägen, ob die Instruktion eine schnelle oder eine richtige bzw. genaue Reaktion erfordert.

In den Experimenten 1 und 2 wurden die Versuchspersonen instruiert, die vorgegebene Kraftamplitude von 50 %MVF in den verschiedenen Kraftanstiegszeitbedingungen unterschiedlich schnell zu erreichen, wobei sie die Kraftamplitude in der Bedingung TTP100 am schnellsten und in der Bedingung TTP200 am langsamsten erreichen sollten. Die Verwendung des Wortes „schnell“ in der Instruktion ist, wenngleich unvermeidbar, etwas unglücklich. Die Versuchspersonen könnten die Instruktion falsch interpretiert und versucht haben, in der Bedingung TTP100 besonders schnell zu reagieren, d.h., besonders schnell mit der Reaktion zu beginnen.¹

Die Ergebnisse der Experimente 1 und 2 lieferten keine Hinweise darauf, dass der Reaktionszeitvorteil für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit durch einen *speed-accuracy tradeoff* erklärt werden kann, da

¹Um einer solchen Misinterpretation entgegenzuwirken, wurden in allen Experimenten die Worte „KURZ“ und „LANG“ an Stelle von „SCHNELL“ und „LANGSAM“ als informative Hinweisreize verwendet.

Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit keine höhere Fehlerquote aufwiesen als Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit.

Allerdings ist der beobachtete Reaktionszeitvorteil relativ klein, so dass die Versuchspersonen vielleicht nur eine leichte Tendenz hatten, Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit schneller auszuführen. Möglicherweise war diese Tendenz zu gering, um sich auf die Fehlerquoten auszuwirken. Somit ist nicht auszuschließen, dass die Aufgabeninstruktion – bewusst oder unbewusst – zu strategischen Effekten geführt hat, die den beobachteten Reaktionszeitvorteil für Reaktionen der Bedingung TTP100 bewirkt haben könnten.

Um den Einfluss potentieller strategischer Effekte zu überprüfen, mussten die Versuchspersonen in Experiment 3 Reaktionen mit einer Kraftanstiegszeit von entweder 150 ms (TTP150) oder 200 ms (TTP200) produzieren. Als informativer Hinweisreiz für Durchgänge der Bedingung TTP150 wurde im Gegensatz zum Experiment 2 das Wort „KURZ“ an Stelle des Wort „MITTEL“ verwendet. Somit entsprach dieses Experiment bezüglich der Instruktion und der verwendeten Hinweisreize vollkommen dem Experiment 1, wohingegen die Kraftanstiegszeitbedingungen TTP150 und TTP200 den gleichnamigen Bedingungen des Experiments 2 entsprachen.

Sollten allein strategische Effekte für den in den vorherigen Experimenten beobachteten Reaktionszeitvorteil für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit verantwortlich gewesen sein, sollten in diesem Experiment im Gegensatz zu Experiment 2 kürzere Reaktionszeiten für Reaktionen der Bedingung TTP150 als für Reaktionen der Bedingung TTP200 auftreten. Sollten hingegen strategische Effekte dieser Art keinen Einfluss haben, sollten sich die Reaktionszeiten der Reaktionen in den Bedingungen TTP150 und TTP200 nicht voneinander unterscheiden und somit die Ergebnisse des Experiments 2 bestätigen.

Nach beiden Hypothesen sollte in diesem Experiment keine Wechselwirkung von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung auftreten, da die Programmierung der Reaktionen in den Bedingungen TTP150 und TTP200 im gleichen Ausmaß von Vorinformation über die Kraftanstiegszeit profitieren sollte.

4.1 Methode

Experiment 3 entsprach Experiment 1 bis auf die nachfolgend beschriebenen Änderungen.

4.1.1 Versuchspersonen

12 Studenten der Universität Tübingen (neun weiblich, drei männlich) im Alter von 20 bis 29 Jahren ($M = 21.0$) nahmen an einer jeweils 90-minütigen Sitzung teil. Acht Versuchspersonen waren Rechtshänder, vier waren Linkshänder. Eine weitere Versuchsperson (weiblich, 20, Rechtshänderin) nahm an der Sitzung teil, wurde jedoch wegen einer zu hohen Fehlerquote (23.1%) von der Auswertung ausgeschlossen. Die Versuchspersonen bekamen für ihre Teilnahme entweder eine Bescheinigung über abgeleistete Versuchspersonenstunden oder eine Aufwandsentschädigung in Höhe von € 10. Keine Versuchsperson hatte zuvor an einem der anderen Experimente teilgenommen.

4.1.2 Prozedur

Übungssitzung

Wie in Experiment 1 bearbeiteten die Versuchspersonen zunächst eine Übungssitzung, bis die Fehlerquote des letzten Blocks unter 15% lag. Hierfür brauchten die Versuchspersonen durchschnittlich 2.4 Blöcke.

Aufgabe, Reiz-Reaktions-Zuordnung und Festlegung der Kraftimpulsparameter

Der einzige Unterschied zum Experiment 1 bestand darin, dass die Kraftanstiegszeitbedingung TTP100 durch die Bedingung TTP150 ersetzt wurde. Die optimalen und tolerierten Reaktionsparameter dieser Bedingung entsprachen genau denen der Bedingung TTP150 in Experiment 2. Wichtig ist, dass das Wort „KURZ“ und nicht wie in Experiment 2 das Wort „MITTEL“ als informativer Hinweisreiz für diese Bedingung verwendet wurde. Die Kraftanstiegszeitbedingung TTP200 entsprach den gleichnamigen Bedingungen der Experimente 1 und 2.

4.2 Versuchsplan

Es bestand ein faktorieller Versuchsplan mit Messwiederholung auf den zweistufigen Faktoren Vorinformation (mit, ohne), Reaktionshand (links, rechts) und Kraftanstiegszeitbedingung (TTP150, TTP200).

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Aufgabenbewältigung

Durchschnittlich 5.1 % aller Durchgänge waren Fehlerdurchgänge, die von der Auswertung ausgeschlossen wurden. Die häufigste Fehlerart waren Reaktionen mit der falschen Hand oder beiden Händen (2.3 %). In 1.4 % aller Durchgänge wurde mit falscher Kraftanstiegszeit reagiert. Zu langsame Reaktionen und Reaktionen mit falscher Kraftamplitude traten in jeweils 0.7 % aller Durchgänge auf. In 0.1 % aller Durchgänge reagierten die Versuchspersonen zu früh, in weniger als 0.1 % aller Durchgänge mit sowohl falscher Kraftanstiegszeit als auch falscher Kraftamplitude. Abbildung 4.1 zeigt für die korrekten Reaktionen die durchschnittlichen Kraftanstiegszeiten und Kraftamplituden und Tabelle 4.1 die Standardabweichungen der Kraftanstiegszeiten und Kraftamplituden, jeweils in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation.

Die Varianzanalyse für die Kraftanstiegszeiten ergab einen signifikanten Effekt des Faktors Kraftanstiegszeitbedingung, $F(1,11) = 54.51$, $MSE = 1467.60$, $p < .01$. In der Bedingung TTP150 wiesen die Reaktionen eine kürzere Kraftanstiegszeit (139 ms) auf als in der Bedingung TTP200 (196 ms). Zudem bestand eine signifikante Wechselwirkung der Faktoren Kraftanstiegszeitbedingung und Reaktionshand, $F(1,11) = 5.78$, $MSE = 56.82$, $p < .05$. In der Bedingung TTP150 waren die Kraftanstiegszeiten der Reaktionen mit der linken Hand kürzer als die Kraftanstiegszeiten der Reaktionen mit der rechten Hand (136 ms vs. 141 ms), in der Bedingung TTP200 war dieses umgekehrt (197 ms vs. 195 ms). Ansonsten ergab die Varianzanalyse keine signifikanten Haupteffekte bzw. Wechselwirkungen.

Die Varianzanalyse für die Standardabweichungen der Kraftanstiegs-

4 Experiment 3

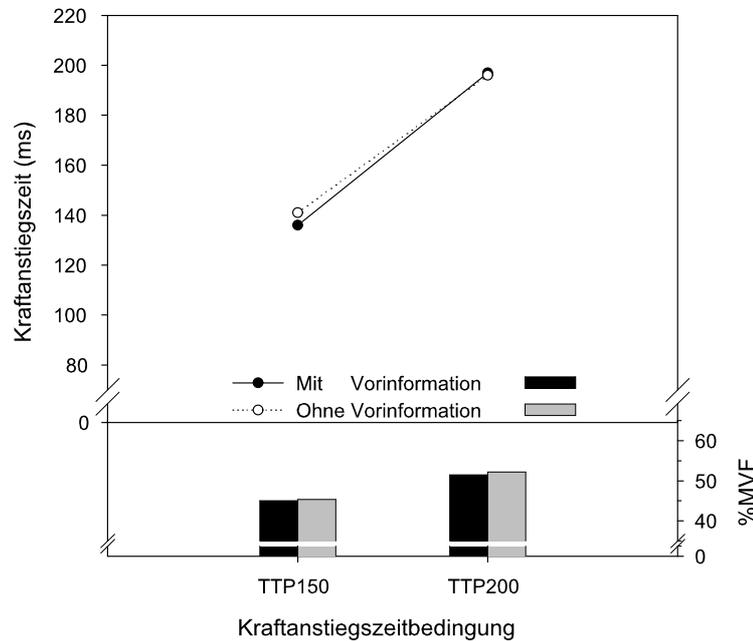


Abbildung 4.1: Durchschnittliche Kraftanstiegszeiten (in ms) und Kraftamplituden (in %MVF), in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation.

zeit ergab einen signifikanten Effekt der Kraftanstiegszeitbedingung, $F(1,11) = 54.58$, $MSE = 67.12$, $p < .01$, der eine kleinere Standardabweichung in der Bedingung TTP150 (25.1 ms) als in der Bedingung TTP200 (37.5 ms) reflektierte. Zudem ergab sich ein signifikanter Effekt der Vorinformation, $F(1,11) = 6.60$, $MSE = 19.88$, $p < .05$. In Durchgängen mit Vorinformation war die Standardabweichung der Kraftanstiegszeit geringer (30.1 ms) als in Durchgängen ohne Vorinformation (32.5 ms). Es traten keine weiteren signifikanten Haupteffekte bzw. Wechselwirkungen auf.

Die Varianzanalyse für die Kraftamplituden ergab ebenfalls einen signifikanten Effekt der Kraftanstiegszeitbedingung, $F(1,11) = 26.30$, $MSE = 41.21$, $p < .01$. In der Bedingung TTP150 reagierten die Versuchspersonen schwächer (45.2 %MVF) als in der Bedingung TTP200

Tabelle 4.1: Durchschnittliche Standardabweichungen der Kraftanstiegszeit (in ms) und Kraftamplitude (in %MVF) in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation.

Bedingung	SD	
	TTP	PF
<i>Mit Vorinformation</i>		
TTP150	24.8	8.0
TTP200	35.5	8.0
<i>Ohne Vorinformation</i>		
TTP150	25.5	7.7
TTP200	39.5	8.2

Anmerkung. SD: Standardabweichung; TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude.

(51.9 %MVF). Außerdem ergab sich ein statistischer Trend für den Faktor Vorinformation, $F(1,11) = 4.07$, $MSE = 1.24$, $p = .07$. In Durchgängen mit Vorinformation reagierten die Versuchspersonen minimal schwächer (48.3 %MVF) als in Durchgängen ohne Vorinformation (48.7 %MVF). Ansonsten ergaben sich keine signifikanten Effekte (alle F 's < 1).

Die Varianzanalyse für die Standardabweichungen der Kraftamplitude ergab lediglich einen statistischen Trend für die Wechselwirkung von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation, $F(1,11) = 3.69$, $MSE = 0.45$, $p = .08$. In Durchgängen mit Vorinformation unterschied sich die Standardabweichung der Kraftamplitude in den Bedingungen TTP150 und TTP200 nicht (jeweils 8.0 %MVF), in Durchgängen ohne Vorinformation war sie in der Bedingung TTP150 (7.7 %MVF) etwas geringer als in der Bedingung TTP200 (8.2 %MVF).

4.3.2 Reaktionszeiten und Fehler

Abbildung 4.2 zeigt die durchschnittlichen Reaktionszeiten und den Anteil falscher Reaktionen in Abhängigkeit von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung.

Die Varianzanalyse für die Reaktionszeiten ergab keinen signifikanten Haupteffekt der Kraftanstiegszeitbedingung, $F(1,11) = 0.08$, $MSE =$

4 Experiment 3

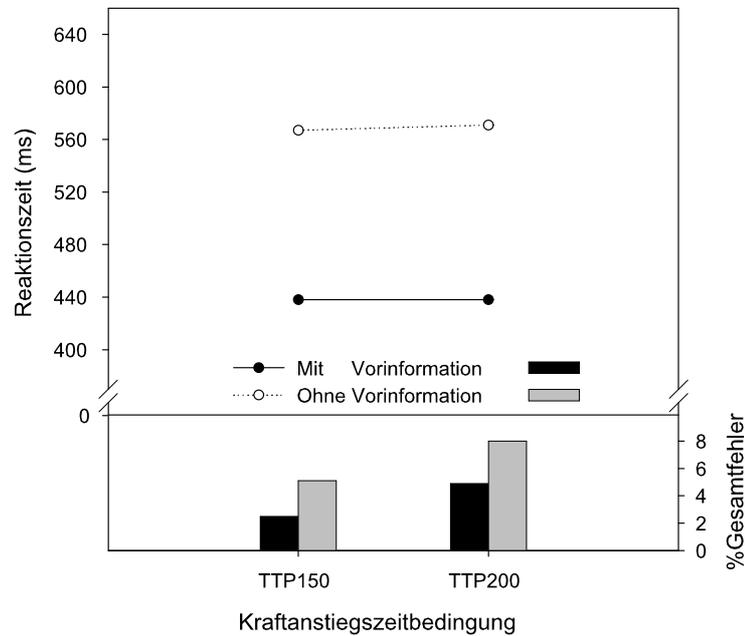


Abbildung 4.2: Durchschnittliche Reaktionszeiten (in ms) und Gesamtfehlerquoten (in %), in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation.

1153.80, $p > .05$. Die Reaktionszeiten in der Bedingung TTP150 (503 ms) waren numerisch nur minimal kürzer als Reaktionen in der Bedingung TTP200 (505 ms). Hingegen ergab sich ein signifikanter Haupteffekt der Vorinformation, $F(1,11) = 74.35$, $MSE = 5545.80$, $p < .01$. Mit Vorinformation über die Kraftanstiegszeit waren die Reaktionszeiten durchschnittlich um 131 ms kürzer als ohne Vorinformation (438 ms vs. 569 ms). Die Wechselwirkung von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung erwies sich als nicht signifikant, $F(1,11) = 0.57$, $MSE = 1075.40$, $p > .05$. Zudem ergab die Varianzanalyse für die Reaktionszeiten einen statistischen Trend für die Wechselwirkung von Vorinformation und Reaktionshand, $F(1,11) = 4.49$, $MSE = 360.25$, $p = .058$. In Durchgängen ohne Vorinformation unterschieden sich die Reaktionszeiten von Reaktionen der linken Hand und der rechten Hand (555 ms vs.

584 ms) stärker als in Durchgängen mit Vorinformation (432 ms vs. 444 ms). Ansonsten ergaben sich keine weiteren signifikanten Effekte.

Die Varianzanalyse für die Gesamtfehlerprozent ergab lediglich einen signifikanten Einfluss der Vorinformation, $F(1,11) = 6.07$, $MSE = 32.45$, $p < .05$. Wie in den Experimenten 1 und 2 war der Anteil falscher Reaktionen in Durchgängen ohne Vorinformation höher als in Durchgängen mit Vorinformation (6.6 % vs. 3.7 %).

Die analogen Varianzanalysen für die verschiedenen Fehlerarten zeigten, dass dieser Effekt größtenteils auf den höheren Anteil von zu langsamen Reaktionen, $F(1,11) = 8.38$, $MSE = 3.43$, $p < .05$, in Durchgängen ohne Vorinformation als in Durchgängen mit Vorinformation zurückzuführen ist (vgl. Tabelle 4.2). Für alle anderen Fehlerarten ergaben die entsprechenden Varianzanalysen keine signifikanten Effekte. Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über den Anteil der verschiedenen Fehlerarten getrennt nach den Versuchsbedingungen.

Tabelle 4.2: Anteil falscher Reaktionen (in %), getrennt nach Versuchsbedingungen und Fehlerarten.

Bedingung	Gesamtfehler	Fehlerarten					
		Hand	TTP	PF	TTP+PF	$> RT_{max}$	$< RT_{min}$
<i>Mit Vorinformation</i>							
TTP150	2.5	1.5	0.4	0.5	0.0	0.1	0.0
TTP200	4.9	2.3	1.6	0.6	0.0	0.2	0.2
<i>Ohne Vorinformation</i>							
TTP150	5.1	1.7	1.6	0.7	0.0	1.1	0.0
TTP200	8.0	3.7	2.1	0.9	0.0	1.4	0.0

Anmerkung. TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude; RT: Reaktionszeit; $RT_{max} = 1000$ ms; $RT_{min} = 100$ ms. Abweichungen zwischen der Gesamtfehlerquote und der Summe der einzelnen Fehlerquoten ergeben sich durch Rundung.

4.4 Diskussion

Die Ergebnisse dieses Experiments legen nahe, dass der in den Experimenten 1 und 2 aufgetretene Reaktionszeitvorteil für Reaktionen mit

minimaler Kraftanstiegszeit nicht auf strategische Effekte zurückzuführen ist. Obwohl die Instruktion und die verwendeten Hinweisreize exakt denjenigen des Experiments 1 entsprachen, unterschieden sich die Reaktionszeiten der Bedingung TTP150 nicht von den Reaktionen der Bedingung TTP200.

Wenngleich die Interpretation eines „Null-Effekts“ grundsätzlich problematisch zu bewerten ist, scheint sie in diesem Fall aus mehreren Gründen gerechtfertigt zu sein. So trat zum einen sowohl in Experiment 1 als auch in Experiment 2 ein Haupteffekt der Kraftanstiegszeitbedingung auf. Zum anderen waren die Reaktionszeiten in den beiden Kraftanstiegszeitbedingungen des Experiments 3 numerisch nahezu identisch und replizierten somit Befunde des Experiments 2.

Die Ergebnisse dieses Experiments lieferten darüberhinaus zusätzliche Evidenz gegen die Theorien, dass der Reaktionszeitvorteil von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit einem *dit-dah*-Effekt entspricht (Klapp, 1995; Klapp et al., 1974), oder die Kraftanstiegsrate der Reaktionen die Reaktionszeit beeinflusst (Carlton et al., 1987; van Boxtel et al., 1993). Nach beiden Theorien sollten kürzere Reaktionszeiten für Reaktionen der Bedingung TTP150 als für Reaktionen der Bedingung TTP200 auftreten. Die von PFUM abgeleitete Hypothese sagt hingegen gleiche Reaktionszeiten für Reaktionen der Bedingungen TTP150 und TTP200 voraus, da die Programmierung der Reaktionen in beiden Bedingungen gleich schnell abgeschlossen sein sollte. In diesem Experiment trat keine Wechselwirkung von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung voraus, wohingegen, wie in den anderen Experimenten, ein deutlicher Effekt der Vorinformation beobachtet wurde. Auch diese Ergebnisse entsprechen den Vorhersagen der PFUM-Hypothese, da die Programmierung der Reaktionen in den beiden Bedingungen gleich stark von Vorinformation über die Kraftanstiegszeit profitieren sollte.

Die Experimente 1, 2 und 3 legen nahe, dass Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit eine besonders kurze Reaktionszeit aufweisen, wohingegen sich die Reaktionszeiten von Reaktionen mit unterschiedlicher, nicht-minimaler Kraftanstiegszeit nicht voneinander unterscheiden. Zwei weitere Fragen konnten anhand dieser Experimente jedoch nicht bzw. nicht eindeutig beantwortet werden.

Zum einen ist unklar, ob Vorinformation über die Kraftanstiegszeit den Reaktionszeitvorteil von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegs-

zeit gegenüber Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit vermindert, wie dies vom Modell der Parameterspezifizierung postuliert wird. In Experiment 1 wurde lediglich ein statistischer Trend für eine Wechselwirkung von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung beobachtet, in Experiment 2 konnten keine Anzeichen für diese Wechselwirkung gefunden werden. Mit Experiment 4 sollte überprüft werden, ob eine möglicherweise bestehende Wechselwirkung in diesen Experimenten aufgrund zu geringer statistischer Macht der Analyseverfahren nicht beobachtet werden konnte.

Die zweite Frage, die mit den bisher dargestellten Experimenten nicht beantwortet werden konnte, ist, ob der Reaktionszeitvorteil der Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit und der Effekt der Vorinformation über die Kraftanstiegszeit auf eine Verkürzung von späten Prozessen der Informationsverarbeitung zurückzuführen sind, wie dies vom Modell der Parameterspezifizierung postuliert wird. Aus diesem Grund wurden in Experiment 4 neben Verhaltensdaten auch das Lateralisierte Bereitschaftspotential und eine Reihe weiterer Komponenten des ereigniskorrelierten Hirnpotentials erfasst.

5 Experiment 4

In Experiment 4 mussten die Versuchspersonen exakt die gleiche Aufgabe bearbeiten wie in Experiment 1, so dass eine Replikation der Ergebnisse auf Ebene der Verhaltensdaten zu erwarten war. Reaktionen der Bedingung TTP100 sollten kürzere Reaktionszeiten als Reaktionen der Bedingung TTP200 aufweisen. Zudem sollten kürzere Reaktionszeiten in Durchgängen mit Vorinformation als in Durchgängen ohne Vorinformation auftreten. Außerdem sollte sich eine Wechselwirkung der Faktoren Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation über die Kraftanstiegszeit ergeben. Reaktionen der Bedingung TTP200 sollten vergleichsweise stärker von Vorinformation profitieren als Reaktionen der Bedingung TTP100. Da eine solche Wechselwirkung in Experiment 1 zwar numerisch beobachtet wurde, diese jedoch das Signifikanzniveau verfehlte, wurde in Experiment 4 eine größere Anzahl von Versuchspersonen getestet. Dies ermöglichte die Überprüfung der Vermutung, dass die vorhergesagte Wechselwirkung in Experiment 1 (und in Experiment 2) nur aufgrund zu geringer statistischer Macht der Analyseverfahren nicht beobachtet werden konnte.

