

Diss. ETH ex. B

Diss. ETH Nr. 9919

**Motorische Konzepte und Bedienung von Tastaturen:  
"Weglose" Flachtastaturen als Alternative zu Wegtastaturen**

ABHANDLUNG  
zum Erlangen des Titels  
DOKTOR DER NATURWISSENSCHAFTEN  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE  
ZÜRICH

vorgelegt von  
URS GUGGENBÜHL  
BSc (Hons) MSc  
geboren am 7. September 1955

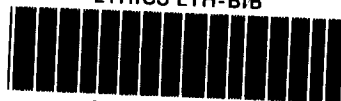
Angenommen auf Antrag von  
Prof. Dr. Dr. H. Krueger, Referent  
Prof. Dr. K. Bättig, Korreferent

Zürich, Oktober 1992



030E

ETHICS ETH-BIB



00100000337991

# Inhaltsverzeichnis

---

Zusammenfassung.....	V
Summary.....	VII
<b>1. Einleitung</b>	
1.1 Was ist Ergonomie?.....	2
1.2 Ergonomische Probleme bei Tastaturen.....	2
1.3 Zielsetzung.....	3
<b>2. Theorie</b>	
2.1 Ergonomische Aspekte in der Entwicklungsgeschichte der Tastatur.....	6
2.2 Organisation der Bewegung: Das Motor-Programm .....	10
2.2.1 Einleitung .....	10
2.2.2 Definition des Motor-Programms .....	11
2.2.3 Die Rolle der Rückkopplung im Motor-Programm.....	12
2.2.4 Hierarchische Struktur des Motor-Programms.....	15
2.2.5 Modularer Aufbau eines Motor-Programms.....	19
2.2.6 Zeitliche Struktur im Motor-Programm.....	23
2.2.7 Schlussfolgerungen.....	25
2.3 Studien über Rückkopplungen beim Schreiben auf einer Tastatur.....	27
2.3.1 Einleitung .....	27
2.3.2 Interne (erlernte) Rückkopplung .....	27
2.3.3 Akustische Rückkopplung .....	28
2.3.4 Tastenweg, Druckpunkt und Stellkraft.....	28
2.3.5 Form der Tasten.....	30
2.3.6 Schlussfolgerungen.....	31

2.4	Gesundheitliche Aspekte beim Bedienen einer Tastatur .....	32
2.4.1	Einleitung .....	32
2.4.2	Die geteilte Tastatur.....	33
2.4.3	Form der Tastatur und Tastenanordnung.....	35
2.4.4	Kraft-Weg-Verlauf.....	36
2.4.5	Anschlagfrequenz.....	36
2.4.6	Schlussfolgerungen.....	37
2.5	Arbeitshypothesen .....	38
<b>3.</b>	<b>Experimente</b>	
3.1	Untersuchungsmethode .....	41
3.1.1	Leistung .....	41
3.1.2	Akzeptanz.....	43
3.1.3	Dreidimensionale Bewegungsmessung.....	44
3.1.3.1	Bewegungsmesssysteme: Eine Uebersicht.....	44
3.1.3.2	Messprinzip und Funktionsweise der Bewegungsmessapparatur mit Ultraschallübertragung.....	49
3.1.3.3	Bewegungsmessapparatur mit Ultraschallübertragung .....	51
3.1.3.4	Räumliche und zeitliche Auflösung der Bewegungsapparatur mit Ultraschallübertragung.....	52
3.1.3.5	Anordnung der Bewegungsmessapparatur für diese Studie .....	52
3.1.4	Elektromyographie (EMG).....	53
3.1.4.1	Einleitung .....	53
3.1.4.2	Messanordnung .....	53
3.1.4.3	Kalibrierung der Muskeln.....	54
3.1.5	Methode der Auswertung der Bewegungsmessung und des Elektromyogramms	55
3.1.5.1	Fehlerkorrektur der gemessenen Koordinaten.....	55
3.1.5.2	Aufzeichnung der Fingerbewegung, der Fingergeschwindigkeit, der Fingerbeschleunigung und der Aktivität der Muskeln flexor und extensor digitorum .....	55
3.1.5.3	Statistische Auswertung der Fingerbewegungen.....	57
3.1.5.4	Fast Fourier Transform der Fingerbewegung .....	58
3.1.6	Statistik .....	60
3.1.7	Tastaturen .....	62

3.2	Experiment 1: Vergleichsstudie zwischen drei marktgängigen Flachtastaturen und einer konventionellen Wegtastatur .....	65
3.2.1	Einleitung .....	65
3.2.2	Probanden .....	65
3.2.3	Testablauf.....	65
3.2.4	Resultate.....	67
3.2.4.1	Leistung .....	67
3.2.4.2	Akzeptanz.....	68
3.2.4.3	Bewegungsanalyse.....	72
3.2.4.3.1	Fingerbewegungen in der Z-Achse .....	72
3.2.4.3.2	Fingergeschwindigkeiten.....	75
3.2.4.3.3	Muskelaktivität (EMG).....	76
3.2.4.3.4	Frequenzanalyse.....	77
3.2.4.4	Zeitliche Analyse .....	80
3.2.4.4.1	Zeit zwischen den eingegebenen Ziffern einer Zahl .....	80
3.2.4.4.2	Eingabezeiten .....	83
3.2.4.4.3	Zwischen-Zahlen-Zeiten .....	84
3.2.5	Diskussion .....	85
3.2.5.1	Bewegungsablauf beim Tippen auf einer Tastatur.....	85
3.2.5.2	Beurteilung der Methodik .....	87
3.3	Experiment 2: Werden Leistung und Komfort beim Bedienen von weglosen Flachtastaturen durch eine zusätzliche Rückkopplung verbessert? .....	88
3.3.1	Einleitung .....	88
3.3.2	Probanden .....	88
3.3.3	Resultate.....	89
3.3.3.1	Leistung .....	89
3.3.3.2	Akzeptanz.....	90
3.3.3.2	Bewegungsanalyse.....	94
3.3.4	Diskussion .....	96
3.4	Experiment 3: Vergleich von Piezotastaturen mit variablen Totzeiten.....	97
3.4.1	Einleitung .....	97
3.4.2	Probanden .....	98
3.4.3	Resultate.....	99