Neben Verhaltensdaten wurden in Experiment 4 auch ereigniskorrelierte Hirnpotentiale (EKPs) erfasst. Das für die vorliegende Fragestellung wichtigste Maß bildete das LRP, mit dessen Hilfe der Reaktionszeitvorteil von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit sowie der Reaktionszeitvorteil durch Vorinformation über die Kraftanstiegszeit zeitlich lokalisiert werden sollten. Nach dem Modell der Parameterspezifizierung (Rosenbaum, 1980, 1983) sollte der Reaktionszeitvorteil von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit auf die vergleichsweise schneller abgeschlossene Programmierung zurückzuführen sein und somit innerhalb einer späten Stufe der Informationsverarbeitung entstehen. Auch der Reaktionszeitvorteil durch Vorinformation sollte zumindest teilweise auf eine Verkürzung des Programmierungsprozesses zurückzuführen sein und somit ebenfalls zum Teil innerhalb einer späten Stufe der

Informationsverarbeitung lokalisiert sein. Allerdings wird durch Vorinformation auch die Anzahl der möglichen Reaktionsalternativen vermindert. Daher ist anzunehmen, dass Vorinformation auch Prozesse einer früheren Stufe, nämlich der Reaktionsauswahl, beschleunigt. Nach der ursprünglich vertretenden Ansicht, dass das LRP die Reaktionszeit in einen frühen, „vormotorischen“ Anteil und einen späten, „motorischen“ Anteil unterteilt, sollte sich der Reaktionszeitvorteil von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit somit in einem verkürzten LRP-R-Intervall zeigen. In Durchgängen mit Vorinformation sollte nach dieser Ansicht sowohl ein kürzeres S-LRP-Intervall als auch ein kürzeres LRP-R-Intervall auftreten als in Durchgängen ohne Vorinformation.

Es gibt mittlerweile jedoch Evidenz dafür, dass das LRP nicht klar zwischen „vormotorischen“ und „motorischen“ Stufen trennt. So scheint Vorinformation über die Reaktionsrichtung (Leuthold et al., 1996; Müller-Gethmann et al., 2000) sowohl eine Verkürzung des S-LRP-Intervalls als auch des LRP-R-Intervalls zu bewirken, wohingegen Vorinformation über die Reaktionskraft (Müller-Gethmann et al., 2000) lediglich eine Verkürzung des S-LRP-Intervalls bewirkt. Obwohl Vorinformation über die Richtung somit einen späteren Prozess zu beschleunigen scheint als Vorinformation über die Reaktionskraft, ist davon auszugehen, dass es sich in beiden Fällen um motorische Prozesse handelt, da jeweils der Programmierungsprozess der Reaktionen beeinflusst werden sollte.¹ Der Test, ob ein Faktor das LRP-R- oder das S-LRP-Intervall beeinflusst, ist somit nicht symmetrisch. Wird eine Beeinflussung des LRP-R-Intervalls beobachtet, spricht dies dafür, dass der entsprechende Faktor einen motorischen Prozess beeinflusst. Tritt hingegen keine Beeinflussung des LRP-R-Intervalls, sondern lediglich eine Beeinflussung des S-LRP-Intervalls auf, lässt sich nicht ausschließen, dass (auch) motorische Prozesse durch den entsprechenden Faktor beeinflusst werden. Aus diesen Gründen konnte keine klare Vorhersage für die Effekte auf der Ebene der LRP-Latenzen gemacht werden.

Neben dem LRP wird in diesem Experiment auch die kontingente negative Variation (*contingent negative variation*, CNV) erfasst. Die CNV wurde erstmalig von Walter, Cooper, Aldridge, McCallum und Winter

¹Es ist auch denkbar, dass es sich um den gleichen Prozess handelt, der jedoch zu einem unterschiedlichen Zeitpunkt abläuft.

(1964) berichtet und ist ein langsames negatives Potential, das sich zwischen der Präsentation eines Warnsignals bzw. eines Hinweisreizes und der Präsentation des Reaktionssignals entwickelt. Eigentlich besteht die CNV aus zwei unterschiedlichen Wellen. Die frühe CNV, welche über frontal-zentralen Bereichen am stärksten ausgeprägt ist, soll eine Orientierungsreaktion auf das Warnsignal reflektieren (z.B. Loveless & Sanford, 1974; Ulrich et al., 1998; van Boxtel et al., 1993). Hingegen wird angenommen, dass die späte CNV, welche über parietal-zentralen Bereichen ihre stärkste Ausprägung hat, motorische Vorbereitungsprozesse reflektiert und somit zum größten Teil ein Bereitschaftspotential darstellt. Allerdings weisen neuere Studien darauf hin, dass auch nicht-motorische Komponenten zur späten CNV beitragen (vgl. van Boxtel & Brunia, 1994).

MacKay und Bonnet (1990) sowie Ulrich et al. (1998) beobachteten in Studien, die das Hinweisreiz-Paradigma verwendeten, eine umso stärker ausgeprägte CNV-Amplitude je mehr Vorinformation der Hinweisreiz über die erforderliche Reaktion vermittelte. Da die CNV-Amplitude sich somit analog zur Reaktionszeit verhielt, vermuteten Ulrich et al. (1998), dass die motorische Komponente der späten CNV einen generellen Indikator für motorische Vorbereitung darstellt². Allerdings ergaben Studien von van Boxtel et al. (1993) bzw. van Boxtel und Brunia (1994) genau das entgegengesetzte Ergebnis. In Durchgängen mit Vorinformation über die Kraftanstiegszeit (bzw. die Kraftanstiegsrate) war die CNV-Amplitude geringer als in Durchgängen ohne Vorinformation. Ulrich et al. (1998) erklärten die gegensätzlichen Effekte auf der Ebene der CNV durch methodische Unterschiede in den Untersuchungen.

Sollte in Experiment 4 die Amplitude der späten CNV in Durchgängen mit Vorinformation über die Kraftanstiegszeit stärker ausgeprägt sein als in Durchgängen ohne Vorinformation, so würde die Interpretation von Ulrich et al. (1998) gestützt werden, dass die späte CNV als Indikator für motorische Programmierungsprozesse angesehen werden kann. Die Kraftanstiegszeitbedingung sollte sich hingegen nicht auf die CNV-Amplitude auswirken, da sich nach der Haupthypothese nur die Dauer der Programmierung von Reaktionen mit minimaler bzw.

²Auf eine mögliche Dissoziation von LRP und CNV wurde in der Allgemeinen Diskussion eingegangen.

längerer Kraftanstiegszeit voneinander unterscheiden und die CNV-Amplitude für diesen zeitlichen Unterschied nicht sensitiv sein sollte.

Ein weiteres Maß, das in diesem Experiment erfasst wurde, ist die P300. Die P300 bezeichnet eine positive Komponente des EKP, deren Gipfel 270 bis 600 ms nach der Präsentation eines Reizes erreicht und über dem zentral-parietalen Bereich am stärksten ausgeprägt ist. Die Latenz (des Gipfels) der P300 kann als ein Indikator für die Dauer der Reizidentifikation angesehen werden (z.B. Kutas, McCarthy & Donchin, 1977; Magliero, Bashore, Coles & Donchin, 1984; McCarthy & Donchin, 1981). So erreicht die P300 in Durchgängen, in denen die Identifikation eines Reaktionssignals beispielsweise durch eine geringere Reizintensität erschwert wird, später ihren Gipfel als in Durchgängen, in denen das Reaktionssignal eine höhere Intensität aufweist (Sugg & Polich, 1995; Verleger, Neukäter, Kömpf & Vieregge, 1991). Späte, „motorische“ Prozesse innerhalb der Informationsverarbeitung wie die Reaktionsausführung scheinen hingegen keinen Einfluss auf die P300-Latenz zu haben (Leuthold & Sommer, 1998; Ragot, 1984; Smulders, Kok, Kenemans & Bashore, 1995).

Unklare Evidenz besteht jedoch darüber, ob die P300-Latenz unabhängig von Prozessen der Reaktionsauswahl ist. So stellten einige Studien keinen bzw. nur einen minimalen Einfluss der Reiz-Reaktions-Kompatibilität auf die P300 fest (Magliero et al., 1984; McCarthy & Donchin, 1981), wohingegen in anderen Studien die P300 nicht unabhängig von der Reiz-Reaktions-Kompatibilität (Leuthold & Sommer, 1998) bzw. von der Anzahl der Reaktionsalternativen (Falkenstein, Hohnsbein & Hoormann, 1994) war. Verleger (1997) vertrat daher in einem Überblicksartikel, der eine Zusammenfassung über den Einfluss verschiedener Faktoren auf die P300-Latenz gibt, die Ansicht, dass eine Abgrenzung von perzeptuellen Prozessen gegenüber späteren Prozessen der Informationsverarbeitung allein anhand der P300-Latenz nur eingeschränkt möglich ist.

In Hinweisreiz-Studien, die hinsichtlich des zeitlichen Durchgangsablaufs sowie der verwendeten Hinweisreize und Reaktionssignale mit der vorliegenden Arbeit vergleichbar sind (z.B. Müller-Gethmann et al., 2000; Leuthold et al., 1996), traten keine signifikanten Effekte auf der Ebene der P300-Latenz auf. Aus diesem Grund wurde vermutet, dass auch in Experiment 4 keiner der Faktoren die P300 beeinflusst.

5.1 Methode

Experiment 4 entsprach Experiment 1 bis auf die nachfolgend beschriebenen Änderungen. Der Hauptunterschied zum Experiment 1 bestand darin, dass zusätzlich zu den Verhaltensdaten auch elektrophysiologische Masse erfasst wurden. Die Experimentalsitzung bestand statt aus neun Blöcken aus 14 Blöcken á 40 Durchgängen, von denen die ersten zwei Blöcke nicht in die Auswertung einbezogen wurden. Im Gegensatz zu Experiment 1 wurde die Reiz-Reaktions-Zuordnung nicht zufällig für jede Versuchsperson ausgewählt, sondern jede Versuchsperson bekam eine andere der 24 möglichen Zuordnungen zufällig zugewiesen.

5.1.1 Versuchspersonen

24 Studenten der Universität Tübingen (16 weiblich, 8 männlich) im Alter von 19 bis 40 Jahren ($M = 26.2$) nahmen an einer zweistündigen Übungssitzung und einer vierstündigen Experimentalsitzung teil. Alle Versuchspersonen waren Rechtshänder, der durchschnittliche Händigkeitkoeffizient betrug 0.82 (vgl. Oldfield, 1971). Vier weitere Versuchspersonen (zwei weiblich, zwei männlich, im Alter von 22 bis 27 Jahren) absolvierten die Experimentalsitzung, von denen drei wegen einer zu hohen Quote von Durchgängen mit zu starken Augenbewegungen (68 %, 69 %, bzw. 92 % aller Durchgänge) und eine Versuchsperson wegen einer zu hohen Fehlerquote (27 %) von der Auswertung ausgeschlossen wurden. Sieben weitere Versuchspersonen nahmen nur an der nachfolgend beschriebenen Übungssitzung teil. Fünf von ihnen wurden wegen einer Fehlerquote von über 20 % im Durchschnitt der letzten vier Blöcke der Übungssitzung (23 %, 25 %, 32 %, 40 %, 44 %) nicht zur Experimentalsitzung zugelassen. Zwei von ihnen wurden nicht in der Experimentalsitzung getestet, da sie in der Übungssitzung kein klar erkennbares LRP entwickelten. Die Versuchspersonen bekamen für ihre Teilnahme entweder eine Bescheinigung über abgeleistete Versuchspersonenstunden oder eine Aufwandsentschädigung in Höhe von € 12.50 für die Übungssitzung bzw. € 25 für die Experimentalsitzung.

5.1.2 Prozedur

Übungssitzung

Die Versuchspersonen übten die Aufgabe in einer separaten Sitzung, die sich im Ablauf nicht von der Experimentalsitzung unterschied. Im Gegensatz zu den anderen Experimenten wurde die Übungssitzung nicht abgebrochen, sobald die Fehlerquote des zuletzt bearbeiteten Blocks unter 15 % lag, sondern alle Versuchspersonen bearbeiteten zehn Übungsblöcke. Die durchschnittliche Fehlerquote im Mittel der letzten vier Blöcke der Übungssitzung betrug 6.7 %. Frühestens einen Tag und spätestens eine Woche nach der Übungssitzung bearbeiteten die Versuchspersonen die Experimentalsitzung. Die in der Übungssitzung zugewiesene Reiz-Reaktions-Zuordnung wurde in der Experimentalsitzung beibehalten.

Um die Versuchspersonen an die Erfassung der elektrophysiologischen Daten zu gewöhnen, ihnen die Auswirkung von Augenbewegungen auf die EEG-Signale zu veranschaulichen und zu überprüfen, ob die Versuchspersonen ein sichtbares LRP entwickelten³, wurden schon in der Übungssitzung einige elektrophysiologische Daten erfasst. Die Ableitung der elektrophysiologischen Daten entsprach der nachfolgend im Detail beschriebenen Ableitung während der Experimentalsitzung mit folgenden Ausnahmen. Das EEG wurde nur an den Positionen C3 und C4 des internationalen 10-20 Systems (vgl. Jasper, 1958) relativ zur Referenzelektrode am rechten Mastoid abgeleitet. Die Ableitung der horizontalen Augenaktivität und der vertikalen Augenaktivität erfolgte im Gegensatz zur Experimentalsitzung jeweils bipolar, die vertikale Augenaktivität wurde dabei nur am rechten Auge abgeleitet.

Elektrophysiologische Ableitungen

Die kontinuierliche Aufzeichnung der elektrophysiologischen Daten erfolgte durch Silber/Silberchlorid (Ag/AgCl) - Elektroden. Die Elektroden wurden am Kopf mittels des „Easy Cap“-Systems und im Gesicht mit doppelseitigen Kleberingen befestigt. Das EEG wurde an 54 Posi-

³Üblicherweise entwickeln 10-20 % der Versuchspersonen kein erkennbares LRP.

5 Experiment 4

tionen⁴ des internationalen 10-20 Systems (vgl. Jasper, 1958), sowie am linken und rechten Mastoid relativ zur Referenzelektrode an CZ abgeleitet. Die Erdungselektrode war an der Nasenspitze der Versuchspersonen befestigt. Abbildung 5.1 zeigt einen Überblick über die Positionen, an denen das EEG abgeleitet wurde. Ebenfalls relativ zur Referenzelek-

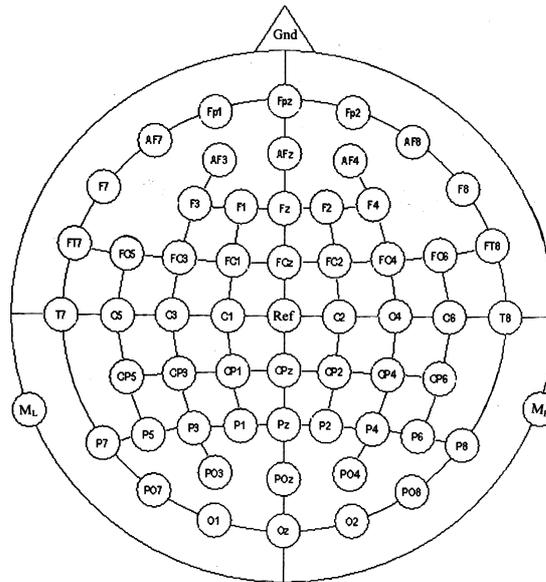


Abbildung 5.1: Übersicht über die 54 Positionen des 10-20 Systems, an denen das EEG abgeleitet wurde. Zusätzlich wurde das EEG am linken und rechten Mastoid (M_L , M_R) abgeleitet. Die Referenzelektrode (Ref) war an der Position Cz, die Erdungselektrode (Gnd) an der Nasenspitze der Versuchspersonen befestigt.

trode an CZ wurden die horizontale (HEOG) und die vertikale (VEOG) Augenaktivität erfasst. Die Ableitung des HEOG erfolgte durch zwei Elektroden, die ca. 2 cm lateral des linken bzw. rechten äußeren Kanthus positioniert waren. Die Ableitung des VEOG erfolgte durch zwei Elektroden, die ca. 3 cm unterhalb des Mittelpunkts der linken bzw. rechten

⁴Die große Anzahl der Elektroden ist für eine topografische Auswertung der EKPs erforderlich, die nicht Bestandteil dieser Arbeit ist.

Pupille positioniert waren. Die Aufzeichnung des EEG und der EOGs erfolgte mit einer Bandpassfilter-Einstellung von 0.1 - 50 Hz. Alle elektrophysiologischen Signale wurden mit einer Frequenz von 250 Hz digitalisiert. Die Impedanz aller Elektroden wurde unter 5 k Ω gehalten.

Datenreduzierung und -analyse

Alle EEG- und EOG- Elektroden sowie die ursprüngliche Referenzelektrode an CZ wurden relativ zur Elektrode am rechten Mastoid neu referenziert. Der ursprüngliche Referenzkanal an CZ wurde nachfolgend als Signalkanal verwendet. Die kontinuierlich aufgezeichneten elektrophysiologischen Daten wurden für jeden Durchgang epochiert. Jede Epoche begann 300 ms vor dem Hinweisreiz und endete 4000 ms später, d.h., 2300 ms nach dem Präsentationsbeginn des Reaktionssignals. Neben Durchgängen, in denen die Versuchspersonen falsch reagiert hatten, wurden auch Durchgänge mit korrekter Antwort, in denen die horizontale oder vertikale Augenaktivität innerhalb der Epoche einen absoluten Schwellenwert von 90 μ V überstieg (durchschnittlich 20.4 % aller Durchgänge), von der Auswertung der elektrophysiologischen Daten ausgeschlossen. Durchschnittliche ereigniskorrelierte Potentiale wurden mit den restlichen Durchgängen für jede Versuchsperson und jede Versuchsbedingung berechnet, wobei auf jegliche Artefaktkorrektur oder Filterung verzichtet wurde.⁵ Als Baseline diente für die Berechnung der CNV und der P300 jeweils die 200 ms Periode vor dem Präsentationsbeginn des Hinweisreizes. Die CNV war als die mittlere gerichtete Aktivität in der 200 ms Periode vor dem Präsentationsbeginn des Reaktionssignals definiert und wurde getrennt für die Elektroden an Fz, Cz und Pz bestimmt. Die P300 war als die höchste Aktivität an Pz in der Periode von 250 - 600 ms nach dem Präsentationsbeginn des Reaktionssignals definiert.

Die Baseline für die Berechnung des reizbezogenen LRP (SLRP) bestand aus der 200 ms langen Periode vor dem Präsentationsbeginn des Reaktionssignals und für das reaktionsbezogene LRP (RLRP) aus der ebenfalls 200 ms langen Periode von 600 ms bis 400 ms vor dem Beginn

⁵Eine Ausnahme bildete die nachfolgend beschriebene Bestimmung der SLRP- und RLRP-Latenzen, da die Jackknife-Methode von Miller, Patterson und Ulrich (1998) bzw. Ulrich und Miller (2001) eine Filterung des LRPs beinhaltet.

der Reaktion. Das LRP wurde anhand durchschnittlicher EKPs an C3 und C4 mit Hilfe von Standardprozeduren berechnet (vgl. Leuthold et al., 1996).⁶

Für jeden Durchgang wurde die Differenz der Potentiale an C3 und C4 bestimmt. In Durchgängen, die eine Reaktion mit der linken Hand erforderten wurde die Differenz $DL(t) = C4(t) - C3(t)$ berechnet. In Durchgängen, die eine Reaktion mit der rechten Hand erforderten, die Differenz $DR(t) = C3(t) - C4(t)$. Die resultierenden Differenzkurven $DL(t)$ und $DR(t)$ wurden dann jeweils innerhalb einer Bedingung über alle Durchgänge gemittelt. Das LRP ergibt sich durch die abschließende Mittelung der beiden Differenzkurven, d.h., $LRP(t) = [M_{DL(t)} + M_{DR(t)}]/2$. Bei der Berechnung der SLRPs wurde bei der Bestimmung der durchschnittlichen Differenzkurven jede Differenzkurve nach dem Präsentationsbeginn des Reaktionssignals ausgerichtet. Bei der Berechnung der RLRPs wurde bei der Bestimmung der durchschnittlichen Differenzkurve jede Differenzkurve nach dem Reaktionsbeginn ausgerichtet.

Für die Bestimmung der SLRP- und RLRP-Latenzen wurde das Jackknife-Verfahren für faktorielle Versuchspläne verwendet (Ulrich & Miller, 2001), welches eine Erweiterung des Verfahrens von Miller, Patterson und Ulrich (1998) darstellt. Der Empfehlung von Miller et al. (1998) folgend, wurde der Beginn des SLRP als der Zeitpunkt definiert, an dem 50 % der SLRP-Amplitude erreicht wurde. Entsprechend wurde der Beginn des RLRP als der Zeitpunkt definiert, an dem 90 % der RLRP-Amplitude erreicht wurde. Vor der Bestimmung der Amplituden wurden die LRPs mit einem 4 Hz-Tiefpassfilter gefiltert. Da das Jackknife-Verfahren für faktorielle Versuchspläne (Ulrich & Miller, 2001) eine Korrektur der F-Werte beinhaltet, wurden die korrigierten F-Werte im Ergebnisabschnitt als „ F_c “ bezeichnet.

Da bis zu 20 % der horizontalen Augenaktivität in das LRP einfließen können (vgl. Elbert, Lutzenberger, Rockstroh & Birbaumer, 1985) wurde die reizbezogene (SHEOG) und die reaktionsbezogene (RHEOG) durchschnittliche horizontale Augenaktivität analog zu SLRP und RLRP berechnet. Dies ermöglichte die Überprüfung, ob trotz des Ausschlusses

⁶Um die Äquidistanz der Elektroden für eine topografische Auswertung – die nicht Bestandteil dieser Arbeit ist – zu gewährleisten, wurde das EEG an C3 und C4 anstelle von C3' und C4' abgeleitet.

von Durchgängen, in denen die Augenaktivität den Schwellenwert von $90 \mu\text{V}$ überstieg, die auf der Ebene des LRP beobachteten Effekte auf Augenartefakte zurückzuführen sind.

5.2 Versuchsplan

Es bestand ein faktorieller Versuchsplan mit Messwiederholung auf den jeweils zweistufigen Faktoren Vorinformation (mit, ohne), Reaktionshand (links, rechts) und Kraftanstiegszeitbedingung (TTP100, TTP200).

5.3 Ergebnisse

Zunächst wurden – analog zu den anderen Experimenten – die Ergebnisse für die Aufgabenbewältigung sowie für die Reaktionszeiten und Fehler dargestellt. Im Anschluss wurden die Ergebnisse für die elektro-physiologischen Maße berichtet.

5.3.1 Aufgabenbewältigung

Durchschnittlich 4.1 % aller Durchgänge waren Fehlerdurchgänge, die von der Auswertung ausgeschlossen wurden⁷. Die häufigste Fehlerart waren Reaktionen mit der falschen Hand oder beiden Händen (1.6 %). In 1.2 % aller Durchgänge wurde mit falscher Kraftanstiegszeit reagiert. Reaktionen mit falscher Kraftamplitude traten in 1.0 % aller Durchgänge auf. In 0.2 % aller Durchgänge reagierten die Versuchspersonen zu spät, in weniger als 0.1 % aller Durchgänge zu früh. Reaktionen mit sowohl falscher Kraftanstiegszeit als auch falscher Kraftamplitude traten ebenfalls in weniger als 0.1 % aller Durchgänge auf.

Abbildung 5.2 zeigt für die korrekten Reaktionen die durchschnittlichen Kraftanstiegszeiten und Kraftamplituden und Tabelle 5.1 die Standardabweichungen der Kraftanstiegszeiten und Kraftamplituden,

⁷Durchgänge, in denen die Versuchspersonen zu starke Augenbewegungen gemacht aber korrekt reagiert hatten, wurden von der Analyse der Verhaltensdaten nicht ausgeschlossen.

5 Experiment 4

jeweils in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation. Die Varianzanalyse für die Kraftanstiegszeiten ergab lediglich

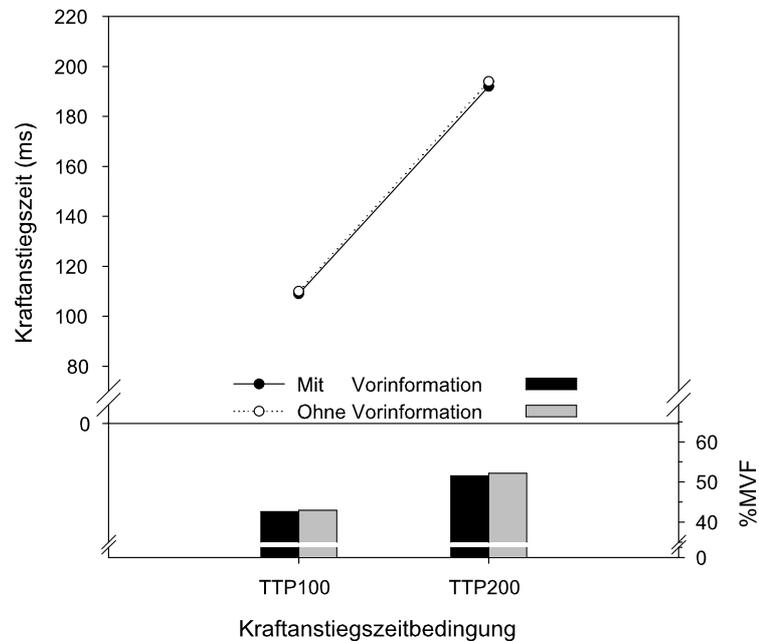


Abbildung 5.2: Durchschnittliche Kraftanstiegszeiten (in ms) und Kraftamplituden (in %MVF), in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation.

einen signifikanten Effekt der Kraftanstiegszeitbedingung, $F(1,23) = 164.83$, $MSE = 2029.30$, $p < .01$. Die Versuchspersonen produzierten in der Bedingung TTP100 Reaktionen mit geringerer Kraftanstiegszeit (109 ms) als in der Bedingung TTP200 (193 ms). Weder der Faktor Vorinformation, $F(1,23) = 2.70$, $MSE = 36.06$, $p > .05$, noch der Faktor Reaktionshand ($F < 1$) oder eine der Wechselwirkungen erwiesen sich als signifikant.

Die Varianzanalyse für die Standardabweichungen der Kraftanstiegszeit ergab ebenfalls einen signifikanten Effekt der Kraftanstiegszeitbedingung, $F(1,23) = 203.04$, $MSE = 64.43$, $p < .01$. Die Standardabweichung der Kraftanstiegszeit war in der Bedingung TTP100 (14.7 ms)

Tabelle 5.1: Durchschnittliche Standardabweichungen der Kraftanstiegszeit (in ms) und Kraftamplitude (in %MVF) in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation.

Bedingung	SD	
	TTP	PF
<i>Mit Vorinformation</i>		
TTP100	14.5	7.5
TTP200	30.5	7.3
<i>Ohne Vorinformation</i>		
TTP100	14.9	7.5
TTP200	31.9	7.6

Anmerkung. SD: Standardabweichung; TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude.

geringer als in der Bedingung TTP200 (31.2 ms). Auch der Faktor Reaktionshand hatte einen signifikanten Einfluss auf die Höhe der Standardabweichung der Kraftanstiegszeit, $F(1,23) = 8.92$, $MSE = 11.95$, $p < .01$. Die Standardabweichung war bei Reaktionen mit der linken Hand (23.7 ms) etwas größer als bei Reaktionen mit der rechten Hand (22.2 ms).

Die Varianzanalyse für die Kraftamplituden ergab einen signifikanten Effekt der Kraftanstiegszeitbedingung, $F(1,23) = 43.29$, $MSE = 92.17$, $p < .01$. In Durchgängen der Bedingung TTP200 reagierten die Versuchspersonen stärker (51.8%MVF) als in der Bedingung TTP100 (42.7%MVF). Die Wechselwirkung von Kraftanstiegszeitbedingung und Reaktionshand war ebenfalls signifikant, $F(1,23) = 7.05$, $MSE = 6.84$, $p < .05$. In Durchgängen der Bedingung TTP100 reagierten die Versuchspersonen mit ihrer linken Hand (43.0%MVF) stärker als mit der rechten Hand (42.4%MVF), in Durchgängen der Bedingung TTP200 war dieses umgekehrt (51.1%MVF vs. 52.6%MVF). Zudem ergab die Varianzanalyse einen statistischen Trend für den Faktor Vorinformation, $F(1,23) = 3.03$, $MSE = 4.18$, $p = .095$, der minimal stärkere Reaktionen in Durchgängen ohne Vorinformation (47.5%MVF) als in Durchgängen mit Vorinformation (47.0%MVF) reflektierte. Weder der Faktor Reaktionshand noch eine der anderen Wechselwirkungen erwiesen sich als signifikant (alle F 's < 1.4).

Die Varianzanalyse für die Standardabweichungen der Kraftamplitude ergab einen signifikanten Haupteffekt der Vorinformation, $F(1,23) = 4.71$, $MSE = 0.40$, $p < .05$. In Durchgängen mit Vorinformation (7.38 %MVF) war die Standardabweichung etwas geringer als in Durchgängen ohne Vorinformation (7.58 %MVF). Zudem ergab sich eine signifikante Wechselwirkung der Faktoren Reaktionshand und Vorinformation, $F(1,23) = 7.54$, $MSE = 0.42$, $p < .05$. In Durchgängen mit Vorinformation war die Standardabweichung bei Reaktionen mit der linken Hand (7.41 %MVF) etwas größer als bei Reaktionen mit der rechten Hand (7.36 %MVF), in Durchgängen ohne Vorinformation war dieses umgekehrt (7.35 %MVF vs. 7.81 %MVF). Darüberhinaus ergab die Varianzanalyse keine signifikanten Effekte.

5.3.2 Reaktionszeiten und Fehler

Abbildung 5.3 zeigt die durchschnittlichen Reaktionszeiten und den Anteil falscher Reaktionen in Abhängigkeit von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung. Die Varianzanalyse für die Reaktionszeiten ergab einen signifikanten Haupteffekt der Kraftanstiegszeitbedingung, $F(1,23) = 13.45$, $MSE = 2907.00$, $p < .01$. Die Reaktionszeiten in der Bedingung TTP100 (476 ms) waren um 29 ms kürzer als in der Bedingung TTP200 (505 ms). Ebenso ergab sich ein signifikanter Haupteffekt der Vorinformation, $F(1,23) = 154.32$, $MSE = 2331.60$, $p < .01$. Mit Vorinformation über die Kraftanstiegszeit waren die Reaktionen durchschnittlich um 87 ms schneller als ohne Vorinformation (447 ms vs. 534 ms). Auch die Wechselwirkung von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung, $F(1,23) = 4.80$, $MSE = 461.09$, $p < .05$, erwies sich als signifikant. In Durchgängen mit Vorinformation war der Reaktionszeitvorteil von Reaktionen der Bedingung TTP100 gegenüber Reaktionen der Bedingung TTP200 geringer ausgeprägt (22 ms) als in Durchgängen ohne Vorinformation (35 ms). Der Faktor Reaktionshand, die Wechselwirkungen von Vorinformation und Reaktionshand bzw. Kraftanstiegszeitbedingung und Reaktionshand, sowie die Dreifach-Interaktion der Faktoren erwiesen sich als nicht signifikant (alle F 's < 1).

Die Varianzanalyse für die Gesamtfehlerprozent ergab lediglich einen

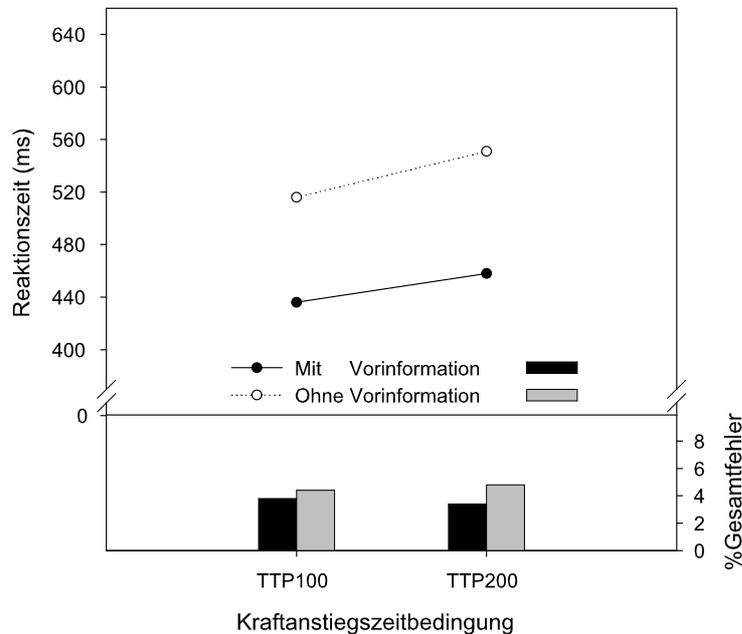


Abbildung 5.3: Durchschnittliche Reaktionszeiten (in ms) und Gesamtfehlerquoten (in %), in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation.

signifikanten Einfluss der Vorinformation, $F(1,23) = 5.67$, $MSE = 7.71$, $p < .05$. Wie in den vorherigen Experimenten unterliefen den Versuchspersonen in Durchgängen ohne Vorinformation (4.6 %) mehr Fehler als in Durchgängen mit Vorinformation (3.6 %). Ansonsten traten keine signifikanten Haupteffekte bzw. Wechselwirkungen auf der Ebene der Gesamtfehlerquote auf (alle F 's < 1). Somit gab es auch in diesem Experiment keine Hinweise dafür, dass die Verhaltensdaten einem *speed-accuracy tradeoff* (vgl. Osman et al., 2000; Wickelgren, 1977) unterlagen.

Die analogen Varianzanalysen für die verschiedenen Fehlerarten zeigten, dass der Effekt der Vorinformation auf die Gesamtfehlerquote zum Teil auf den signifikant höheren Anteil von zu langsamen Reaktionen, $F(1,23) = 9.22$, $MSE = 0.83$, $p < .01$, in Durchgängen ohne Vorinformation als in Durchgängen mit Vorinformation zurückzuführen ist

5 Experiment 4

(0.4 % vs. 0.0 %). Die Varianzanalyse für den Anteil von Reaktionen mit falscher Kraftanstiegszeit ergab eine signifikante Wechselwirkung der Faktoren Reaktionshand und Vorinformation, $F(1,23) = 4.40$, $MSE = 0.95$, $p < .05$. In Durchgängen mit Vorinformation machten die Versuchspersonen mehr Fehler mit der linken Hand als mit der rechten Hand (1.3 % vs. 0.8 %), in Durchgängen ohne Vorinformation war dieses umgekehrt (1.2 % vs. 1.4 %). Für alle anderen Fehlerarten ergaben die entsprechenden Varianzanalysen keine signifikanten Effekte. Tabelle 5.2 gibt einen Überblick über den Anteil der verschiedenen Fehlerarten getrennt nach den Versuchsbedingungen.

Tabelle 5.2: Anteil falscher Reaktionen (in %), getrennt nach Versuchsbedingungen und Fehlerarten.

Bedingung	Gesamtfehler	Fehlerarten					
		Hand	TTP	PF	TTP+PF	$> RT_{max}$	$< RT_{min}$
<i>Mit Vorinformation</i>							
TTP100	3.8	1.4	1.5	0.9	0.0	0.0	0.1
TTP200	3.4	1.5	0.7	1.1	0.0	0.1	0.1
<i>Ohne Vorinformation</i>							
TTP100	4.4	1.4	1.8	0.9	0.0	0.3	0.0
TTP200	4.8	2.2	0.8	1.2	0.0	0.6	0.0

Anmerkung. TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude; RT: Reaktionszeit; $RT_{max} = 1000$ ms; $RT_{min} = 100$ ms. Abweichungen zwischen der Gesamtfehlerquote und der Summe der einzelnen Fehlerquoten ergeben sich durch Rundung.

5.3.3 Elektrophysiologische Ergebnisse

CNV und P300

Abbildung 5.4 zeigt die durchschnittlichen ereigniskorrelierten Hirnpotentiale an den Elektrodenpositionen Fz, Cz und Pz in Abhängigkeit von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung, jeweils gemittelt über den Faktor Reaktionshand. Für die CNV wurde eine Varianzanalyse mit Messwiederholung auf den Faktoren Elektrodenposition (Fz, Cz, Pz),

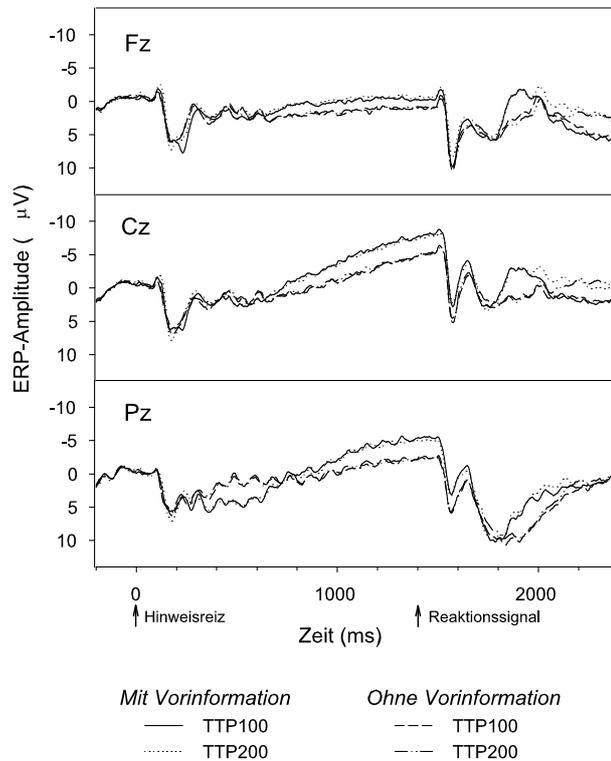


Abbildung 5.4: Durchschnittliche ereigniskorrelierte Hirnpotentiale (in μV) an den Elektrodenpositionen Fz, Cz und Pz in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation, gemittelt über den Faktor Reaktionshand. Zum Zeitpunkt 0 begann die Präsentation des Hinweisreizes, zum Zeitpunkt 1400 die Präsentation des Reaktionssignals.

Vorinformation (mit, ohne), Reaktionshand (rechts, links) und Kraftanstiegszeitbedingung (TTP100, TTP200) durchgeführt⁸. Die Analyse ergab einen signifikanten Haupteffekt der Elektrodenposition, $F(2,46) = 32.84$, $MSE = 48.20$, $p < .01$. Post-hoc Kontraste nach dem Tukey-Verfahren ergaben, dass die Ausprägung der CNV an allen drei Elektro-

⁸Bei Verletzung der Sphärizitätsannahme wurden die erhaltenen p -Werte mit der Greenhouse-Geisser Prozedur korrigiert (vgl. Huynh, 1978).

denpositionen signifikant unterschiedlich war (kritischer Wert: $1.72 \mu\text{V}$; alle p 's $< .05$). Am stärksten war die CNV an Cz ($-5.4 \mu\text{V}$), schwächer an Pz ($-3.4 \mu\text{V}$) und am schwächsten an Fz ($+0.3 \mu\text{V}$) ausgeprägt. Der Faktor Vorinformation hatte ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die CNV, $F(1,23) = 61.47$, $MSE = 13.74$, $p < .01$. In Durchgängen mit Vorinformation war die CNV stärker ausgeprägt als in Durchgängen ohne Vorinformation ($-4.0 \mu\text{V}$ vs. $-1.6 \mu\text{V}$). Auch die Wechselwirkung von Elektrodenposition und Vorinformation erwies sich als signifikant, $F(2,46) = 12.32$, $MSE = 2.21$, $p < .01$. Die CNV-Ausprägung schien an den Elektrodenpositionen Cz und Pz stärker durch den Faktor Vorinformation beeinflusst zu werden als an Fz. Ansonsten ergab die Varianzanalyse keine signifikanten Effekte (alle F 's < 1).

Für die P300-Amplituden und P300-Latenzen wurde eine Varianzanalyse mit Messwiederholung auf den Faktoren Vorinformation (mit, ohne), Reaktionshand (rechts, links) und Kraftanstiegszeitbedingung (TTP100, TTP200) durchgeführt. Die Analyse für die P300-Amplituden ergab lediglich einen signifikanten Effekt des Faktors Reaktionshand, $F(1,23) = 4.90$, $MSE = 5.65$, $p < .05$. Bei Reaktionen mit der rechten Hand war die P300 etwas stärker ausgeprägt als bei Reaktionen mit der linken Hand ($13.7 \mu\text{V}$ vs. $12.9 \mu\text{V}$). Ansonsten traten keine signifikanten Effekte auf der Ebene der P300-Amplitude auf.

Die Varianzanalyse für die P300-Latenz ergab überraschenderweise einen signifikanten Einfluss des Faktors Vorinformation, $F(1,23) = 28.51$, $MSE = 5421.80$, $p < .01$. In Durchgängen mit Vorinformation betrug die Latenz der P300 bezogen auf das Reaktionssignal 413 ms, in Durchgängen ohne Vorinformation 470 ms. Außerdem trat ein statistischer Trend für den Faktor Reaktionshand auf, $F(1,23) = 3.40$, $MSE = 4200.60$, $p = .078$. Bei Reaktionen mit der linken Hand betrug die P300-Latenz durchschnittlich 433 ms, bei Reaktionen mit der rechten Hand 450 ms. Hingegen hatte der Faktor Kraftanstiegszeitbedingung keinen signifikanten Einfluss auf die P300-Latenz ($F < 1$). Auch verfehlten alle Wechselwirkungen (alle F 's < 1.3) das Signifikanzniveau.

Reizbezogenes LRP (SLRP)

Abbildung 5.5 zeigt im oberen Teil das SLRP in Abhängigkeit von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung. Für die SLRP-Latenz wur-

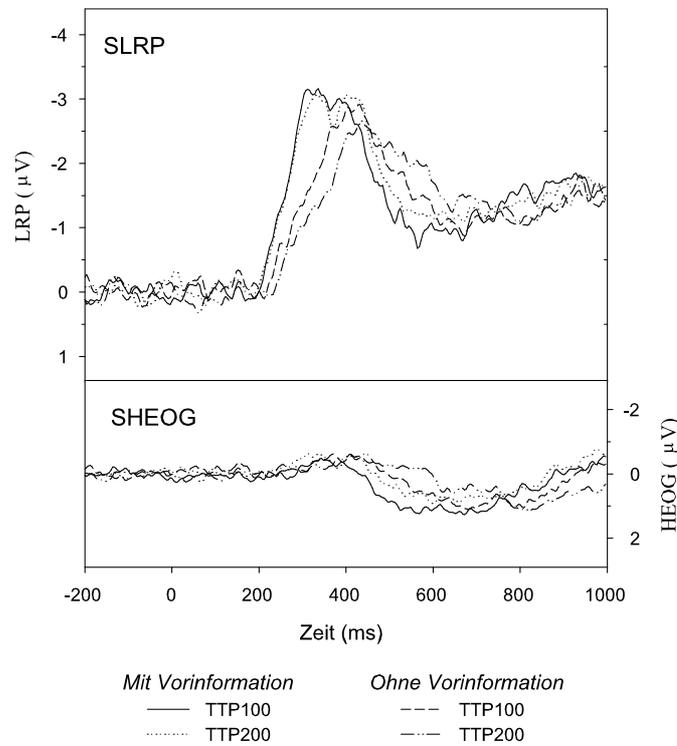


Abbildung 5.5: SLRP (oben) und SHEOG (unten) in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation (in μV). Der Zeitpunkt 0 bezeichnet den Präsentationsbeginn des Reaktionssignals.

de eine Varianzanalyse mit Messwiederholung auf den zweistufigen Faktoren Vorinformation (mit, ohne) und Kraftanstiegszeitbedingung (TTP100, TTP200) durchgeführt. Die Varianzanalyse ergab einen signifikanten Effekt des Faktors Vorinformation, $F_c(1,23) = 22.86$, $MSE = 5.38$, $p < .01$. In der Bedingung „mit Vorinformation“ war das S-LRP-Intervall (256 ms) um rund 50 ms kürzer als in der Bedingung „ohne Vorinformation“ (308 ms). Hingegen erwies sich der Faktor Kraftanstiegszeit als nicht signifikant, $F_c(1,23) = 1.60$, $MSE = 3.82$, $p > .05$, wenngleich das S-LRP-Intervall in der Bedingung TTP100 (276 ms) numerisch etwas

kürzer war als in der Bedingung TTP200 (288 ms). Die Wechselwirkung der beiden Faktoren erwies sich ebenfalls als nicht signifikant, $F_c(1,23) = 1.95$, $MSE = 3.30$, $p > .05$. Auffällig war jedoch, dass die Länge des S-LRP-Intervalls nur in der Bedingung „mit Vorinformation“ numerisch nicht von der Kraftanstiegszeitbedingung abhing (vgl. Abbildung 5.5). Die Länge des S-LRP-Intervalls betrug in diesem Fall sowohl in der Bedingung TTP100 als auch in der Bedingung TTP200 256 ms. In der Bedingung „ohne Vorinformation“ wirkte sich die Kraftanstiegszeitbedingung hingegen numerisch deutlich auf das S-LRP-Intervall aus. Die Länge des S-LRP-Intervalls betrug in diesem Fall in der Bedingung TTP100 nur 296 ms, in der Bedingung TTP200 hingegen 320 ms.