3.4.3.1	Leistung .....	99
3.4.3.2	Akzeptanz.....	100
3.4.3.3	Bewegungsanalyse.....	104
3.4.3.3.1	Frequenzanalyse der Fingerbewegungen und der Zwischen-Ziffer-Zeiten.....	104
3.4.3.3.2	Muskelaktivität (EMG).....	109
3.4.4	Diskussion .....	112
3.5	Experiment 4: Untersuchung der Muskelaktivität bei verschiedenen "Tapping"- Frequenzen.....	115
3.5.1	Einleitung .....	115
3.5.2	Probanden .....	116
3.5.3	Testablauf.....	116
3.5.4	Resultate.....	117
3.5.4.1	Beurteilung der Rhythmen.....	117
3.5.4.2	Muskelaktivität (EMG).....	119
3.5.4.3	Selbst ausgewählte Schlagfrequenz.....	121
3.5.5	Diskussion .....	123
<b>4.</b>	<b>Schlussdiskussion</b>	
4.1	Diskrete oder kontinuierliche Handlung als Untersuchungsmethode zur Beurteilung einer Tastatur.....	126
4.2	Das Optimum der Bewegung und die Leistungsspitze .....	127
4.3	Geübte und ungeübte Tastaturbenutzer .....	129
	<b>Anhang</b>	
	Anhang A: Fragebogen .....	133
	Anhang B: Tastaturen .....	134
	Anhang C: Definitionen.....	139
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>140</b>
	<b>Publikationen und Teilnahme mit Beitrag an wissenschaftlichen Konferenzen .....</b>	<b>150</b>
	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>151</b>

## Zusammenfassung

---

In der industriellen Nutzung finden Flachtastaturen als Ersatz für konventionelle Tastaturen zunehmend Verbreitung. Sie sind kostengünstig in der Produktion, robust und leicht zu reinigen. Flachtastaturen weisen aus traditioneller ergonomischer Sicht Mängel auf. Hierzu gehört die Frage der fehlenden taktilen Rückkopplung. Eine Zusammenfassung der Literatur zeigt, dass bei geübten Tastaturbenutzern die taktile Rückkopplung für die effiziente Bedienung einer Tastatur unwichtig ist. Geübte Tastaturbenutzer bedienen die Tastatur anhand eines erlernten Motor-Programms. Rückkopplungen werden nur noch zur Ueberwachung und nicht zur Steuerung des Bewegungsablaufs herangezogen. Aus diesen Ueberlegungen formuliert sich eine erste Arbeitshypothese. Eine Tastatur kann auch ohne Tastenweg (kinästhetische Rückkopplung) effizient bedient werden.

Im weiteren stellt sich die Frage, ob und wie Einflüsse von der Tastatur das muskuloskeletale System beanspruchen. Einige Stellen in der Literatur weisen darauf hin, dass eine zu kurze Totzeit zwischen den Tasten oder eine zu kleine Stellkraft der Taste zu Verkrampfungen im Unterarm führt. Aus mechanischen Gründen kann der Tastaturbenutzer seinen Bewegungsablauf nur schwerlich an diese Bedingungen anpassen, und es treten vermehrt unkontrollierbare Fehler auf. Diese Unsicherheit führt zu Verkrampfungen im muskuloskeletalen System. Aus diesen Ueberlegungen formuliert sich die zweite Arbeitshypothese. Das muskuloskeletale System wird durch unvorhergesehene Einflüsse beim Schreiben auf einer Tastatur vermehrt beansprucht.

In 4 verschiedenen Experimenten werden diese beiden Fragestellungen untersucht. In den Experimenten 1, 2 und 3 werden jeweils 4 verschiedene numerische Tastaturen im Einfingerbetrieb gegeneinander verglichen. Die Tastaturen unterscheiden sich im wesentlichen zwischen mit und ohne Tastenweg, zwischen mit und ohne akustische wie taktile Rückkopplung, zwischen hoher und tiefer Stellkraft und zwischen langer und kurzer Totzeit zwischen den Tasten. Im 4. Experiment werden verschiedene Schlagfrequenzen (Tapping) verglichen. Das Eingeben von Zahlen mit einem Finger wird durch die Probanden auf jeder Versuchstastatur dreimal trainiert. Beim Test werden Leistung, Akzeptanz, Fingerbewegung und die Aktivität der Unterarmmuskeln (Elektromyogramm) erfasst.

Die Resultate zeigen deutlich, dass eine Tastatur auch ohne Tastenweg effizient bedienbar ist. Der Bewegungsablauf wird geplant und entfaltet sich als Motor-Programm. Solange das

Motor-Programm nicht gestört wird, werden Rückkopplungen nicht zur direkten Steuerung der Bewegung eingesetzt.