Reaktionsbezogenes LRP (RLRP)

Abbildung 5.6 zeigt im oberen Teil das RLRP in Abhängigkeit von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung. Für die RLRP-Latenz wurde ebenfalls eine Varianzanalyse mit den jeweils zweistufigen Faktoren Vorinformation (mit, ohne) und Kraftanstiegszeitbedingung (TTP100, TTP200) durchgeführt. Die Varianzanalyse ergab keinen signifikanten Einfluss der Faktoren Vorinformation bzw. Kraftanstiegszeitbedingung, noch eine signifikante Wechselwirkung der beiden Faktoren auf das LRP-R-Intervall (alle F_c 's < 1). Zusätzlich wurde mit einer analogen Varianzanalyse der Einfluss der Faktoren auf die Amplitude des RLRP überprüft, da die Vermutung besteht, dass die RLRP-Amplitude einen Indikator für das Ausmaß handspezifischer Vorbereitung darstellt⁹. Die RLRP-Amplitude war dabei als mittlere (ungefilterte) LRP-Aktivität in dem 100 ms langen Intervall vor der Reaktion definiert. Die Varianz-

⁹Auf eine Auswertung der SLRP-Amplitude wird üblicherweise verzichtet, da sie im Vergleich zur RLRP-Amplitude grundsätzlich stärker verschmiert ist. Die Verschmierung ist umso stärker ausgeprägt je stärker die Reaktionszeiten streuen, da die Differenzkurven zur Bestimmung des SLRP reizbezogen gemittelt werden. Da die Streuung der Reaktionszeiten üblicherweise höher ist je länger die Reaktionszeiten sind, ist davon auszugehen, dass die Verschmierung in Bedingungen mit relativ hoher Reaktionszeit stärker ausgeprägt ist als in Bedingungen mit relativ kurzer Reaktionszeit. Problematisch ist hierbei, dass die Verschmierung zu einer Reduktion der SLRP-Amplitude führt. Falls ein Faktor sowohl die SLRP-Amplitude als auch die Reaktionszeit beeinflusst, kann daher nicht gesagt werden, ob der Effekt auf der SLRP-Amplitude nur ein Artefakt darstellt.

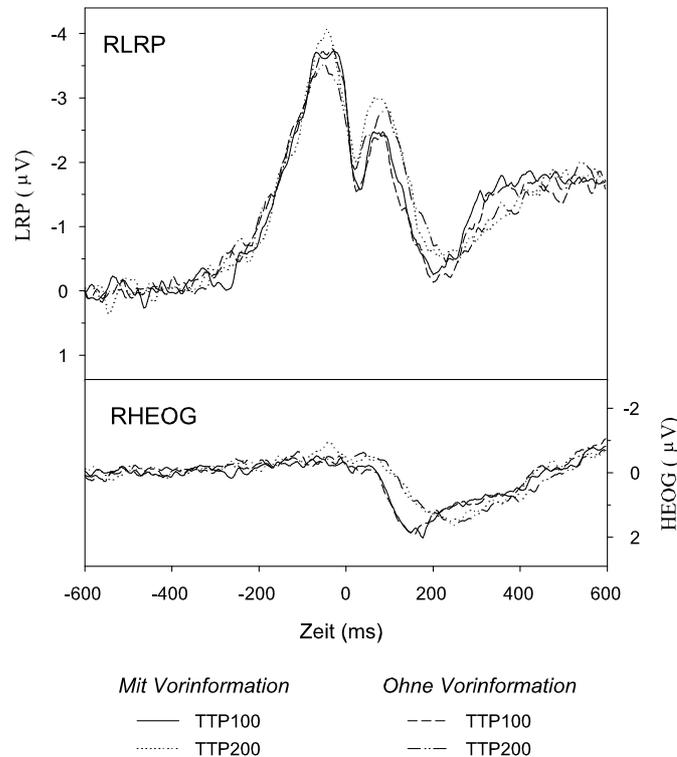


Abbildung 5.6: RLRP (oben) und RHEOG (unten) in Abhängigkeit von Kraftanstiegszeitbedingung und Vorinformation (in μV). Der Zeitpunkt 0 bezeichnet den Beginn der Reaktion.

analyse ergab weder einen signifikanten Effekt des Faktors Vorinformation, $F(1,23) = 1.94$, $MSE = 0.37$, $p > .05$, noch hatten der Faktor Kraftanstiegszeitbedingung oder die Wechselwirkung der beiden Faktoren einen signifikanten Einfluss auf die RLRP-Amplitude (beide F 's < 1.1).

HEOG

Abbildung 5.5 zeigt im unteren Teil das SHEOG und Abbildung 5.6 im unteren Teil das RHEOG, jeweils in Abhängigkeit von Vorinformation

und Kraftanstiegszeitbedingung. Für das SHEOG und das RHEOG wurde jeweils eine Varianzanalyse mit Messwiederholung auf den Faktoren Vorinformation (mit, ohne) und Kraftanstiegszeitbedingung (TTP100, TTP200) berechnet. Für die Analyse des SHEOG wurde die mittlere gerichtete SHEOG-Aktivität im Zeitintervall von 0-400 ms nach dem Reaktionssignal berechnet. Für die Analyse des RHEOG die mittlere gerichtete RHEOG-Aktivität im Zeitintervall von -250 bis -50 ms vor der Reaktion.

Die Varianzanalyse für das SHEOG ergab weder einen signifikanten Einfluss der Faktoren Vorinformation bzw. Kraftanstiegszeitbedingung (F 's < 1) noch eine signifikante Wechselwirkung der beiden Faktoren, $F(1,23) = 2.64$, $MSE = 0.20$, $p > .05$. Die Varianzanalyse für das RHEOG ergab keinerlei signifikante Effekte (alle F 's < 1). Somit schien die Augenaktivität das LRP nicht spezifisch beeinflusst zu haben.

5.4 Diskussion

5.4.1 Verhaltensdaten

Die Ergebnisse des Experiments replizierten zum einen den Hauptbefund der vorangegangenen Experimente. Die Reaktionszeiten in der Bedingung TTP100 waren um rund 30 ms kürzer als in der Bedingung TTP200. Dieses Ergebnis bildet weitere Evidenz dafür, dass die Programmierung von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit schneller abgeschlossen wird als die Programmierung von Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit. Zudem führte Vorinformation über die Kraftanstiegszeit – wie auch in den drei anderen Experimenten – zu einer starken Verkürzung der Reaktionszeiten. Darüberhinaus wird die Vermutung, dass der Reaktionszeitvorteil von Reaktionen der Bedingung TTP100 auf Prozesse der motorischen Programmierung zurückzuführen ist, durch den Befund unterstützt, dass Reaktionen der Bedingung TTP200 stärker von Vorinformation über die Kraftanstiegszeit profitierten als Reaktionen der Bedingung TTP100. Dies entspricht der Vorhersage des Modells der Parameterspezifizierung (Rosenbaum, 1980, 1983), welches annimmt, dass Vorinformation eine Spezifikation der betreffenden Parameter des motorischen Programms noch vor der Präsentation

des Reaktionssignals ermöglicht. Als Folge kann sich die schneller abgeschlossene Programmierung von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit nicht mehr so stark auf die Reaktionszeit auswirken wie in Durchgängen ohne Vorinformation. Da in Experiment 4 mehr Versuchspersonen getestet wurden als in den Experimenten 1 und 2, wird die Vermutung gestützt, dass die Wechselwirkung von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung in den Experimenten 1 und 2 aufgrund zu geringer statistischer Macht der Analyseverfahren das Signifikanzniveau verfehlte.

5.4.2 CNV

Vorinformation über die Kraftanstiegszeit führte zu einer stärkeren Ausprägung der (späten) CNV im Vergleich zu Durchgängen, in denen keine Vorinformation gegeben wurde. Dieses Ergebnis unterstützt die Annahme von Ulrich et al. (1998), dass die CNV als ein Indikator für zentrale Prozesse der motorischen Vorbereitung angesehen werden kann. Zudem bildet das Ergebnis dieses Experiments weitere Evidenz für die Ansicht, dass die in den Studien von van Boxtel et al. (1993) bzw. van Boxtel und Brunia (1994) aufgetretene geringere CNV-Ausprägung in Durchgängen mit Vorinformation eher einen vormotorischen Effekt darzustellen scheint (vgl. Ulrich et al., 1998).

Experiment 4 entsprach im zeitlichen Ablauf mehr dem Experiment von Ulrich et al. (1998) und in der Aufgabe und den geforderten Reaktionen eher den Experimenten der Arbeitsgruppe um Brunia und van Boxtel. Genau wie in der Studie von Ulrich et al. (1998) und im Gegensatz zu den Experimenten von van Boxtel et al. (1993) bzw. van Boxtel und Brunia (1994) trat auch im vorliegenden Experiment der Effekt der Vorinformation eher über zentral-parietalen anstatt frontalen Bereichen auf. Somit schien der Faktor Vorinformation vor allem die Komponenten der CNV zu beeinflussen, die dem Bereitschaftspotential entsprechen. Die Möglichkeit, dass die Eigenschaften der Reaktion den Vorinformationseffekt beeinflussen und deswegen unterschiedliche Ergebnisse in den Studien von Ulrich et al. (1998) bzw. der Arbeitsgruppe um van Boxtel und Brunia (1993, 1994) aufgetreten sind, erscheint aufgrund der vorliegenden Ergebnisse als sehr unwahrscheinlich.

Der Faktor Kraftanstiegszeitbedingung hatte wie erwartet keinen Einfluss auf die Ausprägung der CNV. Da die CNV ein Amplitudenmaß ist, sollte die CNV nicht sensitiv für den postulierten zeitlichen Unterschied in der motorischen Programmierung für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit und Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit sein.

5.4.3 P300

Ein überraschendes Ergebnis ist, dass die Latenz der P300-Amplitude in Durchgängen mit Vorinformation deutlich kürzer war als in Durchgängen ohne Vorinformation. Da die P300-Latenz üblicherweise (z.B. McCarthy & Donchin, 1981) als Indikator für die Dauer der Reizidentifikation angesehen wird, könnte dieses Ergebnis dahingehend interpretiert werden, dass Vorinformation die Identifikation der Reaktionssignale beschleunigte. Es bestehen jedoch eine Reihe von Gründen gegen eine solche Interpretation. So trat zum einen in sehr ähnlichen Experimenten, die sowohl nahezu identische Hinweisreize und Reaktionssignale verwendeten, als auch einen nahezu gleichen zeitlichen Ablauf beinhalteten, kein Effekt der Vorinformation auf der P300-Latenz auf (Müller-Gethmann et al., 2000).

Zum anderen wurde in Experiment 4 die P300-Amplitude nicht durch den Faktor Vorinformation beeinflusst. Studien, in denen die Reizwahrscheinlichkeit manipuliert wurde, legen nahe, dass die P300-Amplitude um so höher ist, je unwahrscheinlicher die Versuchspersonen das Auftreten eines Reizes einschätzen (Squires, Wickens, Squires & Donchin, 1976; einen Überblick über die Studien zur P300-Amplitude geben z.B. Duncan-Johnson & Donchin, 1982). In Experiment 4 betrug die objektive Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines bestimmten Reaktionssignals ohne Vorinformation 25 %, in Durchgängen mit Vorinformation 50 %. Da die P300-Amplitude jedoch in beiden Bedingungen konstant war, schienen die Versuchspersonen zumindest subjektiv keinen Unterschied bezüglich der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines bestimmten Reizes zu empfinden. Es ist daher fraglich, ob die höhere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines bestimmten Reaktionssignals in Durchgängen mit Vorinformation zu einer schnelleren Reizidentifikation in diesen Durchgängen führte.

Außerdem legt der Verlauf der P300 nahe, dass sich Vorinformation vor allem auf die Form der P300 auswirkte. So ist die P300 in Durchgängen mit Vorinformation viel breitgipfliger als in Durchgängen ohne Vorinformation. Die P300 scheint sowohl in Durchgängen mit Vorinformation als auch in Durchgängen ohne Vorinformation nahezu zum gleichen Zeitpunkt ihr „Gipfel-Plateau“ zu erreichen, wobei in Durchgängen ohne Vorinformation die Positivität zum Ende des Gipfel nochmals minimal abfällt und somit den großen Latenzunterschied in den beiden Bedingungen verursacht. Dies deutet darauf hin, dass die P300 durch andere, möglicherweise motorische, Komponenten überlagert wird.

Diese Vermutung erhält Unterstützung durch die Tatsache, dass der Gipfel der P300 zu einem Zeitpunkt auftritt, der sehr nahe an der durchschnittlichen Reaktionszeit für diese Durchgänge liegt. Da die Reaktionszeiten in Durchgängen mit Vorinformation viel kürzer sind als in Durchgängen ohne Vorinformation, ist anzunehmen, dass die P300 in Durchgängen mit Vorinformation stärker von motorischen Komponenten überlagert wird. Diese stärkere Überlagerung könnte zu der früher auftretenden Negativierung der EKP-Aktivität an Pz führen und somit zu einer Unterschätzung der P300-Latenz in Durchgängen mit Vorinformation führen.

Weitere Unterstützung findet die Annahme, dass in Experiment 4 Vorinformation über die Kraftanstiegszeit nicht die Reizidentifikation der Reaktionssignale beeinflusste, durch Studien, die eine Abhängigkeit der P300-Latenz von der Dauer der Reaktionsauswahl nahe legen (Leuthold & Sommer 1998; siehe auch Verleger, 1997). Da Vorinformation über die Kraftanstiegszeit die Anzahl der möglichen Reaktionen in diesem Experiment halbiert, ist davon auszugehen, dass die Reaktionsauswahl in Durchgängen mit Vorinformation schneller abgeschlossen ist als in Durchgängen ohne Vorinformation. Möglicherweise könnte somit die kürzere Dauer von Prozessen der Reaktionsauswahl, und nicht die kürzere Dauer von Prozessen der Reizidentifikation, zu der kürzeren P300-Latenz in Durchgängen mit Vorinformation geführt haben.

5.4.4 LRP

Auf der Ebene des LRP ergab das Experiment für den Faktor Vorinformation klare und für den Faktor Kraftanstiegszeitbedingung sowie die Wechselwirkung der beiden Faktoren weniger eindeutige Ergebnisse. Ein klarer Befund ist, dass Vorinformation über die Kraftanstiegszeit das S-LRP-Intervall aber nicht das LRP-R-Intervall verkürzte. Somit scheint Vorinformation über die Kraftanstiegszeit keine späten motorischen Prozesse zu beschleunigen. Dieser Befund bildet weitere Evidenz für die Annahme, dass Vorinformation über unterschiedliche Reaktions-eigenschaften Prozesse beschleunigt, die sich zumindest in ihrer zeitlichen Position innerhalb des Informationsverarbeitungssystems unterscheiden.

Müller-Gethmann et al. (2000) vermuteten, dass Vorinformation über die Kraft frühe motorische Prozesse beschleunigt, die gliedmaßen-unspezifisch zu sein scheinen. Vorinformation über andere Reaktionseigenschaften wie beispielsweise die Reaktionsrichtung beschleunigt hingegen auch spätere motorische Prozesse, die gliedmaßen-spezifisch zu sein scheinen (vgl. auch Miller, Coles & Chakraborty, 1996; Ulrich et al., 1998). Eine weitere Möglichkeit, die nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann, ist, dass Vorinformation über bestimmte Reaktionseigenschaften wie Kraftamplitude oder Kraftanstiegszeit überhaupt keine motorischen Prozesse beschleunigt.

Die kürzeren Reaktionszeiten und das verkürzte S-LRP-Intervall in der Bedingung „mit Vorinformation“ könnten lediglich die kürzere Dauer der Reaktionsauswahl reflektieren, die auf der Reduktion von Reaktionsalternativen durch Vorinformation beruht (Frith & Done, 1986; Hick, 1952; Miller & Ulrich, 1998). Hiergegen spricht jedoch neurophysiologische Evidenz. So beeinflusst Vorinformation über die Kraftamplitude die Einzelzell-Aktivität im primären motorischen Kortex (Riehle & Requin, 1995).

Leider liefern die elektrophysiologischen Ergebnisse des Experiments 4 nur schwache zusätzliche Evidenz gegen die Annahme, dass Vorinformation über die Kraftanstiegszeit lediglich vormotorische Prozesse beschleunigt. So war das S-LRP-Intervall in Durchgängen der Bedingung TTP100 zwar numerisch kürzer als in Durchgängen der Bedingung TTP200, jedoch verfehlte dieser Effekt statistische Signifikanz.

Auch die Wechselwirkung von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung verfehlte das Signifikanzniveau.

Bemerkenswert ist jedoch, dass ein relativ großer numerischer Unterschied zwischen den Bedingungen TTP100 und TTP200 bezüglich der Dauer des S-LRP-Intervalls bestand, wenn keine Vorinformation genutzt werden konnte. Wurde hingegen Vorinformation gegeben, gab es keinen numerischen Unterschied zwischen den Bedingungen TTP100 und TTP200. Wenngleich der Haupteffekt der Vorinformation und die Wechselwirkung zwischen Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung das Signifikanzniveau verfehlten, ist das Muster der Ergebnisse konsistent mit den Reaktionszeiten. Dies unterstützt die Annahme, dass ein verkürztes S-LRP-Intervall – neben einer Beschleunigung von Prozessen der Reaktionsauswahl – auch den zeitlich geringeren Programmierungsaufwand der Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit reflektiert. Möglicherweise sind die angenommenen zeitlichen Unterschiede in der Programmierung von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit und Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit jedoch zu gering, als dass das LRP ein sensitives Mass für diese Unterschiede darstellen würde.

Da, genau wie der Faktor Vorinformation, auch der Faktor Kraftanstiegszeitbedingung keinen Einfluss auf die RLRP-Latenz hatte, scheint die Folgerung möglich, dass der postulierte Unterschied in der Programmierung von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit und Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit nicht auf einer sehr späten motorischen Stufe lokalisiert ist.

6 Allgemeine Diskussion

Die durchgeführten Experimente sollten die zentrale Hypothese dieser Arbeit überprüfen, dass sich die Programmierung von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit von der Programmierung von Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit unterscheidet. Des Weiteren sollte die Annahme überprüft werden, dass Vorinformation über die Kraftanstiegszeit zur Vorbereitung der Reaktionen genutzt werden kann. Mit Hilfe des Experiments 4 sollte zudem die Hypothese überprüft werden, dass der Reaktionszeitvorteil für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit und der Reaktionszeitvorteil durch Vorinformation teilweise innerhalb später, „motorischer“ Stufen der Informationsverarbeitung lokalisiert sind. In den folgenden Abschnitten wurden die Befunde, die für oder gegen die einzelnen Hypothesen sprechen, zusammengefasst und diskutiert. Da die Ergebnisse der Arbeit einige neue Fragestellungen aufwarfen, wurden zudem mögliche Folgestudien in Hinblick auf eine Erweiterung der Untersuchungen angesprochen.

Evidenz für eine unterschiedliche Programmierung von Reaktionen mit minimaler und längerer Kraftanstiegszeit

In den durchgeführten Experimenten wurden grundsätzlich kürzere Reaktionszeiten für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit als für Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit beobachtet. Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit hatten in den Experimenten 1, 2 und 4 einen Reaktionszeitvorteil von rund 30-40 ms. Die Ergebnisse des Experiments 3, in dem nur Reaktionen mit nicht-minimaler Kraftanstiegszeit untersucht wurden, bilden starke Evidenz dafür, dass dieser Reaktionszeitvorteil nicht durch strategische Effekte erklärbar ist.

Der beobachtete Reaktionszeitvorteil für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit, der auch in einigen anderen Studien aufgetreten zu sein scheint (Carlton et al., 1987; Sommer et al., 1994; van Boxtel & Bru-

nia, 1994; van Boxtel et al., 1993), lässt sich gut mit kombinierten Vorhersagen von PFUM (Ulrich & Wing, 1991, 1993) und dem Modell der Parameterspezifizierung (Rosenbaum, 1980, 1983) erklären. PFUM beinhaltet die Annahme, dass die Programmierung von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit lediglich die Spezifizierung der Anzahl zu rekrutierender Krafteinheiten verlangt, da die Aktivierungsdauer der Krafteinheiten durch den geringsten möglichen Wert festgelegt ist. Bei der Programmierung von Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit muss hingegen auch ein, der erforderlichen Kraftamplitude und Kraftanstiegszeit angemessener, Wert für die Aktivierungsdauer spezifiziert werden. Dies sollte nach PFUM besonders aufwendig sein, da die Aktivierungsdauer und die Anzahl rekrutierter Krafteinheiten nicht unabhängig voneinander auf die Kraftamplitude wirken.

Nach dem Modell der Parameterspezifizierung sollte die Programmierung einer motorischen Reaktion umso früher abgeschlossen sein, je weniger Parameter spezifiziert werden müssen. Der in den Experimenten aufgetretene Reaktionszeitvorteil für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit reflektiert nach dem Modell der Parameterspezifizierung die schneller abgeschlossene Programmierung dieser Reaktionen.

Evidenz für motorische Vorbereitung

Auch die Hypothese, dass Vorinformation über die Kraftanstiegszeit zur Vorbereitung der Reaktionen genutzt werden kann, wird durch die Experimente gestützt. In allen Experimenten waren die Reaktionen in Durchgängen mit Vorinformation um mindestens 90 ms kürzer als Reaktionen in Durchgängen ohne Vorinformation. Auch dieses Ergebnis ist konsistent mit dem Modell der Parameterspezifizierung, welches annimmt, dass durch Vorinformation die entsprechenden Reaktionsparameter noch vor dem Erscheinen des Reaktionssignals spezifiziert werden können.

Allerdings ist unklar, zu welchem Anteil der beobachtete Reaktionszeitvorteil durch Vorinformation auf motorische Vorbereitung zurückzuführen ist. Ein bedeutender Anteil des in den Experimenten aufgetretenen Effekts der Vorinformation ist sicherlich auf die einfachere Reaktionsauswahl in Durchgängen mit Vorinformation als in Durchgängen ohne Vorinformation zurückzuführen (z.B. Hick, 1952; Frith & Done,

1986; Miller & Ulrich, 1998). Die Reaktionsauswahl sollte in Durchgängen mit Vorinformation einfacher – und dadurch schneller abgeschlossen – gewesen sein, da der informative Hinweisreiz die Anzahl der möglichen Reaktionsalternativen halbierte. Auch die elektrophysiologischen Ergebnisse des Experiment 4, auf die nachfolgend genauer eingegangen wurde, lieferten keine eindeutigen Hinweise darauf, zu welchem Teil der beobachtete Effekt der Vorinformation auf motorische Vorbereitung zurückzuführen ist.