Beim Tippen wird eine Schlagbewegung (runter und rauf) mit einer Anschlagfrequenz zwischen 3 Hz bis 4 Hz bevorzugt. Dabei werden nur die Streckermuskeln (Extensoren) zur Bewegung des Fingers herangezogen. Bei Abweichungen von der "optimalen" Anschlagfrequenz steigt die Aktivität der Extensoren, und zusätzlich wird die Beugermuskulatur (Flexoren) im Unterarm aktiv. Die Gründe für diese Abweichungen sind ein zu schnelles Schreiben auf der Tastatur (weil man so will) sowie eine hohe Stellkraft und Unsicherheiten beim Bedienen der Tastatur. Anpassungen des Motor-Programms an veränderte Eingabebedingungen seitens der Tastatur sind in gewissem Masse möglich, ohne dass messbare Veränderungen im Bewegungsablauf und der Muskelaktivität festgestellt werden können. Bei grossen Veränderungen hingegen wird das motorische System überfordert und eine Abweichung vom optimalen Bewegungsablauf sowie eine erhöhte Beanspruchung der Unterarmmuskulatur resultiert. Unsicherheiten während der Eingabe führen sogar zu Kontraktionen der Antagonisten im Unterarm.

Die angewendete Methode eignet sich gut für vergleichende Messungen zwischen verschiedenen Tastaturtypen.

## Summary

---

In industry flat keyboards have become more and more popular. They are cheap, robust and easy to clean. However, from an ergonomic point of view, they lack tactile feedback. A review of the literature shows that skilled keyboard operators don't necessarily need tactile feedback to use a keyboard efficiently. Skilled operators use a motor program to type. During typing, feedback is used to monitor typing actions but not to control the movement trajectory. From this a first hypothesis is defined: A keyboard can be used efficiently despite lack of key travel (kinesthetic feedback).

Furthermore the question of whether and by what means the use of a keyboard strains the musculoskeletal system arises. Some of the existing literature indicates that both inter-key dead time which is too short or a very small actuation force leads to high tension in the muscles of the lower arm. Due to mechanical limitations it is very difficult for an operator to adapt their movement trajectory under these conditions. Consequently the operator finds it difficult to type without mistakes. The uncertainty of how to handle these conditions leads to high tension in the musculoskeletal apparatus. From this a second hypothesis is defined. Unforeseeable influences while typing on a keyboard increasingly strain the musculoskeletal system.

In four different experiments these two hypothesis are tested. In Experiment 1, 2 and 3 four different numeric keypads using only one finger to type are compared with each other. The keypads differ as follows: Keypads with and without key travel, keypads with and without acoustic and tactile feedback, keypads with either a high or a low actuation force, keypads with either short or long inter-key dead times. Experiment 4 compares different tapping frequencies. Each subject participates in three training trials before he/she enters the test trial. During the test trial performance, acceptance, finger movements and the activity of the muscles in the lower arm (electromyogram) is measured.

The results show clearly that a keyboard can be used efficiently despite the lack of key travel. The movement trajectory is pre-planned and runs according to a motor program. As long as the motor program is not disturbed, feedback is not used to directly control the movement.

During typing, a typing rhythm of 3 Hz to 4 Hz is preferred. Typing within this frequency range only involves the extensor muscles which move the finger up and down. However, if a

deviation from the "optimal" frequency range occurs, then the extensor activity increases and the flexor muscles in the lower arm become active as well. The deviation is either caused by typing too fast (own choice), by an actuation force which is too high, or by uncertainty during typing. The motor program can adapt to some small changes in typing conditions without producing a measurable increase in muscular activity. However, if the changes are too large then the motor system is stressed, and deviations from the optimal typing rhythm, as well as an increase in muscular strain, result. Uncertainty during typing even leads to a co-contraction of the antagonists in the lower arm.

The applied method is a suitable method to compare different types of keypads.

# **1. Einleitung**

### **1.1. Was ist Ergonomie?**

Der Begriff Ergonomie stammt aus dem letzten Jahrhundert und lässt sich wörtlich als die Wissenschaftsdisziplin zur Erforschung der Gesetzmässigkeit menschlicher Arbeit (griech. ergon = Arbeit, Werk; griech. nomos = Gesetz) übersetzen. Im Vergleich zu heute herrschten damals schlechte Arbeitsbedingungen. Vor allem die hohe Zahl schwerer Arbeitsunfälle, die meistens zu Verkrüppelungen führten, gaben den Anstoss, sich näher mit der Arbeitsplatzgestaltung zu befassen. Die Ergonomie etablierte sich aber erst Mitte dieses Jahrhunderts als universitäre Wissenschaftsrichtung. Heute umfasst das Tätigkeitsfeld der Ergonomie einerseits die Anpassung der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine, d.h. die Anpassung der Handhabung der Maschine an die physischen und psychischen Fähigkeiten des menschlichen Benutzers; andererseits versucht die Ergonomie ganze Arbeitsplätze und Arbeitssysteme menschengerecht zu gestalten. Die Erfassung der Haltung und der Bewegung spielt dabei eine wichtige Rolle. Die Maschine und der Arbeitsplatz sollten so optimiert werden, dass einerseits ein reibungsloses und sicheres Bedienen von Geräten möglich ist und andererseits der muskuloskeletale Bereich nicht überbeansprucht wird. Trotz intensiver Forschung sind muskuloskeletale Probleme am Arbeitsplatz nach wie vor häufig anzutreffen. Eine umfassende Lösung zu diesem Problem ist in absehbarer Zeit nicht zu erwarten. Immer noch herrscht Uneinigkeit zwischen den Forschergruppen in der Symptombezeichnung verschiedener muskuloskeletaler Beschwerden. Die Mess- und Analysemethoden für die Erfassung von muskuloskeletaler Beanspruchung sind noch nicht ausgereift<sup>1</sup>.

### **1.2. Ergonomische Probleme bei Tastaturen**

Die Tastatur, eine typische Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine, wurde in den letzten 100 Jahren immer wieder zu Versuchszwecken eingesetzt. Zum einen studierte man die ergonomischen Eigenschaften der Tastatur, zum anderen benutzten Forscher die Tastatur, um damit motorische Funktionen des Menschen zu studieren. Die enorme Geschwindigkeit (10 Anschläge pro Sekunde), die geübte (gut trainiert) Schreiber bei der Bedienung der Tastatur erreichen, setzt eine Geschicklichkeit voraus, die nur durch intensives

---

<sup>1</sup> Wallace M., Buckle P., Ergonomic Aspects of Neck and Upper Limb Disorders. International Reviews of Ergonomics, Edited by Osborne D.J., 1, Taylor and Francis, (1987)

Ueben erreicht werden kann. Vor allem die Fähigkeit, sich eine solche Geschicklichkeit anzueignen, sowie die Komplexität der damit verbundenen Bewegungsabläufe faszinierten die Motorikforscher. Die eingesetzten Untersuchungsmethoden stammten hauptsächlich aus der kognitiven Psychologie. Leider wurden diese Resultate nur selten für die Gestaltung und die Konstruktion von Tastaturen verwendet. Vielleicht sind diese theoretischen Abhandlungen in der Motorikforschung zu unverständlich für den Ingenieur, der Tastaturen baut.

Wie auch immer, die Konstrukteure sind fleissig am Entwickeln von neuartigen Tastaturprinzipien, die sich für spezielle Einsätze eignen. In der industriellen Nutzung zum Beispiel finden Flachtastaturen (Tastaturen ohne oder nur mit sehr kleinem Tastenweg) als Ersatz zu konventionellen Tastaturen immer mehr Verbreitung. Vorteile ergeben sich vor allem bei medizinischen Geräten (problemlose Desinfektion), bei Werkzeugmaschinen (einfache Reinigung), bei öffentlich aufgestellten Automaten (geringe Gefahr der mutwilligen Zerstörung) und beim Einsatz unter extremen Umweltbedingungen (Kälte, Hitze, Wasser etc.). Allerdings erfüllen diese Tastaturen bisherige ergonomische Richtlinien nicht<sup>2</sup>. Danach muss eine Taste einen Weg von einigen Millimetern bei der Bedienung erlauben. Zusätzlich muss zur Optimierung der Fingermotorik ein Druckpunkt vorhanden sein. Diese Forderungen, die auch Eingang in die europäische Normung<sup>3</sup> gefunden haben, basieren jedoch nur auf Experimenten mit konventionellen Tastaturen, deren Ergebnisse verallgemeinert wurden. Es ist daher fraglich, ob diese Ergebnisse tatsächlich auf die weglose Tastatur übertragen werden können.

### 1.3. Zielsetzung

In der vorliegenden Studie sollen Grundlagen für die ergonomische Optimierung einer weglosen Tastatur (Flachtastatur) erarbeitet werden. In der Untersuchungsmethodik werden motorische Aspekte (Bewegungsabläufe) in den Vordergrund gestellt. Es gilt also, in erster Linie die Frage zu klären, wie die typischen Bewegungsabläufe für die Bedienung einer Tastatur zentral gesteuert werden und wie sich dies auf weglose Tastaturen übertragen lässt.

---

<sup>2</sup> IBM, Bildschirmgeräte am Arbeitsplatz - Benutzerakzeptanz (1982)

<sup>3</sup> DIN 33401, Stellteile (Juli 1977)



Mit einer Literaturstudie über motorische Aspekte bei der Bedienung einer Tastatur soll eine Uebersicht über schon geklärte und noch offene Fragestellungen geschaffen werden. Die Untersuchung selber wird sich im wesentlichen auf numerische Tastaturen im Einfingerbetrieb beschränken. In die Diskussion der Resultate sollen aber auch Fragen betreffend die Mehrfingerbedienung einer alphanumerischen Tastatur mit einbezogen werden.

## **2. Theorie**

## 2.1 Ergonomische Aspekte in der Entwicklungsgeschichte der Tastatur

Als 1873 Sholes und Glidden eine Schreibmaschine entwickelten, die ein Jahr später von E. Remington and Sons produziert wurde, ahnten sie nicht, welchen durchschlagenden Erfolg ihre Schreibmaschine erzielen werde. Die Buchstabenanordnung der Tastatur, die sie nach den obersten sechs Tasten als QWERTY-Tastatur bezeichneten (im deutschsprachigen Raum als QWERTZ-Tastatur bekannt), ist noch heute Standard. Warum gerade diese Buchstabenanordnung ausgewählt wurde, ist nicht klar. Es wird behauptet, dass damals die QWERTY-Anordnung aus der Notwendigkeit einer mechanischen Funktionsoptimierung entstanden ist. Mit der QWERTY-Anordnung versuchte man, alle häufig gebrauchten Buchstabenpaare der englischen Sprache auseinanderzuhalten, so dass die Tasten nicht zu schnell nacheinander gedrückt werden konnten und sich ineinander verkeilten. Welcher Grund auch immer zu dieser Buchstabenanordnung führte, die Anordnung wurde sicher nicht im Sinne einer optimalen Auslastung der Finger beim Schreiben mit 10 Fingern gestaltet.