Eine indirekte Überprüfung, ob Vorinformation über die Kraftanstiegszeit tatsächlich die Spezifizierung von Reaktionsparametern noch vor dem Erscheinen des Reaktionssignals ermöglicht, bildet die Wechselwirkung von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung in den durchgeführten Experimenten. Nach dem Modell der Parameterspezifizierung sollte der Reaktionszeitvorteil von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit in Durchgängen mit Vorinformation geringer sein als in Durchgängen ohne Vorinformation. Der Grund für die Vorhersage einer solchen Wechselwirkung liegt in der Annahme, dass in Durchgängen mit Vorinformation die Spezifizierung der Reaktionsparameter noch vor dem Erscheinen des Reaktionssignals abgeschlossen ist. Somit sollte sich die später abgeschlossene Programmierung von Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit nicht mehr, bzw. nicht mehr im gleichen Ausmaß, auf die Reaktionszeit auswirken.

Das in den Experimenten 1, 2 und 4 auch in Durchgängen ohne Vorinformation immer ein stabiler Reaktionszeitvorteil für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit aufgetreten ist, könnte dadurch erklärt werden, dass sich die Versuchspersonen nicht in jedem Durchgang optimal vorbereiteten. Problematischer ist hingegen der Befund, dass die vorhergesagte Wechselwirkung nur in Experiment 4 das Signifikanzniveau erreichte. In Experiment 1 wurde das Signifikanzniveau knapp verfehlt und in Experiment 2 wurde auch numerisch keine Wechselwirkung beobachtet.

Für dieses unklare Ergebnis gibt es mehrere potentielle Ursachen. Eine Ursache für das Fehlen einer klaren Interaktion in den Experimenten 1, 2 und 4 könnte in der Art der verwendeten Reaktionssignale liegen. Goodman und Kelso (1980) nahmen an, dass die im Hinweisreiz-Paradigma beobachteten Effekte durch Vorinformation keine motorischen Vorbereitungseffekte im Sinne des Modells der Parameterspezifi-

fizierung reflektieren, sondern weitestgehend durch die in Durchgängen mit Vorinformation schneller abgeschlossene Reaktionsauswahl verursacht werden. Die im Hinweisreiz-Paradigma auftretenden spezifischen Vorinformationseffekte für einzelne Reaktionseigenschaften werden nach diesen Autoren überwiegend dadurch verursacht, dass eine geringe Kompatibilität von Reizen und Reaktionen vorliegt¹. Eine hohe Reiz-Reaktions-Kompatibilität besteht nach Goodman und Kelso immer dann, wenn die Reizenkodierung sehr einfach ist und die geforderte Reaktion „direkt“ durch den Reiz vermittelt wird.² In den durchgeführten Experimenten – wie auch in vielen anderen Studien zum Hinweisreiz-Paradigma – wurden hingegen relativ abstrakte Reaktions-signale verwendet, so dass eine geringe Reiz-Reaktions-Kompatibilität vorlag. Vertreter der Position von Goodman und Kelso (1980) würden daher vermuten, dass auch der in den durchgeführten Experimenten aufgetretene Reaktionszeitvorteil durch Vorinformation weitestgehend durch Prozesse der Reaktionsauswahl hervorgerufen wurde.

Allerdings sprechen zwei Argumente gegen eine solche Annahme. So ist zum einen unklar, wie Prozesse der Reaktionsauswahl die signifikante Wechselwirkung von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung in Experiment 4, sowie die Wechselwirkung in Experiment 1, die das Signifikanzniveau nur knapp verfehlte, bewirkt haben sollten. Zum anderen wurden sowohl in Experimenten mit vergleichsweise hoher (Leuthold et al., 1996, 1. Experiment) als auch vergleichsweise niedriger (Leuthold et al., 1996, 2. Experiment; Müller-Gethmann et al., 2000) Reiz-Reaktions-Kompatibilität ähnliche Effekte der Vorinformation über die Reaktionseigenschaft Bewegungsrichtung berichtet, wenngleich der Effekt der Vorinformation in Studien mit geringer Reiz-Reaktions-Kompatibilität häufig stärker ausgeprägt ist als in Studien mit hoher Reiz-Reaktions-Kompatibilität (vgl. Leuthold et al., 1996).

Eine überzeugendere Erklärung für das inkonsistente Auftreten der

¹In der Diskussion von Goodman und Kelso (1980) bleibt jedoch unklar, wie eine geringe Reiz-Reaktions-Kompatibilität unterschiedliche Effekte für einzelne Reaktionseigenschaften bewirken sollte.

²Ein Experiment, in dem die Versuchspersonen Flexionen bzw. Extensionen mit ihrem Zeigefinger auf Pfeile durchführen, die nach unten oder oben zeigen, wäre ein Beispiel für eine Aufgabe mit hoher Reiz-Reaktions-Kompatibilität, da anzunehmen ist, dass die symbolische Bedeutung der Pfeile stark überlernt ist.

Wechselwirkung von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung bildet die unterschiedlich hohe statistische Macht der Analyseverfahren in den einzelnen Experimenten. Für dieses Argument spricht, dass in Experiment 4, in dem die meisten Versuchspersonen (24) getestet wurden und in dem somit die statistische Macht der Analyseverfahren am größten war, eine signifikante Wechselwirkung aufgetreten ist. An Experiment 1 nahmen mehr Versuchspersonen (16) als an Experiment 2 (12) teil, so dass mit dem gleichen Argument erklärt werden könnte, warum in Experiment 1 im Gegensatz zu Experiment 2 ein statistischer Trend für die Wechselwirkung beobachtet wurde. Zudem hatten die Versuchspersonen in Experiment 4 mehr Übung als in den anderen Experimenten, und es ist anzunehmen, dass die höhere Anzahl von Durchgängen pro Versuchsbedingung zu einer genaueren Schätzung der „wahren“ Mittelwerte führte. Dieser Faktor könnte ebenfalls dazu beigetragen haben, dass eine signifikante Wechselwirkung von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung nur in Experiment 4 beobachtet wurde.

Das Auftreten dieser signifikanten Wechselwirkung in Experiment 4 lässt die Folgerung zu, dass Vorinformation über die Kraftanstiegszeit nicht nur Prozesse der Reaktionsauswahl (Goodman & Kelso, 1980) beschleunigt, sondern auch zur motorischen Vorbereitung (Rosenbaum, 1980, 1983) der Reaktionen genutzt werden kann.

Unterscheidung von vormotorischen und motorischen Prozessen anhand des LRP

Die Ergebnisse des Experiments 4 auf der Ebene des LRP lieferten keine eindeutige Evidenz darüber, wo der Reaktionszeitvorteil von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit zeitlich lokalisiert ist. Möglicherweise war das LRP nicht sensitiv genug, um diesen Effekt genauer anzeigen zu können.

Es scheint aufgrund der Ergebnisse jedoch auszuschließen zu sein, dass der Reaktionszeitvorteil von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit innerhalb später motorischer Prozesse lokalisiert ist, da die Länge des LRP-R-Intervalls auch numerisch nicht von der Kraftanstiegszeit der Reaktionen abhing. Wenngleich auch kein signifikanter Effekt auf der Ebene der SLRP-Latenz beobachtet wurde, war das S-LRP-Intervall in der Kraftanstiegszeitbedingung TTP100 numerisch kürzer

als in der Bedingung TTP200. Interessant war hierbei vor allem, dass der Effekt der Kraftanstiegszeitbedingung zumindest numerisch durch den Faktor Vorinformation beeinflusst wurde. Nur wenn keine Vorinformation über die Kraftanstiegszeit gegeben wurde, war das S-LRP-Intervall in der Bedingung TTP100 kürzer als in der Bedingung TTP200.

Diese numerische Wechselwirkung auf der Ebene der SLRP-Latenz darf natürlich – auch in Hinblick auf den nicht-signifikanten Haupteffekt der Kraftanstiegszeitbedingung – nur mit Vorsicht interpretiert werden. Sie kann jedoch zumindest als ein Hinweis darauf gewertet werden, dass das S-LRP-Intervall nicht nur den Verlauf vormotorischer Prozesse, sondern auch den Verlauf früher Prozesse der motorischen Programmierung reflektiert. Dies könnte auch die, auf den ersten Blick paradox erscheinenden, Befunde erklären, warum Vorinformation über bestimmte Reaktionseigenschaften, wie die Reaktionskraft (Müller-Gethmann et al., 2000) oder die Kraftanstiegszeit (Experiment 4), nur einen Einfluss auf die SLRP-Latenz, aber Vorinformation über die Bewegungsrichtung (auch) einen Einfluss auf die RLRP-Latenz hat (Leuthold et al., 1996; Müller-Gethmann et al., 2000).

Möglicherweise werden einige Reaktionseigenschaften relativ früh im motorischen Programm spezifiziert, während andere Reaktionseigenschaften erst zu einem späteren Zeitpunkt spezifiziert werden. Ob die zugrunde liegenden Parameter aller gliedmaßen-unspezifischen Reaktionseigenschaften eher zu einem frühen Zeitpunkt, und die zugrunde liegenden Parameter aller gliedmaßen-spezifischen Reaktionseigenschaften eher zu einem späten Zeitpunkt im motorischen Programm spezifiziert werden, wie von einigen Autoren (Miller et al., 1996; Müller-Gethmann et al., 2000; Ulrich et al., 1998) vermutet wird, kann anhand der vorliegenden Arbeit nicht beantwortet werden.

Bisher wurde nur diskutiert, dass die SLRP-Latenz möglicherweise nicht nur die Dauer vormotorischer Prozesse reflektiert. Obwohl keine Effekte auf der Ebene der RLRP-Latenz in Experiment 4 beobachtet wurden, soll an dieser Stelle angemerkt werden, dass auch die Interpretation dieses Maßes problematisch ist. So gibt es Hinweise dafür, dass neben motorischen Prozessen auch Prozesse der Reaktionsauswahl einen Einfluss auf die RLRP-Latenz haben können (Miller & Ulrich, 1998).

Die ursprüngliche Unterteilung in vormotorische Prozesse, für deren Dauer die SLRP-Latenz ein sensitives Maß sein soll, und motorische Pro-

zesse, für deren Dauer die RLRP-Latenz ein sensibles Maß sein soll, beruht auf seriellen Stufenmodellen (Sternberg, 1969; vgl. Sanders, 1980) der Informationsverarbeitung. Nach diesen Stufenmodellen kann beispielsweise die Reaktionsauswahl erst dann beginnen, wenn die Reizidentifikation vollständig abgeschlossen ist. Entsprechend kann die Reaktion erst dann aktiviert werden, wenn die Reaktionsauswahl vollständig abgeschlossen ist.

Vertreter von *partial output*-Modellen (z.B. Eriksen & Schultz, 1979; McClelland, 1979) zweifeln an, dass klar voneinander abgegrenzte Stufen innerhalb der Informationsverarbeitung bestehen. Nach diesen Modellen beginnen z.B. die Auswahl und die Aktivierung einer Reaktion noch vor dem Zeitpunkt, an dem die Reizidentifikation abgeschlossen ist. Schon während der Reizidentifikation werden an „spätere“ Prozesse Informationen darüber weitergegeben, welche der möglichen Reaktionen am wahrscheinlichsten erforderlich ist. Mittlerweile gibt es – gerade aus Studien zur Reaktionsvorbereitung – viele Hinweise dafür, dass die Informationsverarbeitung nicht in streng abgegrenzten, seriell angeordneten Stufen erfolgt (z.B. Miller & Hackley, 1992; Miller & Navon, 2002; Miller & Schröter, 2002; Osman, Bashore, Coles, Donchin & Meyer, 1992; Smid, Böcker, van Touw, Mulder & Brunia, 1996).

Falls *partial output*-Modelle gegenüber seriellen Stufenmodellen eine angemessenere Abbildung der menschlichen Informationsverarbeitung bilden sollten und die Aktivierung der Reaktion beginnt, bevor die Reaktionsauswahl abgeschlossen ist, muss bezweifelt werden, dass das LRP-R-Intervall nur den Verlauf motorischer Prozesse abbildet. Die Evidenz für den Einfluss von Prozessen der motorischen Programmierung auf die SLRP-Latenz und Hinweise auf einen Einfluss der Reaktionsauswahl auf die RLRP-Latenz legen nahe, dass eine eindeutige Unterscheidung von vormotorischen und motorischen Prozessen anhand des LRP nicht möglich ist.

P300 und CNV

Wenngleich in der vorliegenden Arbeit keine zentralen Hypothesen über einen Einfluss der Faktoren auf die P300 und die CNV bestanden, wurden nachfolgend die Ergebnisse auf der Ebene dieser Maße kurz diskutiert. Zudem wurde eine Erweiterung der Experimente vor-

geschlagen, die eine genauere Untersuchung der Frage ermöglichen könnten, welche Prozesse der Informationsverarbeitung diese Maße abbilden.

Die in Experiment 4 aufgetretene kürzere P300-Latenz in Durchgängen mit Vorinformation als in Durchgängen ohne Vorinformation ist schwierig mit der Annahme zu vereinbaren, dass die P300-Latenz nur durch die Dauer von Prozessen der Reizidentifikation beeinflusst wird (Kutas et al., 1977; Magliero et al., 1984; McCarthy & Donchin, 1981). Allerdings weisen einige Studien darauf hin, dass die P300-Latenz auch durch Prozesse der Reaktionsauswahl beeinflusst wird, was dieses Ergebnis erklären könnte. So gibt es Befunde, dass eine hohe Reiz-Reaktions-Kompatibilität (Leuthold & Sommer, 1998) bzw. eine geringe Anzahl von Reaktionsalternativen (Falkenstein et al., 1994) zu einem vergleichsweise frühen Auftreten der P300 führen.

Mit einer Erweiterung des Experiments 4 durch zusätzliche Vorinformationsbedingungen (Vorinformation über die Reaktionshand, volle Vorinformation) ließe sich überprüfen, ob die Anzahl der Reaktionsalternativen einen Einfluss auf die P300-Latenz hat. Sollte dies tatsächlich der Fall sein, ist zu erwarten, dass die P300 in Durchgängen mit voller Vorinformation besonders früh auftritt, da der Hinweisreiz die geforderte Reaktion eindeutig spezifiziert. In Durchgängen ohne Vorinformation sollte die P300 besonders spät auftreten, da durch den Hinweisreiz keine der Reaktionsalternativen ausgeschlossen wird. In Durchgängen mit alleiniger Vorinformation über die Kraftanstiegszeit bzw. die Reaktionshand sollten mittlere P300-Latenzen auftreten. In diesem Fall reduziert der Hinweisreiz die Anzahl der Reaktionsalternativen, ohne jedoch die erforderliche Reaktion genau zu spezifizieren.

Die in Experiment 4 beobachtete höhere CNV-Amplitude in Durchgängen mit Vorinformation als in Durchgängen ohne Vorinformation replizierte Befunde von Ulrich et al. (1998). Allerdings kann aufgrund des Experiments 4 nicht gesagt werden, ob die Höhe der CNV-Amplitude grundsätzlich mit zunehmender Vorinformation über die erforderliche Reaktion zunimmt und sich somit analog zur Verkürzung der Reaktionszeit verhält, da nur zwei Vorinformationsbedingungen getestet wurden. Mit einer Erweiterung des Experiments 4 durch zusätzliche Vorinformationsbedingungen könnte dies überprüft werden. In Durchgängen mit voller Vorinformation sollte nach dieser Annahme die CNV

am stärksten und in Durchgängen ohne Vorinformation am schwächsten ausgeprägt sein.

Interessant ist diese Frage insbesondere deshalb, da die CNV und die LRP-Amplitude möglicherweise dissoziierbare Indikatoren für motorische Vorbereitung darstellen. So gibt es Hinweise darauf, dass die LRP-Amplitude nur in Durchgängen mit voller Vorinformation höher ist als in Durchgängen ohne bzw. mit partieller Vorinformation (Leuthold et al., 1996; Ulrich et al., 1998). In Durchgängen mit partieller Vorinformation scheint die LRP-Amplitude im Gegensatz zur CNV hingegen nicht höher als in Durchgängen ohne Vorinformation zu sein (Ulrich et al., 1998).

Ulrich et al. (1998) vermuteten, dass der Prozess der motorischen Vorbereitung in zwei Phasen unterteilt werden kann (vgl. auch Band & Miller, 1997; Miller et al., 1996). In der ersten, zentralen Phase („*assembling*“) erfolgt eine parallele Programmierung der Reaktionsparameter. In dieser Phase, die durch die CNV-Amplitude reflektiert wird, scheinen vor allem die Prozesse lokalisiert zu sein, die die Verkürzung der Reaktionszeit bewirken. In der zweiten, peripheren Phase („*implementation*“) wird das motorische Programm umgesetzt. Prozesse dieser zweiten Phase, deren Beginn durch das LRP angezeigt wird, können anscheinend nur dann von Vorinformation profitieren, wenn zuvor die zentralen Prozesse alle notwendigen Reaktionsparameter in einen einzelnen Code übersetzt haben.

Die Ergebnisse des Experiments 4 auf der Ebene der LRP-Amplitude sind konsistent mit dieser Annahme. So erhöhte partielle Vorinformation (Vorinformation über die Kraftanstiegszeit) nur die CNV-Amplitude, aber nicht die RLRP-Amplitude. Die Erweiterung des Experiments durch zusätzliche Vorinformationsbedingungen würde die Überprüfung ermöglichen, ob auch in dieser Aufgabe eine höhere LRP-Amplitude auftritt, wenn der Hinweisreiz neben der Kraftanstiegszeit auch die Reaktionshand spezifiziert.

Evidenz gegen einen Einfluss von Kraftanstiegsrate und Reaktionsdauer auf die Programmierungsdauer der Kraftimpulse

Die Ergebnisse der Experimente 2 und 3 bestätigten die Hypothese, dass der Reaktionszeitvorteil von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegs-

zeit nicht durch die höhere Kraftanstiegsrate dieser Reaktionen erklärt werden kann. Die Reaktionszeiten von Reaktionen mit unterschiedlicher, aber nicht-minimaler Kraftanstiegszeit waren nahezu identisch, obwohl diese Reaktionen unterschiedliche Kraftanstiegsraten aufwiesen.

Der Reaktionszeitvorteil von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit in den Experimenten von van Boxtel et al. (1993) bzw. Carlton et al. (1987), der von diesen Autoren als Evidenz für den Einfluss der Kraftanstiegsrate auf die Reaktionszeit bewertet wurde, lässt sich somit besser durch einen Programmierungsvorteil für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit erklären.

Außerdem widerspricht das Ergebnis, dass keine Reaktionszeitunterschiede für Reaktionen mit nicht-minimaler, aber unterschiedlicher Kraftanstiegszeit beobachtet wurden (Experimente 2 und 3) Theorien, die einen positiven Zusammenhang von Reaktionsdauer und Reaktionszeit postulieren (z.B. Klapp, 1995; Klapp et al., 1978; Vidal et al., 1996).

Die durch die Ergebnisse der durchgeführten Experimente bestätigte Annahme, dass die Kraftanstiegszeit und nicht die Kraftanstiegsrate bzw. die Reaktionsdauer einen Einfluss auf die Reaktionszeit der Kraftimpulse hat, ist zudem einfacher mit dem ursprünglichen Modell der Parameterspezifizierung (Rosenbaum, 1980, 1983) vereinbar, da sie den Reaktionszeitvorteil von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit durch eine geringere Anzahl zu spezifizierender Parameter erklären kann. Die zusätzliche Annahme, dass die Spezifizierungszeiten für unterschiedliche Werte eines Parameters nicht einheitlich sind, muss somit nicht gemacht werden.

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit darf jedoch nicht gefolgert werden, dass die in der Literatur berichteten *dit-dah*-Effekte grundsätzlich auf eine besonders schnelle Programmierung von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit zurückzuführen sind. So werden *dit-dah*-Effekte auch für Reaktionen berichtet, bei denen die Dauer der *dit*-Reaktionen nahe liegt, dass die Kraftanstiegszeit dieser Reaktionen weit über dem minimalen Wert liegt (z.B. Vidal et al., 1991, 1996). Auch tritt der *dit-dah*-Effekt nicht nur bei isometrischen Flexionen des Fingers, sondern auch bei Bewegungen (z.B. Klapp & Rodriguez, 1982) und verbalen Antworten (z.B. Klapp, 1974) auf.

Allerdings lassen die Ergebnisse der durchgeführten Experimente die Vermutung zu, dass manche der in der Literatur berichteten *dit-dah*-Effekte in Wahlreaktionsaufgaben möglicherweise auch durch einen Programmierungsvorteil von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit erklärbar sind bzw. durch diesen verstärkt wurden. Dies könnte immer dann der Fall gewesen sein, wenn die *dit*-Reaktionen eine sehr kurze Reaktionsdauer und somit vermutlich auch sehr kurze Kraftanstiegszeiten aufwiesen.

So beruht der in der Studie von Klapp (1995, 3. Experiment) aufgetretene *dit-dah*-Effekt von 20 ms auf einem Vergleich der Reaktionszeiten für Wahlreaktionen mit einer ungefähren Reaktionsdauer von 150 ms (*dit*) bzw. einer Reaktionsdauer von 450 ms (*dah*). Auch in der Studie von Klapp et al. (1978) wurde ein vergleichbarer Befund berichtet. In diesem Experiment mussten die Versuchspersonen Wahlreaktionen mit kurzer (150 ms), mittlerer (300 ms) und langer Reaktionsdauer (600 ms) durchführen. Die beobachteten Reaktionszeiten für Reaktionen mit kurzer (335 ms) mittlerer (394 ms) und langer Reaktionsdauer (413 ms) zeigen, dass Reaktionen mit kurzer Reaktionsdauer einen besonders großen Reaktionszeitvorteil gegenüber Reaktionen mit längerer Reaktionsdauer hatten, wengleich auch ein signifikanter Reaktionszeitunterschied zwischen Reaktionen mit mittlerer und langer Reaktionsdauer auftrat.