Einer der bekanntesten Versuche, die Tastenanordnung menschengerechter zu gestalten, wurde in den dreissiger Jahren von Dvorak<sup>1</sup> vorgestellt. Anhand von Schreibanalysen entwarf er eine neue, sequentielle Anordnung der Tasten, welche eine sinnvollere Auslastung der Finger anstrebte (Abb 2.1.). Obwohl die Dvorak-Anordnung schneller zu bedienen ist (Norman<sup>2</sup>) als die QWERTY-Anordnung, hat sie den Durchbruch nie geschafft. Vermutlich weil der Aufwand zu gross wäre, mehrere Millionen geübte Tastaturbenutzer auf eine neue Tastenanordnung umzulernen.

Aehnlich erging es den Vorschlägen von Klockenberg<sup>3</sup>, der schon 1926 zum Schluss kam, dass die üblichen Schreibmaschinentastaturen unnatürliche und ermüdende Haltungen der Hände, Arme und Schultern verursachen. Er schlug eine Zweiteilung und Abwinkelung jeder Halbtastatur vor, um dadurch den beiden Händen eine bequeme Haltung zu gestatten. Dieses Konzept wurde später von verschiedenen Forschern weiterverfolgt und bis zur

---

<sup>1</sup> Dvorak, A., Merrick, N., Dealey, W., Ford, G., *Typewriting Behaviour. Psychology Applied to Teaching Typewriting*, New York. American Book Co (1936)

<sup>2</sup> Norman, D.A., Fischer, D., *Why Alphabetic Keyboards are not Easy to Use: Keyboard Layout Doesn't Much Matter*, *Human Factors*, 24(5), 509-519, (1982)

<sup>3</sup> Klockenberg, E., *Rationalisierung der Schreibmaschine und ihrer Bedienung*, Springer Verlag Berlin (1926)

Serienreife gebracht (z.B. die Tastatur von STR (Abb.2.2) oder von Marquardt). Leider scheiterte auch dieses Konzept am Markt, und die Produktion wurde eingestellt.

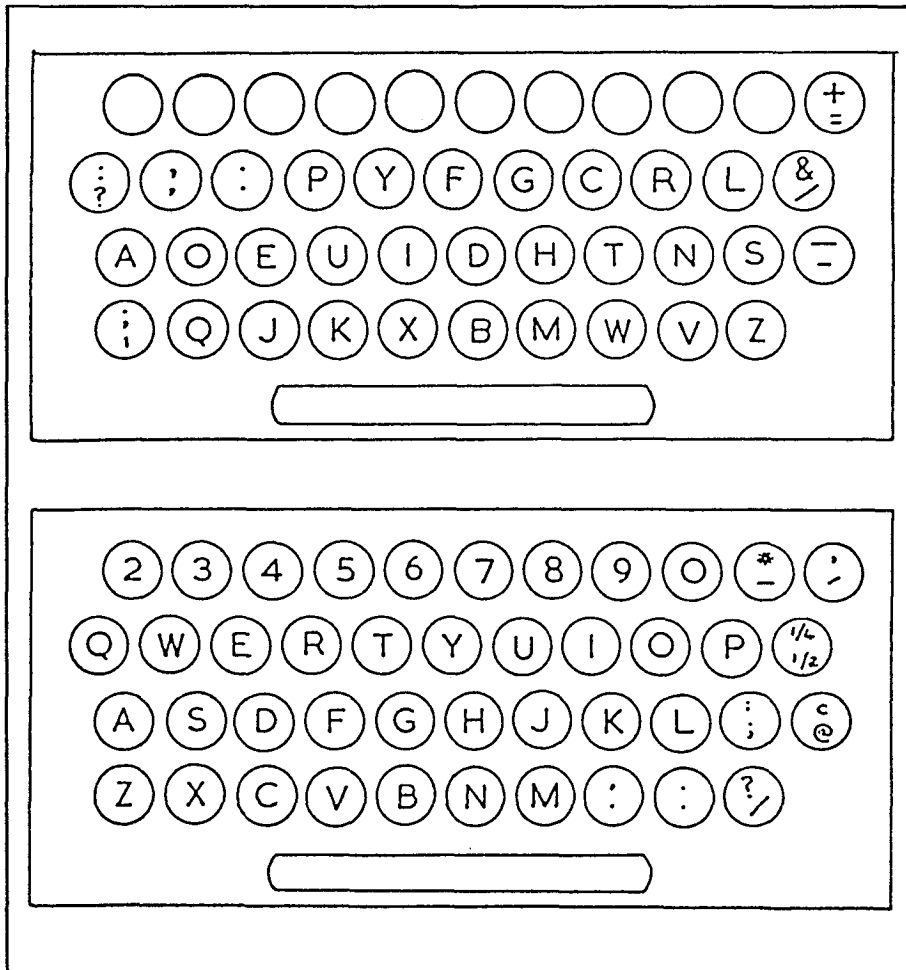


Abb. 2.1: Oben: Tastatur nach Dvorak und Mitarbeiter;  
unten: das heute verbreitete QWERTY-System.

Neben der QWERTY-Anordnung hat sich auch die kompakte Anordnung der Tasten der Remington-Schreibmaschine bewährt. Schon damals lagen die Tasten nicht mehr als 18 bis 22 mm auseinander (heutiger Standard: 19 mm von Zentrum zu Zentrum der Tasten). Diese Kompaktheit und vor allem die Einführung der "Umschalt"-Taste (Remington, Modell 2, 1878<sup>4</sup>) schufen die Voraussetzung für das Schreiben mit 10 Fingern, das erst einige Jahre nach der Einführung der Sholes-Tastatur praktiziert wurde. Die Stellkraft lag

<sup>4</sup> Martin, E., Die Schreibmaschine und ihre Entwicklungsgeschichte, Verlag Payer Basten, Aachen (1949)

damals etwa bei 10 Newton bei vollem Durchdrücken der Taste von 10 mm. Die mittlere Zeile der Tastatur lag 50 mm über der Arbeitstischoberfläche, und die einzelnen Tastenreihen waren 10 mm vertikal verschoben. Dies war damals der beste Kompromiss, da die Mechanik der Schreibmaschine die Flexibilität der Konstruktion stark einschränkte. Im heutigen elektronischen Zeitalter eröffnen sich neue Möglichkeiten, eine benutzergerechte Tastatur zu konstruieren!

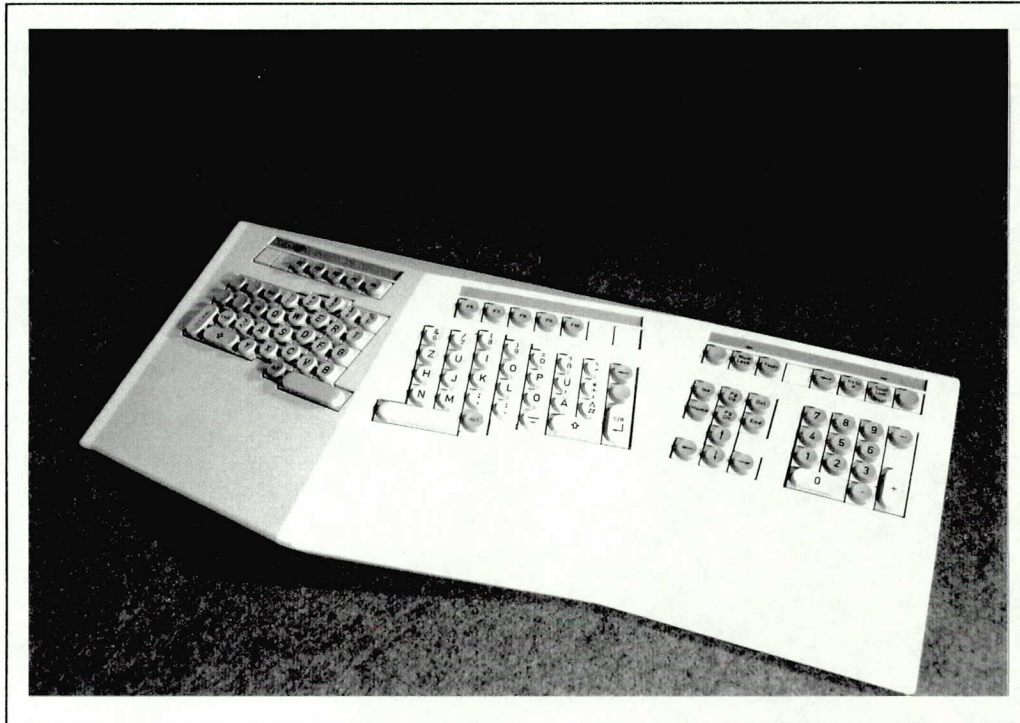


Abb. 2.2: Das geteilte Tastenfeld der STR-Tastatur

Die Misserfolge von Dvorak und der geteilten Tastatur zeigen, dass mit zu grossen Aenderungen nicht der gewünschte Verkaufserfolg erzielt werden kann und dadurch gute Ideen zum Scheitern verurteilt sind. Ein schrittweises Vorgehen mit kleinen Aenderungen würde vermutlich vom Benutzer besser akzeptiert werden, und die angestrebte ergonomische Qualität könnte sich langsam im Produkt festsetzen.

Ein gutes Marketing und Ausdauer von seiten des Managements könnten einer guten Idee auch zum Durchbruch verhelfen. Schon Remington, der 1873 die erste erfolgreiche

Schreibmaschine produzierte, kam nicht über Nacht zu seinem Erfolg<sup>5</sup>. Es dauerte etwa 10 Jahre, bis er die Geschäftswelt davon überzeugen konnte, dass es sich mit der Schreibmaschine schneller und schöner schreiben lässt als von Hand. Während dieser 10 Jahre machte er Defizite, ja er musste gar zu jeder verkauften Schreibmaschine den nötigen Maschinenschreiber mitliefern.

Die Tastatur, die heute erfolgreich verkauft wird, hat eine QWERTY-Tastenanordnung (QWERTZ im deutschsprachigen Raum) und besitzt nach wie vor kein geteiltes Tastaturfeld. Die Tastatur ist normalerweise flach (nicht dicker als 30 mm, gemessen bei der mittleren Reihe) und hat einen Neigungswinkel von maximal 15°. Die einzelnen Tasten liegen 19 mm auseinander (gemessen von Zentrum zu Zentrum der Tasten) und haben eine Kantenlänge von 12 bis 15 mm. Die Tastenoberfläche ist konkav gewölbt. Die Taste besitzt einen Druckpunkt mit akustischer Rückkopplung, einen Tastenwiderstand von 0.15 N bis 1.4 N (IBM-Richtlinien), wobei das Optimum bei 0.8 N liegt (Rose<sup>6</sup>), und hat einen Tastenhub von 3 bis 5 mm (IBM-Richtlinien).