Ebenso berichten Klapp und Erwin (1976) einen besonders großen *dit-dah*-Effekt (durchschnittlich 90 ms), wenn *dit*-Reaktionen eine Reaktionsdauer von 150 ms und *dah*-Reaktionen eine Reaktionsdauer von 300 ms (Experiment 3a) bzw. 600 ms aufwiesen (Experiment 3d). Betrug die Reaktionsdauer der *dit*-Reaktionen hingegen 300 ms und die Reaktionsdauer der *dah*-Reaktionen 600 ms (Experiment 3b) trat ein kleinerer *dit-dah*-Effekt auf (60 ms). Der Reaktionszeitunterschied von 29 ms zwischen Reaktionen mit einer Reaktionsdauer von 600 ms und einer Reaktionsdauer von 1200 ms (Experiment 3c), verfehlte hingegen statistische Signifikanz.

Leider wurden in den Experimenten von Klapp (1995), Klapp und Erwin (1976) sowie Klapp et al. (1978) keine Kraftkurven aufgezeichnet und die Reaktionen erfolgten als einfacher Tastendruck. Welche genauen Kraftanstiegszeiten, Kraftamplituden und Impulsdauern die den Reaktionen zugrunde liegenden Kraftimpulse aufwiesen und wie sich die einzelnen Parameter der Kraftimpulse bei *dit*- bzw. *dah*-Reaktionen un-

terschieden, kann somit nicht gesagt werden. Zudem unterschieden sich die Aufgabenanforderungen in diesen Studien von denen der in dieser Arbeit durchgeführten Experimente. So ist die erforderliche Reaktionshand bei *dit-dah*-Experimenten zumeist festgelegt, während die Reaktionshand in allen Experimenten dieser Arbeit erst durch das Reaktionssignal spezifiziert wurde. Dieser Unterschied ist vor allem deswegen interessant, da er möglicherweise eine Ursache dafür sein könnte, dass in den Experimenten 1, 2 und 4 auch in Durchgängen mit Vorinformation über die Kraftanstiegszeit ein signifikanter Reaktionszeitvorteil für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit beobachtet wurde. Hingegen tritt in *dit-dah*-Experimenten üblicherweise kein Reaktionszeitvorteil für Reaktionen mit kürzerer Reaktionsdauer auf, wenn die erforderliche Reaktionsdauer schon vor dem Reaktionssignal bekannt ist (z.B. Klapp, 1995; Klapp et al., 1974).

Möglicherweise lassen sich die dem Kraftimpuls zugrunde liegenden Parameter innerhalb des motorischen Programms erst dann vollständig spezifizieren, wenn alle für die Reaktion notwendigen Parameter – also auch der Parameter für die Reaktionshand – bekannt sind. Dies würde gegen eine abstrakte, muskel-unspezifische Programmierung der Kraftimpulse sprechen. Nach dieser Hypothese sollte somit bei Vorinformation über die Kraftanstiegszeit und die Reaktionshand kein Unterschied zwischen Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit und Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit auftreten.

Die Erweiterung der in dieser Arbeit durchgeführten Experimente durch zusätzliche Kraftanstiegszeitbedingungen (Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit) und zusätzliche Vorinformationsbedingungen (Vorinformation über die Reaktionshand, volle Vorinformation) ist geplant. Dies könnte helfen, die Ursachen für die teilweise widersprüchlichen Ergebnisse der vorliegenden Experimente einerseits und einiger Studien zum *dit-dah*-Effekt andererseits, aufzuklären. Die Erfassung der Kraftkurven bietet dabei den großen Vorteil, die kinetischen Eigenschaften der Reaktionen kontrollieren zu können.

Reaktionseigenschaften und Reaktionsparameter

In der Literatur zur motorischen Programmierung und Reaktionsvorbereitung wird einer Reaktionseigenschaft, wenn diese einen Einfluss auf

die Reaktionszeit zu haben scheint, häufig der Status eines Reaktionsparameters zugeschrieben. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen jedoch, dass dieses problematisch ist (vgl. auch Falkenberg & Newell, 1980), da nicht die Eigenschaften des Kraftimpulses *per se* die Parameter des zugrunde liegenden motorischen Programms bilden.

Am Beispiel isometrischer Kraftimpulse lässt sich diese Problematik gut aufzeigen. Betrachtet man einen einzelnen Kraftimpuls, würde man dessen Eigenschaften auf der Ebene der Kraft und der Zeit am ehesten mit der Kraftamplitude und der Impulsdauer beschreiben. Als Parameter des Kraftimpulses können hingegen neben der Kraftamplitude und der Impulsdauer auch die Kraftanstiegszeit und die Kraftanstiegsrate angegeben werden, wobei einige dieser Parameter nicht unabhängig voneinander sind. Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente legen jedoch nahe, dass weder bestimmte „Werte“ für bestimmte Reaktionseigenschaften, noch bestimmte „Werte“ für bestimmte Parameter des Kraftimpulses direkt im motorischen Programm spezifiziert werden. Vielmehr bilden nach PFUM (Ulrich & Wing, 1991, 1993) die Anzahl zu rekrutierender Kraftereinheiten und deren Aktivierungsdauer die (Reaktions-)Parameter des motorischen Programms. Die Spezifizierung dieser Reaktionsparameter bestimmt somit die Parameter und die Eigenschaften des Kraftimpulses.

Die von PFUM postulierten Parameter sind natürlich nur hypothetisch, da diese nicht direkt beobachtbar sind und PFUM keine Auskunft darüber gibt, wie einzelne Werte dieser Parameter letztendlich in eine Aktivierung von motorischen Einheiten eines Muskels umgesetzt werden. Allerdings wird deutlich, dass die Frage, welche Reaktionseigenschaften einen Einfluss auf die Reaktionszeit haben und somit Parameter des motorischen Programms darstellen könnten, wahrscheinlich falsch gestellt ist. Vielmehr sollte die Frage lauten, wie bestimmte Eigenschaften einer Reaktion gewährleistet bzw. kontrolliert werden. Erst in einem weiteren Schritt sollte dann überprüft werden, inwieweit die Kontrolle der Reaktionseigenschaften Auswirkungen auf die Programmierung der Reaktion hat.

Schlussfolgerung

Die Befunde dieser Arbeit lassen den Schluss zu, dass sich die Programmierung von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit von der Programmierung von Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit unterscheidet. Die Ergebnisse sind konsistent mit der Annahme von PFUM (Ulrich & Wing, 1991, 1993), dass die Kontrolle von Kraftimpulsen durch zumindest zwei unterschiedliche Parameter, nämlich der Anzahl zu rekrutierender Krafteinheiten und deren Aktivierungsdauer, gewährleistet wird. Die Programmierung von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit ist nach PFUM schneller abgeschlossen, da in diesem Fall nur die Anzahl zu rekrutierender Krafteinheiten spezifiziert werden muss. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind hingegen nicht mit Theorien vereinbar, die annehmen, dass die Kraftanstiegsrate (z.B. Carlton et al., 1987; van Boxtel et al., 1993) oder die Reaktionsdauer (z.B. Klapp, 1995; Klapp et al., 1978; Vidal et al., 1996) genuine Parameter des motorischen Programms für Kraftimpulse bilden.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersuchte, ob die Programmierung von isometrischen Kraftimpulsen mit minimaler Kraftanstiegszeit schneller abgeschlossen ist als die Programmierung von Kraftimpulsen mit längerer Kraftanstiegszeit. In den vier Experimenten mussten die Versuchspersonen isometrische Flexionen des linken oder rechten Zeigefingers durchführen. Das Reaktionssignal spezifizierte mit welcher Kraftanstiegszeit und mit welcher Hand die Versuchspersonen reagieren sollten. In der Hälfte der Durchgänge wurde den Versuchspersonen ein informativer Hinweisreiz dargeboten, der die erforderliche Kraftanstiegszeit der nachfolgenden Reaktion ankündigte. Die Experimente 1, 2 und 4 ergaben, dass die Reaktionszeiten für Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit kürzer sind als die Reaktionszeiten für Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit. Die Ergebnisse der Experimente 2 und 3 legen zudem nahe, dass sich die Reaktionszeiten von Reaktionen mit unterschiedlicher, aber nicht-minimaler Kraftanstiegszeit nicht voneinander unterscheiden. Alle Experimente ergaben zudem, dass sich die Reaktionszeiten verkürzen, wenn die Kraftanstiegszeit durch den Hinweisreiz vor dem Reaktionssignal angekündigt wird. Die Experimente 1 und 4 legen nahe, dass Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit stärker von dieser Vorinformation profitieren als Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit.

Diese Ergebnisse unterstützen die Vermutung, dass die Programmierung von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit schneller abgeschlossen ist als die Programmierung von Reaktionen mit längerer Kraftanstiegszeit. Die Ursache für diesen Unterschied könnte darin liegen, dass bei Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit ein Reaktionsparameter weniger spezifiziert werden muss und der Abgleich mit anderen Reaktionsparametern entfällt. Die Ergebnisse legen zudem nahe, dass die Kraftanstiegsrate und die Reaktionsdauer keine genuinen Reaktionsparameter darstellen. Außerdem unterstützen die Ergebnisse die Vermutung, dass Vorinformation über die Kraftanstiegszeit zur Vorbereitung der Reaktionen genutzt werden kann.

Die Ergebnisse des Experiments 4, in dem neben Verhaltensmaßen auch das Lateralisierte Bereitschaftspotential erfasst wurde, legen nahe, dass weder der Reaktionszeitvorteil von Reaktionen mit minimaler Kraftanstiegszeit noch der Reaktionszeitvorteil durch Vorinformation über die Kraftanstiegszeit auf späten motorischen Stufen der Informationsverarbeitung lokalisiert ist. Die Ergebnisse lassen zudem vermuten, dass anhand des Lateralisierten Bereitschaftspotentials nicht eindeutig zwischen vor-motorischen und motorischen Prozessen der Informationsverarbeitung unterschieden werden kann.

Literaturverzeichnis

- Abrams, R. A., Meyer, D. E., & Kornblum, S. (1989). Speed and accuracy of saccadic eye movements: Characteristics of impulse variability in the oculomotor system. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *15*, 529-543.
- Anson, J. G. (1982). Memory drum theory: Alternative tests and explanations for the complexity effects on simple reaction time. *Journal of Motor Behavior*, *14*, 228-246.
- Anson, J. G., Hyland, B. I., Kötter, R., & Wickens, J. R. (2000). Parameter precuing and motor preparation. *Motor Control*, *4*, 221-231.
- Band, G.-P. H., & Miller, J. (1997). Mental rotation interferes with response preparation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *23*, 319-388.
- Bonnet, M., Requin, J., & Stelmach, G. E. (1982). Specification of direction and extent in motor programming. *Bulletin of the Psychonomic Society*, *19*, 31-34.
- Brooks, V. B. (1979). Motor programs revisited. In R. E. Talbot & D. R. Humphrey (Hrsg.), *Posture and movement* (S. 13-49). New York: Raven Press.
- Cacioppo, J. T., & Dorfman, D. D. (1987). Waveform moment analysis in psychophysiological research. *Psychological Bulletin*, *102*, 421-438.
- Carlton, L. G., Carlton, M. J., & Newell, K. M. (1987). Reaction time and response dynamics. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology*, *39A*, 337-360.

- Carlton, L. G., & Newell, K. M. (1987). Response production factors and reaction time. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 25, 373-376.
- Carlton, L. G., & Newell, K. M. (1993). Force variability and characteristics of force production. In K. M. Newell & D. M. Corcos (Hrsg.), *Variability and motor control* (S. 15-36). Champaign, IL: Human Kinetics.
- De Jong, R., Wierda, M., Mulder, G., & Mulder, L.-J. (1988). Use of partial stimulus information in response processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14, 682-692.
- Delabarre, E. B., Logan, R. R., & Reed, A. Z. (1897). Studies from the Harvard Psychological Laboratory IX: The force and rapidity of reaction movements. *Psychological Review*, 4, 615-631.
- Duncan-Johnson, C. C., & Donchin, E. (1982). The P300 component of the event-related brain potential as an index of information processing. *Biological Psychology*, 14, 1-52.
- Eimer, M. (1995). Stimulus response compatibility and automatic response activation: Evidence from psychophysiological studies. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 837-854.
- Elbert, T., Lutzenberger, W., Rockstroh, B., & Birbaumer, N. (1985). Removal of ocular artifacts from the EEG - a biophysical approach to the EOG. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 60, 455-463.
- Eriksen, C. W., & Schultz, D. W. (1979). Information processing in visual search: a continuous flow conception and experimental results. *Perception & Psychophysics*, 25, 249-263.
- Falkenberg, L. E., & Newell, K. M. (1980). Relative contribution of movement time, amplitude, and velocity to response initiation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 6, 760-768.

-
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., & Hoormann, J. (1994). Effects of choice complexity on different subcomponents of the late positive complex of the event-related potential. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology: Evoked Potentials*, 92, 148-160.
- Freund, H. J., & Büdingen, H. J. (1978). The relationship between speed and amplitude of the fastest voluntary contractions of human arm muscles. *Experimental Brain Research*, 31, 1-12.
- Frith, C. D., & Done, D. J. (1986). Routes to action in reaction time tasks. *Psychological Research*, 48, 169-177.
- Ghez, C. (1991). The control of movement. In E. R. Kandel, J. H. Schwarz & T. M. Jessel (Hrsg.), *Principles of neural science*, 3rd ed. (S. 533-547). Norwalk, Conn.: Appleton & Lange.
- Ghez, C., & Gordon, J. (1987). Trajectory control in targeted force impulses. I. Role of opposing muscles. *Experimental Brain Research*, 67, 225-240.
- Glencross, D. J. (1972). Latency and response complexity. *Journal of Motor Behavior*, 4, 251-256.
- Glencross, D. J. (1973). Response complexity and the latency of different movement patterns. *Journal of Motor Behavior*, 5, 95-104.
- Goodman, D., & Kelso, J. S. (1980). Are movements prepared in parts? Not under compatible (naturalized) conditions. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109, 475-495.
- Gordon, J., & Ghez, C. (1987). Trajectory control in targeted force impulses: II. Pulse height control. *Experimental Brain Research*, 67, 241-252.
- Gratton, G., Bosco, C. M., Kramer, A. F., Coles, M. G., Wickens, C. D., & Donchin, E. (1990). Event-related brain potentials as indices of information extraction and response priming. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 75, 419-432.

- Gratton, G., Coles, M. G., Sirevaag, E. J., Eriksen, C. W., & Donchin, E. (1988). Pre- and poststimulus activation of response channels: A psychophysiological analysis. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, 14, 331-344.
- Henry, F. M. (1980). Use of simple reaction time in motor programming studies: A reply to Klapp, Wyatt, and Lingo. *Journal of Motor Behavior*, 12, 163-168.
- Henry, F. M. (1981). The evolution of the memory drum theory of neuromotor reaction. In G. A. Brooks (Hrsg.), *Perspectives on the academic discipline of physical education* (S. 301-322). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Henry, F. M., & Rogers, D. E. (1960). Increased response latency for complicated movements and a "memory drum" theory of neuromotor reaction. *Research Quarterly of the American Association for Health, Physical Education, and Recreation*, 31, 448-458.
- Hick, W. E. (1952). On the rate of gain of information. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 4, 11-26.
- Huynh, H. (1978). Some approximate tests for repeated measurement designs. *Psychometrika*, 43, 161-175.
- Ivry, R. B. (1986). Force and timing components of the motor program. *Journal of Motor Behavior*, 18, 449-474.
- Jasper, H. H. (1958). The ten-twenty electrode system of the International Federation. *EEG Clinical Neurophysiology*, 10, 371-375.
- Johansson, R. S., & Westling, G. (1990). Tactile afferent signals in the control of precision grip. In M. Jeannerod (Hrsg.), *Attention and performance XIII: Motor representation and control* (S. 677-713). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, 70, 387-403.

-
- Keele, S. W. (1981). Behavioral analysis of movement. In V. B. Brooks (Hrsg.), *Handbook of physiology: Sec. 1. The nervous system: Vol. 2. Motor control* (S. 1391-1414). Bethesda, MD: American Physiological Society.
- Keele, S. W., Cohen, A., & Ivry, R. (1990). Motor programs: Concepts and issues. In M. Jeannerod (Hrsg.), *Attention and performance XIII: Motor representation and control* (S. 77-110). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Klapp, S. T. (1974). Syllable-dependent pronunciation latencies in number naming: A replication. *Journal of Experimental Psychology*, *102*, 1138-1140.
- Klapp, S. T. (1975). Feedback versus motor programming in the control of aimed movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *104*, 147-153.
- Klapp, S. T. (1977). Response programming, as assessed by reaction time, does not establish commands for particular muscles. *Journal of Motor Behavior*, *9*, 301-312.
- Klapp, S. T. (1995). Motor response programming during simple and choice reaction time: The role of practice. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *21*, 1015-1027.
- Klapp, S. T., & Erwin, C. I. (1976). Relation between programming time and duration of the response being programmed. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *2*, 591-598.
- Klapp, S. T., McRae, J., & Long, W. (1978). Response programming vs alternative interpretations of the "dit-dah" reaction time effect. *Bulletin of the Psychonomic Society*, *11*, 5-6.
- Klapp, S. T., & Rodriguez, G. (1982). Programming time as a function of response duration: A replication of "dit-dah" without possible guessing artifacts. *Journal of Motor Behavior*, *14*, 46-56.
- Klapp, S. T., Wyatt, E. P., & Lingo, W. M. (1974). Response programming in simple and choice reactions. *Journal of Motor Behavior*, *6*, 263-271.

- Kutas, M., McCarthy, G., & Donchin, E. (1977). Augmenting mental chronometry: the P300 as a measure of stimulus evaluation time. *Science*, *197*, 792-795.
- LaBerge, D., Van Gelder, P., & Yellott, J., Jr. (1970). A cueing technique in choice reaction time. *Perception & Psychophysics*, *7*, 57-62.
- Lépine, D., Glencross, D., & Requin, J. (1989). Some experimental evidence for and against a parametric conception of movement programming. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *15*, 347-362.
- Leuthold, H., & Sommer, W. (1998). Postperceptual effects and P300 latency. *Psychophysiology*, *35*, 34-46.
- Leuthold, H., Sommer, W., & Ulrich, R. (1996). Partial advance information and response preparation: Inferences from the lateralized readiness potential. *Journal of Experimental Psychology: General*, *125*, 307-323.
- Loveless, N. E., & Sanford, A. J. (1974). Slow potential correlates of preparatory set. *Biological Psychology*, *1*, 303-314.
- MacKay, W. A., & Bonnet, M. (1990). CNV, stretch reflex and reaction time correlates of preparation for movement direction and force. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *76*, 47-62.
- Magliero, A., Bashore, T. R., Coles, M. G., & Donchin, E. (1984). On the dependence of P300 latency on stimulus evaluation processes. *Psychophysiology*, *21*, 171-186.
- McCarthy, G., & Donchin, E. (1981). A metric for thought: A comparison of P300 latency and reaction time. *Science*, *211*, 77-80.
- McClelland, J. L. (1979). On the time relations of mental processes: An examination of systems of processes in cascade. *Psychological Review*, *86*, 287-330.
- Megaw, E. D. (1972). Direction and extent uncertainty in step-input tracking. *Journal of Motor Behavior*, *4*, 171-186.

-
- Meyer, D. E., Smith, J. E., & Wright, C. E. (1982). Models for the speed and accuracy of aimed movements. *Psychological Review*, 89, 449-482.
- Miller, J. (1982). Discrete versus continuous stage models of human information processing: In search of partial output. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8, 273-296.
- Miller, J., Coles, M.-G. H., & Chakraborty, S. (1996). Dissociation between behavioral and psychophysiological measures of response preparation. *Acta Psychologica*, 94, 189-208.
- Miller, J., & Hackley, S. A. (1992). Electrophysiological evidence for temporal overlap among contingent mental processes. *Journal of Experimental Psychology: General*, 121, 195-209.
- Miller, J., & Navon, D. (2002). Global precedence and response activation: Evidence from LRPs. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology*, 55A, 289-310.
- Miller, J., Patterson, T., & Ulrich, R. (1998). Jackknife-based method for measuring LRP onset latency differences. *Psychophysiology*, 35, 99-115.
- Miller, J., & Schröter, H. (2002). Online response preparation in a rapid serial visual search task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28, 1364-1390.
- Miller, J., & Ulrich, R. (1998). Locus of the effect of the number of alternative responses: Evidence from the lateralized readiness potential. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 1215-1231.
- Müller-Gethmann, H., Rinckenauer, G., Stahl, J., & Ulrich, R. (2000). Preparation of response force and movement direction: Onset effects on the lateralized readiness potential. *Psychophysiology*, 37, 507-514.

- Nagasaki, H., Aoki, F., & Nakamura, R. (1983). Premotor and motor reaction time as a function of force output. *Perceptual and Motor Skills*, 57, 859-867.
- Neubauer, M. (1996). Feinheiten bei wissenschaftlichen Publikationen - Mikrotypographie-Regeln, Teil I. *Die TEXnische Komödie*, 4, 23-40.
- Neubauer, M. (1997). Feinheiten bei wissenschaftlichen Publikationen - Mikrotypographie-Regeln, Teil II. *Die TEXnische Komödie*, 1, 25-44.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- Osman, A., Bashore, T. R., Coles, M. G., Donchin, E., & Meyer, D. E. (1992). On the transmission of partial information: Inferences from movement-related brain potentials. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 217-232.
- Osman, A., Lou, L., Müller-Gethmann, H., Rinkenauer, G., Mattes, S., & Ulrich, R. (2000). Mechanisms of speed-accuracy tradeoff: Evidence from covert motor processes. *Biological Psychology*, 51, 173-199.
- Osman, A., & Moore, C. M. (1993). The locus of dual-task interference: Psychological refractory effects on movement-related brain potentials. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, 1292-1312.
- Posner, M. I., & Snyder, C. R. R. (1975). Facilitation and inhibition in the processing of signals. In P. M. A. Rabbitt & S. Dornic (Hrsg.), *Attention and Performance* (S. 669-682). London: Academic Press.
- Ragot, R. (1984). Perceptual and motor space representation: An event-related potential study. *Psychophysiology*, 21, 159-170.
- Requin, J. (1985). Looking forward to moving soon: Ante factum selective processes in motor control. In M. I. Posner & O. S. M. Marin (Hrsg.), *Mechanisms of attention: Attention and performance XI* (S. 147-167). Hilldale, NJ: Erlbaum.