---

<sup>5</sup> Kleine Geschichte vom Schreiben und Verfielfältigen, Wegra Verlagsgesellschaft Stuttgart (1970)

<sup>6</sup> Rose, M.J., Keyboard Operating Posture and Actuation Force: Implications for Muscle Over-Use, Applied Ergonomics, 22 (3), 198-203 (1991)

## 2.2 Organisation der Bewegung: Das Motor-Programm

### 2.2.1 Einleitung

Neben den rein physiologischen Kriterien zur ergonomischen Optimierung einer Tastatur ist vor allem die nähere Betrachtung der Organisation der Bewegung wichtig. Das bedeutet, eine Tastatur ist erst dann gut, wenn man sie auch bedienen kann.

Die scheinbar einfache Bewegung eines Fingers zum Tippen einer Taste ist ein sehr komplexer Vorgang. Er beginnt im Gehirn mit der Entscheidung, eine Bewegung einzuleiten, und führt zum Muskel, der die Bewegung ausführt, und endet mit der Rückmeldung über den Erfolg an das Gehirn. Wie die Entscheidung, eine Tippbewegung einzuleiten, zustande kommt, wie sie organisiert und ausgeführt wird, welche peripheren Reize (Rückkopplungsmechanismen) zur Optimierung des Bewegungsablaufs wichtig sind, ist heute noch immer Gegenstand intensiver Grundlagenforschung.

Theorien und Modelle zur Beschreibung der Bewegungsorganisation stützen sich heute mehrheitlich auf das menschliche Informationsverarbeitungssystem, eine Betrachtungsweise, die aus der kognitiven Psychologie stammt und als "Motor Theory" bekannt ist. Eine ganz andere Betrachtungsweise entstand aus den Ideen von J.J.Gibson<sup>7</sup>, die er als "ökologische Psychologie" bezeichnete. Turvey<sup>8</sup> benutzte dann diese Theorien sowie Theorien von Bernstein<sup>9</sup> zur Beschreibung der Bewegungsorganisation, was heute unter dem Namen "Theory of Action" bekannt ist. Im Gegensatz zur Motor-Theorie, bei der die Bewegung aus einer zentral organisierten Befehlsstruktur (Motor-Programm) entsteht, betrachtet die Aktions-Theorie den Menschen als ein selbstorganisierendes System, das unabhängig von einer zentralen Befehlsstruktur und nur nach den dynamischen Regeln des Systems seinen Bewegungsablauf steuert. Die Wahrnehmung bestimmt auch das Ziel der Bewegung. Nach dem Motto: Was wir sehen, das tun wir. In dieser Arbeit wird vor allem die Motor-Theorie benutzt, um den Vorgang des Schreibens auf einer Tastatur zu analysieren. Die zentral gesteuerte Bewegung wird somit in den Vordergrund gestellt.

---

<sup>7</sup> Gibson, J.J., *The Senses Considered as Perceptual Systems*, Greenwood Press, Publishers (1966)

<sup>8</sup> Turvey, M.T., *Preliminaries to a Theory of Action with Reference to Vision*: In R.Shaw et al., *Perceiving, Action and Knowing: Toward an Ecological Psychology*, Hillsdale, NJ; Erlbaum, 211-265 (1977)

<sup>9</sup> Bernstein, N., *The Coordination and Regulation of Movements*, Oxford: Pergamon Press (1967)

### 2.2.2 Definition des Motor-Programms

1917 beschrieb Lashley<sup>10</sup> die Bewegungen eines Patienten, der trotz Verlust der afferenten Nerven der unteren Extremitäten seine Beine noch mit grosser Genauigkeit setzen konnte. Durch die Verletzung war es dem Patienten nicht mehr möglich, die propriozeptive Rückkopplung zur Steuerung der Bewegung heranzuziehen. Das Setzen der Beine unterliegt also einem vorbestimmten Bewegungsablauf, ohne dass eine Rückkopplung zur Steuerung der Bewegung notwendig ist. Lashley bezeichnete dies als Motor-Programm. Keele<sup>11</sup> definierte das Motor-Programm als eine Sequenz von Bewegungsbefehlen, die vor der Bewegungsausführung bestimmt werden und dann ohne den Einfluss von Rückkopplungen ablaufen. Verschiedene Tierstudien unterstützen diese Darstellung. Taub<sup>12</sup> zeigte, dass eine Durchtrennung der afferenten Nervenbahnen Affen beim Klettern und Schwingen nicht grundsätzlich behinderte. Grillen, deren afferente Nervenbahnen der Flügel durchtrennt wurden, zeigten auf einen elektrischen Impuls hin normalen Flügelschlag, wie wenn sie im Flug wären (Wilson<sup>13</sup>). Auch das Gehen und das Laufen von Katzen sowie Kakerlaken sind vorbestimmte Bewegungsabläufe, wie Pearson<sup>14</sup> in seiner Zusammenfassung feststellt. Die in diesen Tierversuchen beschriebenen Bewegungsabläufe sind vermutlich genetisch vorbestimmt, damit ein Ueberleben in der Natur gewährleistet ist. Wie weit genetisch vorbestimmte Bewegungsabläufe auch beim Menschen zu finden sind, ist nicht klar. Es gibt Hinweise, dass Reflexe (z.B. tonischer Nackenreflex), die beim Neugeborenen beobachtet werden können, als grundlegende Bewegungsmuster für Bewegungsabläufe im späteren Leben dienen (Hellebradt<sup>15</sup>, Fukuda<sup>16</sup>). Im allgemeinen geht man aber davon aus, dass Bewegungsabläufe erlernt werden und dadurch Motor-Programme entstehen.