-
- Riehle, A., & Requin, J. (1995). Neuronal correlates of the specification of movement direction and force in four cortical areas of the monkey. *Behavioural Brain Research*, 70, 1-13.
- Rinkenauer, G. (2000). *Bimanuelle Koordination isometrischer Kontraktionen: Abhängigkeiten in Kraft und Zeit*. Aachen: Shaker.
- Rosenbaum, D. A. (1980). Human movement initiation: Specification of arm, direction, and extent. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109, 444-474.
- Rosenbaum, D. A. (1983). The movement precuing technique: Assumptions, applications and extensions. In R. A. Magill (Hrsg.), *Memory and control of action* (S. 231-274). Amsterdam: North-Holland.
- Rosenbaum, D. A. (1985). Motor Programming: A Review and Scheduling Theory. In H. Heuer, U. Kleinbeck & K.-H. Schmidt (Hrsg.), *Motor Behavior* (S. 1-33). Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag.
- Rosenbaum, D. A., & Kornblum, S. (1982). A priming method for investigating the selection of motor responses. *Acta Psychologica*, 51, 223-243.
- Sanders, A. F. (1980). Stage analysis of reaction processes. In G. E. Stelmach & J. Requin (Hrsg.), *Tutorials in motor behavior* (S. 331-354). Amsterdam: North-Holland.
- Schmidt, R. A. (1980). Past and future issues in motor programming. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 51, 122-140.
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (1999). *Motor control and learning: A behavioral emphasis (3rd ed.)*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schmidt, R. A., Zelaznik, H. N., Hawkins, B., Frank, J. S., & Quinn, J. T. (1979). Motor output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological Review*, 86, 415-451.
- Smid, H. G. O. M., Böcker, K. B. E., van Touw, D. A., Mulder, G., & Brunia, C. H. M. (1996). A psychophysiological investigation of the

- selection and the use of partial stimulus information in response choice. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22, 3-24.
- Smulders, F. T. Y., Kok, A., Kenemans, J. L., & Bashore, T. R. (1995). The temporal selectivity of additive factor effects on the reaction process revealed in ERP component latencies. *Acta Psychologica*, 90, 97-109.
- Sommer, W., Leuthold, H., & Ulrich, R. (1994). The lateralized readiness potential preceding brief isometric force pulses of different peak force and rate of force production. *Psychophysiology*, 31, 503-512.
- Squires, K. C., Wickens, C., Squires, N. K., & Donchin, E. (1976). The effect of stimulus sequence on the waveform of the cortical event-related potential. *Science*, 193, 1142-1146.
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. *Acta Psychologica*, 30, 276-315.
- Sugg, M. J., & Polich, J. (1995). P300 from auditory stimuli: Intensity and frequency effects. *Biological Psychology*, 41, 255-269.
- Ulrich, R., Leuthold, H., & Sommer, W. (1998). Motor programming of response force and movement direction. *Psychophysiology*, 35, 721-728.
- Ulrich, R., & Mattes, S. (1996). Does immediate arousal enhance response force in simple reaction time? *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology*, 49A, 972-990.
- Ulrich, R., & Miller, J. (2001). Using the jackknife-based scoring method for measuring LRP onset effects in factorial designs. *Psychophysiology*, 38, 816-827.
- Ulrich, R., Moore, C., & Osman, A. (1993). Lateralisiertes Bereitschaftspotential und Reaktionsgeschwindigkeit bei partieller Vorinformation eines Handlungsparameters. *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie*, 40, 310-325.

-
- Ulrich, R., & Wing, A. M. (1991). A recruitment theory of force-time relations in the production of brief force pulses: the parallel force unit model. *Psychological Review*, *98*, 268-294.
- Ulrich, R., & Wing, A. M. (1993). Variability of brief force impulses. In K. M. Newell & D. M. Corcos (Hrsg.), *Variability and motor control* (S. 37-51). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Ulrich, R., Wing, A. M., & Rinkenauer, G. (1995). Amplitude and duration scaling of brief isometric force pulses. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *21*, 1457-1472.
- van Boxtel, G. J. M., & Brunia, C. H. M. (1994). Motor and non-motor components of the contingent negative variation. *International Journal of Psychophysiology*, *17*, 269-279.
- van Boxtel, G. J., van den Boogaart, B., & Brunia, C. H. (1993). The contingent negative variation in a choice reaction time task. *Journal of Psychophysiology*, *7*, 11-23.
- Verleger, R. (1997). On the utility of P3 latency as an index of mental chronometry. *Psychophysiology*, *34*, 131-156.
- Verleger, R., Neukäter, W., Kömpf, D., & Vieregge, P. (1991). On the reasons for the delay of P3 latency in healthy elderly subjects. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *79*, 488-502.
- Vidal, F., Bonnet, M., & Macar, F. (1991). Programming response duration in a precueing reaction time paradigm. *Journal of Motor Behavior*, *23*, 226-234.
- Vidal, F., Macar, F., & Bonnet, M. (1996). The "short-long" reaction time effect in duration programming. *Journal of Motor Behavior*, *28*, 359-370.
- Walter, W. G., Cooper, R., Aldridge, V. J., McCallum, W. C., & Winter, A. L. (1964). Contingent negative variation: An electrical sign of sensorimotor association and expectancy in the human brain. *Nature*, *203*, 380-384.

- Wickelgren, W. A. (1977). Speed-accuracy tradeoff and information processing dynamics. *Acta Psychologica, 41*, 67-85.
- Wing, A. M., & Miller, E. (1984). Research note: Peak velocity timing invariance. *Psychological Research, 46*, 121-127.
- Winters, J. M., & Stark, L. (1987). Muscle models: What is gained and what is lost by varying model complexity. *Biological Cybernetics, 55*, 403-420.
- Woodworth, R. S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychological Monographs, 3*, 1-114.
- Woodworth, R. S. (1938). *Experimental psychology*. New York: Henry Holt.
- Zelaznik, H. N. (1981). The effects of force and direction uncertainty on choice reaction time in an isometric force production task. *Journal of Motor Behavior, 13*, 18-32.
- Zelaznik, H. N., Schmidt, R. A., & Gielen, S. C. (1986). Kinematic properties of rapid aimed hand movements. *Journal of Motor Behavior, 18*, 353-372.

Anhang

A Tabellarische Zusammenfassung der Verhaltensdaten

A.1 Experiment 1

Tabelle A.1: Anteil korrekter (optimaler und tolerierter) und falscher Reaktionen (unterteilt in Gesamtfehler und Fehlerarten) in den acht Versuchsbedingungen (in %).

Bedingung	Korrekt		Gesamtfehler	Hand	TTP	PF	Fehlerarten		
	Optimal	Toleriert					TTP+PF	$> RT_{max}$	$< RT_{min}$
<i>Mit Vorinformation</i>									
<u>linke Hand</u>									
TTP100	54.7	42.8	2.5	0.9	0.6	0.5	0.0	0.2	0.3
TTP200	48.6	48.0	3.4	2.2	0.2	0.9	0.0	0.2	0.0
<u>rechte Hand</u>									
TTP100	45.0	51.6	3.4	1.3	1.1	0.6	0.0	0.3	0.2
TTP200	57.2	40.5	2.3	1.3	0.3	0.5	0.0	0.2	0.2
<i>Ohne Vorinformation</i>									
<u>linke Hand</u>									
TTP100	47.7	47.0	5.3	1.3	3.0	0.2	0.0	0.9	0.0
TTP200	45.5	49.8	4.7	1.1	1.1	1.1	0.0	1.4	0.0
<u>rechte Hand</u>									
TTP100	47.5	47.7	4.8	0.9	2.0	1.3	0.0	0.6	0.0
TTP200	47.8	45.9	6.3	3.0	1.1	0.5	0.0	1.7	0.0

Anmerkung. TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude; RT: Reaktionszeit; $RT_{max}=1000$ ms; $RT_{min}=100$ ms. Abweichungen ergeben sich durch Rundung.

Tabelle A.2: Durchschnittliche Reaktionszeiten, Kraftanstiegszeiten und Standardabweichungen der Kraftanstiegszeit (alle in ms), sowie Kraftamplituden und Standardabweichungen der Kraftamplitude (alle in %MVF) der korrekten Reaktionen in den acht Versuchsbedingungen.

Bedingung	RT	TTP	SD (TTP)	PF	SD (PF)
<i>Mit Vorinformation</i>					
<u>linke Hand</u>					
TTP100	453	110	14.6	46.0	8.0
TTP200	479	194	37.4	52.0	7.5
<u>rechte Hand</u>					
TTP100	447	106	14.9	44.1	7.5
TTP200	488	191	32.9	51.5	7.1
<i>Ohne Vorinformation</i>					
<u>linke Hand</u>					
TTP100	559	111	15.5	46.2	7.9
TTP200	609	195	35.6	52.3	8.1
<u>rechte Hand</u>					
TTP100	559	108	15.4	44.7	7.6
TTP200	601	190	34.2	51.8	7.6

Anmerkung. RT: Reaktionszeit; TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude; SD: Standardabweichung.

A.2 Experiment 2

Tabelle A.3: Anteil korrekter (optimaler und tolerierter) und falscher Reaktionen (unterteilt in Gesamtfehler und Fehlerarten) in den zwölf Versuchsbedingungen (in %).

Bedingung	Korrekt		Gesamtfehler	Fehlerarten					
	Optimal	Toleriert		Hand	TTP	PF	TTP+PF	> RT _{max}	< RT _{min}
<i>Mit Vorinformation</i>									
<u>linke Hand</u>									
TTP100	45.8	51.9	2.3	0.2	1.0	0.4	0.0	0.4	0.2
TTP150	52.9	44.4	2.7	0.8	0.6	0.4	0.0	0.4	0.4
TTP200	46.9	48.3	4.8	1.0	0.6	2.7	0.0	0.4	0.0
<u>rechte Hand</u>									
TTP100	40.4	55.6	4.0	1.5	1.7	0.4	0.0	0.4	0.0
TTP150	49.0	48.3	2.7	0.8	1.0	0.0	0.0	0.8	0.0
TTP200	39.2	57.5	3.3	0.6	0.2	2.3	0.2	0.0	0.0
<i>Ohne Vorinformation</i>									
<u>linke Hand</u>									
TTP100	42.9	51.7	5.4	1.3	1.5	0.4	0.0	2.3	0.0
TTP150	50.6	42.1	7.3	0.8	2.1	0.2	0.0	4.2	0.0
TTP200	37.3	56.3	6.5	1.9	0.2	1.9	0.0	2.5	0.0
<u>rechte Hand</u>									
TTP100	45.8	47.3	6.9	2.3	2.7	0.6	0.0	1.3	0.0
TTP150	41.3	50.8	7.9	1.5	1.0	1.5	0.0	4.0	0.0
TTP200	33.5	60.8	5.6	0.6	0.4	2.5	0.0	2.1	0.0

Anmerkung. TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude; RT: Reaktionszeit; RT_{max}=1000 ms; RT_{min}=100 ms. Abweichungen ergeben sich durch Rundung.

A Tabellarische Zusammenfassung der Verhaltensdaten

Tabelle A.4: Durchschnittliche Reaktionszeiten, Kraftanstiegszeiten und Standardabweichungen der Kraftanstiegszeit (alle in ms), sowie Kraftamplituden und Standardabweichungen der Kraftamplitude (alle in %MVF) der korrekten Reaktionen in den acht Versuchsbedingungen.

Bedingung	RT	TTP	SD (TTP)	PF	SD (PF)
<i>Mit Vorinformation</i>					
<u>linke Hand</u>					
TTP100	463	108	14.7	42.2	8.2
TTP150	496	153	25.0	47.7	8.4
TTP200	511	196	33.8	54.5	8.9
<u>rechte Hand</u>					
TTP100	475	106	14.9	44.0	8.5
TTP150	517	158	27.2	50.3	8.3
TTP200	507	195	33.4	55.2	9.1
<i>Ohne Vorinformation</i>					
<u>linke Hand</u>					
TTP100	597	112	15.4	43.0	8.5
TTP150	643	154	27.6	47.6	8.5
TTP200	639	198	33.5	54.6	8.5
<u>rechte Hand</u>					
TTP100	610	108	15.4	45.1	8.4
TTP150	646	159	29.7	51.3	8.0
TTP200	628	194	35.5	55.6	8.8

Anmerkung. RT: Reaktionszeit; TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude; SD: Standardabweichung.

A.3 Experiment 3

Tabelle A.5: Anteil korrekter (optimaler und tolerierter) und falscher Reaktionen (unterteilt in Gesamtfehler und Fehlerarten) in den acht Versuchsbedingungen (in %).

Bedingung	Korrekt		Gesamtfehler	Fehlerarten					
	Optimal	Toleriert		Hand	TTP	PF	TTP+PF	> RT _{max}	< RT _{min}
<i>Mit Vorinformation</i>									
<u>linke Hand</u>									
TTP150	44.0	53.3	2.7	1.5	0.8	0.4	0.0	0.0	0.0
TTP200	46.0	49.0	5.0	2.3	2.1	0.2	0.0	0.2	0.2
<u>rechte Hand</u>									
TTP150	49.0	48.8	2.3	1.5	0.0	0.6	0.0	0.2	0.0
TTP200	51.7	43.5	4.8	2.3	1.0	1.0	0.0	0.2	0.2
<i>Ohne Vorinformation</i>									
<u>linke Hand</u>									
TTP150	43.5	50.4	6.0	1.5	1.9	1.3	0.0	1.5	0.0
TTP200	42.7	50.2	7.1	2.7	2.9	0.8	0.0	0.6	0.0
<u>rechte Hand</u>									
TTP150	45.8	50.0	4.2	1.9	1.3	0.2	0.0	0.8	0.0
TTP200	47.3	43.8	9.0	4.6	1.3	1.0	0.0	2.1	0.0

Anmerkung. TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude; RT: Reaktionszeit; RT_{max}=1000 ms; RT_{min}=100 ms. Abweichungen ergeben sich durch Rundung.

Tabelle A.6: Durchschnittliche Reaktionszeiten, Kraftanstiegszeiten und Standardabweichungen der Kraftanstiegszeit (alle in ms), sowie Kraftamplituden und Standardabweichungen der Kraftamplitude (alle in %MVF) der korrekten Reaktionen in den acht Versuchsbedingungen.

Bedingung	RT	TTP	SD (TTP)	PF	SD (PF)
<i>Mit Vorinformation</i>					
<u>linke Hand</u>					
TTP150	436	135	24.4	45.4	8.2
TTP200	428	198	36.8	51.9	8.0
<u>rechte Hand</u>					
TTP150	441	137	25.1	44.7	7.9
TTP200	448	196	34.3	51.2	7.9
<i>Ohne Vorinformation</i>					
<u>linke Hand</u>					
TTP150	555	137	23.4	45.4	7.7
TTP200	555	196	41.2	52.3	7.8
<u>rechte Hand</u>					
TTP150	580	145	27.6	45.2	7.6
TTP200	587	195	37.7	52.1	8.5

Anmerkung. RT: Reaktionszeit; TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude; SD: Standardabweichung.

A.4 Experiment 4

Tabelle A.7: Anteil korrekter (optimaler und tolerierter) und falscher Reaktionen (unterteilt in Gesamtfehler und Fehlerarten) in den acht Versuchsbedingungen (in %).

Bedingung	Korrekt		Gesamtfehler	Fehlerarten					
	Optimal	Toleriert		Hand	TTP	PF	TTP+PF	> RT _{max}	< RT _{min}
<i>Mit Vorinformation</i>									
<u>linke Hand</u>									
TTP100	41.5	54.7	3.8	1.1	1.8	0.8	0.1	0.0	0.0
TTP200	41.8	54.8	3.4	1.0	0.8	1.5	0.0	0.0	0.1
<u>rechte Hand</u>									
TTP100	40.8	55.3	3.8	1.7	1.1	0.9	0.0	0.0	0.1
TTP200	49.2	47.4	3.4	1.9	0.6	0.8	0.0	0.1	0.1
<i>Ohne Vorinformation</i>									
<u>linke Hand</u>									
TTP100	44.6	50.8	4.7	1.8	1.6	1.0	0.0	0.2	0.0
TTP200	41.9	53.2	4.9	1.9	0.8	1.3	0.0	0.8	0.0
<u>rechte Hand</u>									
TTP100	38.3	57.6	4.1	1.0	1.9	0.8	0.0	0.3	0.0
TTP200	46.5	48.9	4.7	2.5	0.8	1.0	0.0	0.3	0.0

Anmerkung. TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude; RT: Reaktionszeit; RT_{max}=1000 ms; RT_{min}=100 ms. Abweichungen ergeben sich durch Rundung.

A Tabellarische Zusammenfassung der Verhaltensdaten

Tabelle A.8: Durchschnittliche Reaktionszeiten, Kraftanstiegszeiten und Standardabweichungen der Kraftanstiegszeit (alle in ms), sowie Kraftamplituden und Standardabweichungen der Kraftamplitude (alle in %MVF) der korrekten Reaktionen in den acht Versuchsbedingungen.

Bedingung	RT	TTP	SD (TTP)	PF	SD (PF)
<i>Mit Vorinformation</i>					
<u>linke Hand</u>					
TTP100	436	110	15.0	42.9	7.6
TTP200	462	191	32.0	50.7	7.2
<u>rechte Hand</u>					
TTP100	437	109	13.9	42.2	7.4
TTP200	454	192	29.1	52.3	7.3
<i>Ohne Vorinformation</i>					
<u>linke Hand</u>					
TTP100	517	110	15.1	43.1	7.3
TTP200	554	195	32.7	51.5	7.4
<u>rechte Hand</u>					
TTP100	515	110	14.8	42.7	7.8
TTP200	548	193	31.1	52.8	7.9

Anmerkung. RT: Reaktionszeit; TTP: Kraftanstiegszeit; PF: Kraftamplitude; SD: Standardabweichung.

B Varianzanalysen (Verhalten)

B.1 Experiment 1

Tabelle B.1: Ergebnisse der Varianzanalysen für die Reaktionszeiten, Kraftanstiegszeiten (+SD) und Kraftamplituden (+SD).

Variable	Quelle	df, dfe	MSE	F-Wert
Reaktionszeit	Kraftanstiegszeitbedingung (K)	1, 15	8168.30	6.21*
	Reaktionshand (R)	1, 15	645.58	0.12
	KR	1, 15	2361.10	0.03
	Vorinformation (V)	1, 15	5578.60	76.15**
	KV	1, 15	427.57	3.11 [†]
	RV	1, 15	705.16	0.35
	KRV	1, 15	817.03	1.49
Kraftanstiegszeit	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 15	1093.30	205.78**
	Reaktionshand	1, 15	200.57	2.07
	KR	1, 15	64.53	0.16
	Vorinformation	1, 15	93.06	0.36
	KV	1, 15	91.90	0.24
	RV	1, 15	28.33	0.00
	KRV	1, 15	27.03	0.33
SD (Kraftanstiegszeit)	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 15	161.68	78.73**
	Reaktionshand	1, 15	32.81	1.97
	KR	1, 15	25.66	3.11 [†]
	Vorinformation	1, 15	20.85	0.08
	KV	1, 15	20.07	0.32
	RV	1, 15	7.23	2.15
	KRV	1, 15	7.26	3.54 [†]
Kraftamplitude	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 15	47.92	29.35**
	Reaktionshand	1, 15	85.18	0.46
	KR	1, 15	6.41	1.82
	Vorinformation	1, 15	5.04	0.80
	KV	1, 15	3.80	0.00
	RV	1, 15	1.52	0.31
	KRV	1, 15	2.73	0.08
SD (Kraftamplitude)	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 15	1.41	0.57
	Reaktionshand	1, 15	4.39	1.20
	KR	1, 15	1.16	0.21
	Vorinformation	1, 15	0.71	3.50 [†]
	KV	1, 15	0.63	4.46 [†]
	RV	1, 15	0.76	0.10
	KRV	1, 15	0.79	0.16

Anmerkung. ** $p < .01$; * $p < .05$; [†] $p < 0.1$.

B Varianzanalysen (Verhalten)

Tabelle B.2: Ergebnisse der Varianzanalysen für die Gesamtfehlerquote und die einzelnen Fehlerarten

Variable	Quelle	df, dfe	MSE	F-Wert
Gesamtfehler	Kraftanstiegszeitbedingung (K)	1, 15	53.59	0.01
	Reaktionshand (R)	1, 15	23.53	0.07
	KR	1, 15	23.02	0.00
	Vorinformation (V)	1, 15	12.97	13.55**
	KV	1, 15	6.03	0.29
	RV	1, 15	22.19	0.14
	KRV	1, 15	24.99	1.32
Fehler Hand	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 15	38.28	0.51
	Reaktionshand	1, 15	6.13	0.29
	KR	1, 15	6.55	0.27
	Vorinformation	1, 15	2.45	0.32
	KV	1, 15	2.86	0.27
	RV	1, 15	9.78	0.98
	KRV	1, 15	9.67	2.44
Fehler Kraftanstiegszeit	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 15	7.28	4.53 [†]
	Reaktionshand	1, 15	9.26	0.02
	KR	1, 15	5.05	0.15
	Vorinformation	1, 15	5.10	9.80**
	KV	1, 15	4.78	1.02
	RV	1, 15	6.65	0.73
	KRV	1, 15	4.27	0.73
Fehler Kraftamplitude	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 15	0.75	0.58
	Reaktionshand	1, 15	1.40	0.03
	KR	1, 15	1.51	7.29*
	Vorinformation	1, 15	5.54	0.08
	KV	1, 15	3.07	0.02
	RV	1, 15	1.53	0.80
	KRV	1, 15	1.04	2.30
Fehler Kraftanstiegszeit und Kraftamplitude	-	-	-	-
Fehler $RT > RT_{max}$	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 15	2.71	1.46
	Reaktionshand	1, 15	1.30	0.04
	KR	1, 15	2.52	0.17
	Vorinformation	1, 15	1.35	22.59**
	KV	1, 15	1.74	3.39 [†]
	RV	1, 15	1.72	0.03
	KRV	1, 15	2.05	0.59
Fehler $RT < RT_{min}$	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 15	0.09	2.14
	Reaktionshand	1, 15	0.10	0.00
	KR	1, 15	0.09	2.14
	Vorinformation	1, 15	0.47	1.67
	KV	1, 15	0.09	2.14
	RV	1, 15	0.10	0.00
	KRV	1, 15	0.09	2.14

Anmerkung. Die Varianzanalyse für Fehlerdurchgänge, in denen sowohl mit falscher Kraftamplitude als auch falscher Kraftanstiegszeit reagiert wurde, konnte wegen zu geringer Zellenbesetzung nicht durchgeführt werden.
 RT: Reaktionszeit; RT_{max} : 1000 ms; RT_{min} : 100 ms.

** $p < .01$; * $p < .05$; [†] $p < 0.1$.

B.2 Experiment 2

Tabelle B.3: Ergebnisse der Varianzanalysen für die Reaktionszeiten, Kraftanstiegszeiten (+SD) und Kraftamplituden (+SD).

Variable	Quelle	df, dfe	MSE	F-Wert
Reaktionszeit	Kraftanstiegszeitbedingung (K)	2, 22	1589.80	14.26**
	Reaktionshand (R)	1, 11	4350.40	0.25
	KR	2, 22	834.18	1.89
	Vorinformation (V)	1, 11	7882.00	79.92**
	KV	2, 22	1075.40	0.57
	RV	1, 11	709.29	0.78
	KRV	2, 22	735.16	0.35
Kraftanstiegszeit	Kraftanstiegszeitbedingung	2, 22	979.87	93.46**
	Reaktionshand	1, 11	291.38	0.03
	KR	2, 22	133.94	1.69
	Vorinformation	1, 11	32.83	2.65
	KV	2, 22	68.71	0.21
	RV	1, 11	30.14	0.73
	KRV	2, 22	17.28	0.50
SD (Kraftanstiegszeit)	Kraftanstiegszeitbedingung	2, 22	27.02	164.68**
	Reaktionshand	1, 11	60.02	0.64
	KR	2, 22	24.84	0.52
	Vorinformation	1, 11	32.62	2.01
	KV	2, 22	19.82	0.67
	RV	1, 11	11.64	0.35
	KRV	2, 22	18.80	0.34
Kraftamplitude	Kraftanstiegszeitbedingung	2, 22	50.24	30.92**
	Reaktionshand	1, 11	83.80	1.63
	KR	2, 22	5.64	2.81 [†]
	Vorinformation	1, 11	11.39	0.92
	KV	2, 22	3.30	0.50
	RV	1, 11	2.57	1.03
	KRV	2, 22	1.20	0.51
SD (Kraftamplitude)	Kraftanstiegszeitbedingung	2, 22	2.33	1.73
	Reaktionshand	1, 11	5.92	0.00
	KR	2, 22	1.67	0.61
	Vorinformation	1, 11	1.34	0.24
	KV	2, 22	1.16	0.36
	RV	1, 11	0.58	0.81
	KRV	2, 22	0.76	0.39

Anmerkung. ** $p < .01$; * $p < .05$; [†] $p < 0.1$.

B Varianzanalysen (Verhalten)

Tabelle B.4: Ergebnisse der Varianzanalysen für die Gesamtfehlerquote und die einzelnen Fehlerarten

Variable	Quelle	df, dfe	MSE	F-Wert
Gesamtfehler	Kraftanstiegszeitbedingung (K)	2, 22	30.82	0.12
	Reaktionshand (R)	1, 11	11.50	0.18
	KR	2, 22	47.62	0.46
	Vorinformation (V)	1, 11	49.00	7.99*
	KV	2, 22	9.64	2.72 [†]
	RV	1, 11	13.87	0.08
	KRV	2, 22	21.15	0.03
Fehler Hand	Kraftanstiegszeitbedingung	2, 22	5.42	0.25
	Reaktionshand	1, 11	4.21	0.37
	KR	2, 22	5.98	1.98
	Vorinformation	1, 11	2.78	4.00 [†]
	KV	2, 22	2.39	0.56
	RV	1, 11	3.20	0.05
	KRV	2, 22	4.64	0.34
Fehler Kraftanstiegszeit	Kraftanstiegszeitbedingung	2, 22	9.42	2.38
	Reaktionshand	1, 11	7.34	0.15
	KR	2, 22	4.25	1.27
	Vorinformation	1, 11	2.41	3.04
	KV	2, 22	2.11	1.31
	RV	1, 11	1.56	0.03
	KRV	2, 22	1.88	2.31
Fehler Kraftamplitude	Kraftanstiegszeitbedingung	2, 22	7.34	7.46*
	Reaktionshand	1, 11	8.57	0.18
	KR	2, 22	10.38	0.04
	Vorinformation	1, 11	3.35	0.21
	KV	2, 22	2.03	1.30
	RV	1, 11	3.20	2.66
	KRV	2, 22	2.69	0.60
Fehler Kraftanstiegszeit und Kraftamplitude	-	-	-	-
Fehler $RT > RT_{max}$	Kraftanstiegszeitbedingung	2, 22	6.21	3.58 [†]
	Reaktionshand	1, 11	2.21	1.26
	KR	2, 22	6.03	0.22
	Vorinformation	1, 11	17.09	11.06**
	KV	2, 22	5.50	2.44
	RV	1, 11	1.64	1.69
	KRV	2, 22	7.22	0.11
Fehler $RT < RT_{min}$	Kraftanstiegszeitbedingung	2, 22	0.13	1.00
	Reaktionshand	1, 11	0.11	3.67 [†]
	KR	2, 22	0.13	1.00
	Vorinformation	1, 11	0.11	3.67 [†]
	KV	2, 22	0.13	1.00
	RV	1, 11	0.11	3.67 [†]
	KRV	2, 22	0.13	1.00

Anmerkung. Die Varianzanalyse für Fehlerdurchgänge, in denen sowohl mit falscher Kraftamplitude als auch falscher Kraftanstiegszeit reagiert wurde, konnte wegen zu geringer Zellenbesetzung nicht durchgeführt werden.

RT: Reaktionszeit; RT_{max} : 1000 ms; RT_{min} : 100 ms.

** $p < .01$; * $p < .05$; [†] $p < 0.1$.

B.3 Experiment 3

Tabelle B.5: Ergebnisse der Varianzanalysen für die Reaktionszeiten, Kraftanstiegszeiten (+SD) und Kraftamplituden (+SD).

Variable	Quelle	df, dfe	MSE	F-Wert
Reaktionszeit	Kraftanstiegszeitbedingung (K)	1, 11	1153.80	0.08
	Reaktionshand (R)	1, 11	4496.60	2.23
	KR	1, 11	1391.90	0.47
	Vorinformation (V)	1, 11	5545.80	74.35**
	KV	1, 11	531.04	0.23
	RV	1, 11	360.25	4.49 [†]
	KRV	1, 11	711.47	0.12
Kraftanstiegszeit	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 11	1467.60	54.51**
	Reaktionshand	1, 11	267.31	0.34
	KR	1, 11	56.82	5.78*
	Vorinformation	1, 11	118.14	0.56
	KV	1, 11	289.96	0.89
	RV	1, 11	55.58	0.77
	KRV	1, 11	21.63	2.68
SD (Kraftanstiegszeit)	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 11	67.12	54.58**
	Reaktionshand	1, 11	37.30	0.04
	KR	1, 11	59.10	2.97
	Vorinformation	1, 11	19.88	6.60*
	KV	1, 11	26.52	2.24
	RV	1, 11	20.96	0.44
	KRV	1, 11	26.96	1.11
Kraftamplitude	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 11	41.21	26.30**
	Reaktionshand	1, 11	95.06	0.05
	KR	1, 11	2.91	0.00
	Vorinformation	1, 11	1.24	4.07 [†]
	KV	1, 11	3.42	0.28
	RV	1, 11	5.34	0.34
	KRV	1, 11	2.02	0.03
SD (Kraftamplitude)	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 11	1.33	0.78
	Reaktionshand	1, 11	2.71	0.01
	KR	1, 11	1.36	1.03
	Vorinformation	1, 11	1.14	0.17
	KV	1, 11	0.45	3.69 [†]
	RV	1, 11	1.42	1.05
	KRV	1, 11	1.47	0.27

Anmerkung. ** $p < .01$; * $p < .05$; [†] $p < 0.1$.

B Varianzanalysen (Verhalten)

Tabelle B.6: Ergebnisse der Varianzanalysen für die Gesamtfehlerquote und die einzelnen Fehlerarten

Variable	Quelle	df, dfe	MSE	F-Wert
Gesamtfehler	Kraftanstiegszeitbedingung (K)	1, 11	74.17	2.28
	Reaktionshand (R)	1, 11	8.26	0.07
	KR	1, 11	14.13	1.66
	Vorinformation (V)	1, 11	32.45	6.07*
	KV	1, 11	22.93	0.07
	RV	1, 11	13.37	0.04
	KRV	1, 11	10.01	1.88
Fehler Hand	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 11	26.44	1.80
	Reaktionshand	1, 11	6.46	1.22
	KR	1, 11	13.42	0.24
	Vorinformation	1, 11	14.36	1.02
	KV	1, 11	9.58	0.82
	RV	1, 11	5.32	1.48
	KRV	1, 11	9.44	0.34
Fehler Kraftanstiegszeit	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 11	38.97	0.43
	Reaktionshand	1, 11	6.58	3.96 [†]
	KR	1, 11	4.47	0.52
	Vorinformation	1, 11	6.87	2.43
	KV	1, 11	7.88	0.30
	RV	1, 11	2.68	0.10
	KRV	1, 11	1.18	0.88
Fehler Kraftamplitude	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 11	5.84	0.10
	Reaktionshand	1, 11	5.04	0.01
	KR	1, 11	2.57	2.05
	Vorinformation	1, 11	2.91	0.56
	KV	1, 11	3.33	0.02
	RV	1, 11	3.71	1.42
	KRV	1, 11	4.42	0.13
Fehler Kraftanstiegszeit und Kraftamplitude	-	-	-	-
Fehler $RT > RT_{max}$	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 11	1.72	0.34
	Reaktionshand	1, 11	0.78	2.10
	KR	1, 11	1.58	3.34 [†]
	Vorinformation	1, 11	3.43	8.38*
	KV	1, 11	0.92	0.07
	RV	1, 11	1.15	0.51
	KRV	1, 11	1.63	4.84 [†]
Fehler $RT < RT_{min}$	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 11	0.12	2.20
	Reaktionshand	1, 11	0.14	0.00
	KR	1, 11	0.14	0.00
	Vorinformation	1, 11	0.12	2.20
	KV	1, 11	0.12	2.20
	RV	1, 11	0.14	0.00
	KRV	1, 11	0.14	0.00

Anmerkung. Die Varianzanalyse für Fehlerdurchgänge, in denen sowohl mit falscher Kraftamplitude als auch falscher Kraftanstiegszeit reagiert wurde, konnte wegen zu geringer Zellenbesetzung nicht durchgeführt werden.

RT: Reaktionszeit; RT_{max} : 1000 ms; RT_{min} : 100 ms.

** $p < .01$; * $p < .05$; [†] $p < 0.1$.

B.4 Experiment 4

Tabelle B.7: Ergebnisse der Varianzanalysen für die Reaktionszeiten, Kraftanstiegszeiten (+SD) und Kraftamplituden (+SD).

Variable	Quelle	df, dfe	MSE	F-Wert
Reaktionszeit	Kraftanstiegszeitbedingung (K)	1, 23	2907.00	13.45**
	Reaktionshand (R)	1, 23	1367.00	0.46
	KR	1, 23	995.57	0.47
	Vorinformation (V)	1, 23	2331.60	154.32**
	KV	1, 23	461.09	4.80*
	RV	1, 23	302.39	0.05
	KRV	1, 23	245.17	0.27
Kraftanstiegszeit	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 23	2029.30	164.83**
	Reaktionshand	1, 23	177.51	0.06
	KR	1, 23	85.44	0.00
	Vorinformation	1, 23	36.06	2.70
	KV	1, 23	37.71	0.89
	RV	1, 23	12.71	0.48
	KRV	1, 23	11.88	2.23
SD (Kraftanstiegszeit)	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 23	64.43	203.04**
	Reaktionshand	1, 23	11.95	8.92**
	KR	1, 23	11.05	2.62
	Vorinformation	1, 23	20.30	1.98
	KV	1, 23	8.86	1.02
	RV	1, 23	7.16	1.68
	KRV	1, 23	6.10	0.14
Kraftamplitude	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 23	92.17	43.29**
	Reaktionshand	1, 23	83.73	0.11
	KR	1, 23	6.84	7.05*
	Vorinformation	1, 23	4.18	3.03 [†]
	KV	1, 23	1.44	0.83
	RV	1, 23	1.31	0.01
	KRV	1, 23	0.79	1.31
SD (Kraftamplitude)	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 23	2.04	0.17
	Reaktionshand	1, 23	2.99	0.69
	KR	1, 23	0.71	0.81
	Vorinformation	1, 23	0.40	4.71*
	KV	1, 23	0.59	2.28
	RV	1, 23	0.42	7.54*
	KRV	1, 23	0.46	0.57

Anmerkung. ** $p < .01$; * $p < .05$; [†] $p < 0.1$.

B Varianzanalysen (Verhalten)

Tabelle B.8: Ergebnisse der Varianzanalysen für die Gesamtfehlerquote und die einzelnen Fehlerarten

Variable	Quelle	df, dfe	MSE	F-Wert
Gesamtfehler	Kraftanstiegszeitbedingung (K)	1, 23	28.22	0.00
	Reaktionshand (R)	1, 23	20.29	0.09
	KR	1, 23	11.23	0.03
	Vorinformation (V)	1, 23	7.71	5.67*
	KV	1, 23	12.48	0.61
	RV	1, 23	5.61	0.31
	KRV	1, 23	14.79	0.02
Fehler Hand	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 23	8.82	0.95
	Reaktionshand	1, 23	4.87	0.96
	KR	1, 23	5.37	1.55
	Vorinformation	1, 23	3.20	2.19
	KV	1, 23	5.00	1.16
	RV	1, 23	2.41	2.90
	KRV	1, 23	11.07	0.33
Fehler Kraftanstiegszeit	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 23	8.92	4.22 [†]
	Reaktionshand	1, 23	6.94	0.17
	KR	1, 23	5.42	0.00
	Vorinformation	1, 23	0.84	2.89
	KV	1, 23	1.54	0.23
	RV	1, 23	0.95	4.40*
	KRV	1, 23	1.87	1.31
Fehler Kraftamplitude	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 23	15.12	0.22
	Reaktionshand	1, 23	6.02	0.69
	KR	1, 23	7.52	0.23
	Vorinformation	1, 23	1.79	0.07
	KV	1, 23	2.58	0.01
	RV	1, 23	2.22	0.01
	KRV	1, 23	1.36	1.29
Fehler Kraftanstiegszeit und Kraftamplitude	-	-	-	-
Fehler RT > RT _{max}	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 23	0.42	4.15 [†]
	Reaktionshand	1, 23	0.25	0.52
	KR	1, 23	0.29	2.48
	Vorinformation	1, 23	0.83	9.22**
	KV	1, 23	0.23	3.14 [†]
	RV	1, 23	0.35	2.04
	KRV	1, 23	0.48	3.63 [†]
Fehler RT < RT _{min}	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 23	0.11	0.14
	Reaktionshand	1, 23	0.04	0.32
	KR	1, 23	0.04	3.29 [†]
	Vorinformation	1, 23	0.09	4.02 [†]
	KV	1, 23	0.11	0.14
	RV	1, 23	0.04	0.32
	KRV	1, 23	0.04	3.29 [†]

Anmerkung. Die Varianzanalyse für Fehlerdurchgänge, in denen sowohl mit falscher Kraftamplitude als auch falscher Kraftanstiegszeit reagiert wurde, konnte wegen zu geringer Zellenbesetzung nicht durchgeführt werden.

RT: Reaktionszeit; RT_{max}: 1000 ms; RT_{min}: 100 ms.

** $p < .01$; * $p < .05$; [†] $p < 0.1$.

C Tabellarische Zusammenfassung der elektrophysiologischen Daten

C.1 LRP und HEOG

Tabelle C.1: Durchschnittliche SLRP- und RLRP-Latenzen (in ms), sowie durchschnittliche RLRP-, SHEOG- und RHEOG-Amplituden (in μV) in Abhängigkeit von Vorinformation und Kraftanstiegszeitbedingung (Experiment 4).

Bedingung	Latenz		Amplitude		
	SLRP	RLRP	RLRP	SHEOG	RHEOG
<i>Mit Vorinformation</i>					
TTP100	256	-85	-3.5	0.0	-0.2
TTP200	256	-80	-3.5	-0.2	-0.4
<i>Ohne Vorinformation</i>					
TTP100	296	-85	-3.4	-0.2	-0.3
TTP200	320	-90	-3.2	0.0	-0.3

Anmerkung. Die SLRP-Latenz entspricht der Länge des S-LRP-Intervalls, die RLRP-Latenz entspricht der Länge des LRP-R-Intervalls.

C.2 CNV und P300

Tabelle C.2: Durchschnittliche CNV- und P300-Amplituden (in μV) sowie P300-Latenzen (in ms) in Abhängigkeit von Elektrodenposition, Vorinformation, Reaktionshand und Kraftanstiegszeitbedingung (Experiment 4).

Elektrodenposition / Bedingung	CNV	P300	
		Amplitude	Latenz
Fz			
<i>Mit Vorinformation</i>			
<u>linke Hand</u>			
TTP100	-0.6	-	-
TTP200	-0.5	-	-
<u>rechte Hand</u>			
TTP100	-0.2	-	-
TTP200	-0.8	-	-
<i>Ohne Vorinformation</i>			
<u>linke Hand</u>			
TTP100	1.3	-	-
TTP200	1.2	-	-
<u>rechte Hand</u>			
TTP100	0.8	-	-
TTP200	0.9	-	-
Cz			
<i>Mit Vorinformation</i>			
<u>linke Hand</u>			
TTP100	-7.1	-	-
TTP200	-6.7	-	-
<u>rechte Hand</u>			
TTP100	-6.9	-	-
TTP200	-6.7	-	-
<i>Ohne Vorinformation</i>			
<u>linke Hand</u>			
TTP100	-3.8	-	-
TTP200	-3.9	-	-
<u>rechte Hand</u>			
TTP100	-4.2	-	-
TTP200	-4.1	-	-
Pz			
<i>Mit Vorinformation</i>			
<u>linke Hand</u>			
TTP100	-5.0	12.8	410
TTP200	-4.6	12.4	390
<u>rechte Hand</u>			
TTP100	-4.8	13.5	425
TTP200	-4.8	13.6	427
<i>Ohne Vorinformation</i>			
<u>linke Hand</u>			
TTP100	-1.7	13.5	469
TTP200	-1.9	13.0	462
<u>rechte Hand</u>			
TTP100	-2.2	14.2	477
TTP200	-1.9	13.5	471

Anmerkung. Die P300 wurde nur anhand der ereigniskorrelierten Potentiale an PZ ausgewertet.

D Varianzanalysen (Elektrophysiologie)

D.1 LRP und HEOG

Tabelle D.1: Ergebnisse der Varianzanalysen für die SLRP- und RLRP-Latenzen, sowie für die RLRP-, SHEOG- und RHEOG-Amplituden (Experiment 4).

Variable	Quelle	df, dfe	MSE	F-Wert
SLRP-Latenz	Kraftanstiegszeitbedingung (K)	1, 23	3.82	1.60
	Vorinformation (V)	1, 23	5.38	22.86**
	KV	1, 23	3.30	1.95
RLRP-Latenz	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 23	5.45	0.00
	Vorinformation	1, 23	3.91	0.35
	KV	1, 23	4.41	0.29
RLRP-Amplitude	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 23	0.60	0.27
	Vorinformation	1, 23	0.37	1.94
	KV	1, 23	0.35	1.08
SHEOG-Amplitude	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 23	0.22	0.00
	Vorinformation	1, 23	0.14	0.01
	KV	1, 23	0.20	2.64
RHEOG-Amplitude	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 23	0.26	0.45
	Vorinformation	1, 23	0.25	0.07
	KV	1, 23	0.26	0.21

Anmerkung. Für die SLRP- und RLRP-Latenzen wurden die korrigierten F-Werte angegeben.

** $p < .01$; * $p < .05$; † $p < 0.1$.

D.2 CNV und P300

Tabelle D.2: Ergebnisse der Varianzanalysen für die CNV- und P300-Amplituden, sowie für die P300-Latenzen (Experiment 4).

Variable	Quelle	df, dfe	MSE	F-Wert
CNV-Amplitude	Kraftanstiegszeitbedingung (K)	1, 23	5.49	0.06
	Reaktionshand (R)	1, 23	4.48	0.61
	KR	1, 23	4.71	0.01
	Vorinformation (V)	1, 23	13.74	61.47**
	KV	1, 23	6.37	0.02
	RV	1, 23	6.28	0.77
	KRV	1, 23	7.16	0.63
	Elektrodenposition (E)	2, 46	48.20	32.84**
	KE	2, 46	1.08	0.98
	RE	2, 46	0.70	0.13
	KRE	2, 46	1.22	0.44
	VE	2, 46	2.21	12.32**
	KVE	2, 46	1.25	0.74
	RVE	2, 46	1.20	0.26
	KRVE	2, 46	0.54	0.55
P300-Amplitude	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 23	8.06	0.87
	Reaktionshand	1, 23	5.65	4.90*
	KR	1, 23	4.40	0.10
	Vorinformation	1, 23	10.86	1.07
	KV	1, 23	4.68	0.52
	RV	1, 23	4.52	0.43
	KRV	1, 23	2.85	0.52
P300-Latenz	Kraftanstiegszeitbedingung	1, 23	3345.60	0.81
	Reaktionshand	1, 23	4200.60	3.40 [†]
	KR	1, 23	2369.30	0.56
	Vorinformation	1, 23	5421.80	28.51**
	KV	1, 23	3039.60	0.01
	RV	1, 23	2910.40	1.24
	KRV	1, 23	1855.80	0.78

Anmerkung. ** $p < .01$; * $p < .05$; [†] $p < 0.1$.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Hannes Schröter
Geburtsdatum: 9. Januar 1974
Geburtsort: Detmold
Familienstand: verheiratet
Wohnort: 72076 Tübingen

Schullaufbahn

1980 - 1984 Grundschule Detmold-Heidenoldendorf
1984 - 1993 Stadtgymnasium Detmold
14. Juni 1993 Abitur

Hochschulstudium

WS 1993/94 Dipl.-Biotechnologie, TU Braunschweig
SS 1994 - WS 1998/99 Dipl.-Psychologie, TU Braunschweig
14. April 1999 Diplom in Psychologie

Forschungsaufenthalt

Mai 1999 - Jan. 2000 University of Otago, Dunedin, Neuseeland;
gefördert durch ein Stipendium des
„Deutscher Akademischer Austauschdienst“

Promotionsstudium

April 2000 - Sept. 2001 Psychologie, Universität Tübingen;
gefördert durch ein Stipendium der „Landes-
graduiertenförderung Baden-Württemberg“

Berufstätigkeit

Okt. 2000 - Sept. 2001 geprüfte Wissenschaftliche Hilfskraft,
Psychologisches Institut, Universität Tübingen
seit Okt. 2001 Wissenschaftlicher Angestellter,
Psychologisches Institut, Universität Tübingen