---

<sup>10</sup> Lashley, K.S., The Accuracy of Movement in the Absence of Excitation from the Moving Organ, *American Journal of Physiology*, 43, 169-194 (1917)

<sup>11</sup> Keele, S.W., Movement Control in Skilled Motor Performance, *Psychological Bulletin*, 70, 387-403 (1968)

<sup>12</sup> Taub, E., Bermann, A.J., Movement and Learning in the Absence of Sensory Feedback: In Freeman S.J., *the Neurophysiology of Spatially Oriented Behaviour*, Homewood; Dorsey, 173-192 (1968)

<sup>13</sup> Wilson, D.M., The Central Nervous Control of Flight in a Locust, *Journal of Experimental Biology*, 38, 471-490 (1961)

<sup>14</sup> Pearson, K., The Control of Walking, *Scientific American*, 235, 72-87 (1976)

<sup>15</sup> Hellebradt, F.A., Tonic Neck Reflexes in Exercises of Stress in Man, *American Journal of Physical Medicine*, 35, 144-159 (1956)

<sup>16</sup> Fukuda, Studies on Human Dynamic Postures from the Viewpoint of Postural Reflexes, *Acta Otolaryngologica*, 161, 1-52 (1961)



### 2.2.3 Die Rolle der Rückkopplung im Motor-Programm

Nach den oben erwähnten Studien scheint ein Motor-Programm ohne Hilfe einer Rückkopplung ablaufen zu können (Keele<sup>11</sup>). Für das Erlernen von Motor-Programmen werden aber Rückkopplungen herangezogen (Adams<sup>17</sup>). Studien an jungen Buchfinken, nordamerikanischen Weisskopf-Ammerfinken und australischen Zebrafinken zeigten, dass ihr Gesang von älteren Vögeln erlernt und nicht vererbt wird (Nottebohm<sup>18</sup>). Konishi<sup>19</sup> zeigte, dass ein Gesang nur erlernt wird, wenn während der Lernphase das Gehör des Singvogels nicht gestört ist. Die Rückkopplung des eigenen Gesangs ist also notwendig, um das Singen zu erlernen. Wenn der Gesang einmal erlernt ist, kann der Vogel auch nach Verlust des Gehörs weiter normal singen. Der Aufbau des Motor-Programms zur Steuerung des Gesangs ist also abhängig von der akustischen Rückkopplung. Ist das Motor-Programm einmal vorhanden, braucht es keine akustische Rückkopplung mehr. Auch beim Menschen spielen Rückkopplungen eine wichtige Rolle beim Erlernen und Optimieren von komplexen Bewegungsabläufen (Adams<sup>20</sup>). Sie werden vor allem zum Vergleich mit einem Sollwert (Zielsetzung der Bewegung) herangezogen, so dass in der nächsten Bewegung die relative Abweichung zum Sollwert korrigiert werden kann (Prinzip des "Knowledge of Results"). Es ist nicht geklärt, welcher Rückkopplungsmechanismus und wie die Rückkopplung das Erlernen und Optimieren von Bewegungsabläufen unterstützt.

Für erlernte Bewegungen werden Rückkopplungen nur noch zur Kontrolle (Ueberwachung) und nicht mehr zur direkten Kontrolle des Bewegungsablaufs eingesetzt. Gentner<sup>21</sup> kommt zum Schluss, dass bei ungeübten Maschinenschreibern die Einzelprozesse seriell ablaufen, bei geübten Schreibern sich die Einzelprozesse aber überlappen. Bei der hohen Eingabegeschwindigkeit von geübten Maschinenschreibern (ca. 60 Worte/min) wäre eine direkte Rückkopplung zur Steuerung der Fingerbewegung allein aus zeitlichen Gründen nicht möglich. Schreibfehler werden aber trotzdem erkannt, oft sogar

<sup>17</sup> Adams, J.A., A Closed-Loop Theory of Motor Learning, *Journal of Motor Behavior*, 3 (2), 111-149 (1971)

<sup>18</sup> Nottebohm, F., Ontogeny of Bird Song, *Science*, 167, 950-956 (1970)

<sup>19</sup> Konishi, M., The Role of Auditory Feedback in the Control of Vocalization in the White Crowned Sparrow, *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 22, 770-783 (1965)

<sup>20</sup> Adams, J.A., Historical Review and Appraisal of Research on the Learning, Retention and Transfer of Human Skills, *Psychological Bulletin*, 101 (1), 41-74 (1987)

<sup>21</sup> Gentner, D.R., The Acquisition of Typewriting Skill, *Acta Psychologica* 54, 233-248 (1983)

bevor sie getippt werden (Rabbitt<sup>22</sup>). In einer Studie zeigten Rothwell et al.<sup>23</sup>, dass ein Patient trotz Verlustes von Berührungs-, Bewegungs- und Positionsgefühlen in der Hand und ohne visuelle Rückkopplung mit dem Zeigefinger noch Quadrate, Kreise und Achten zeichnen konnte. Bei einer Übung, bei der er nacheinander seine fünf Finger mit dem Daumen berühren musste, konnte er zwar die Sequenzen Daumen-erster Finger, Daumen-zweiter Fingers etc. aufrecht erhalten, wurde aber zusehends unpräziser mit der Berührungsgenauigkeit. Bei gesunden Leuten scheint also ein Überwachungsmechanismus der Bewegung vorhanden zu sein, der die Zielposition der Bewegung immer wieder neu definiert und korrigiert. Die Information, die die Bewegung steuert, wird zugleich in ein Vergleichszentrum kopiert und dort mit den afferenten (rückgeführten) Signalen verglichen (siehe Abb. 2.3). Diese parallele Verarbeitung erlaubt es dem System, sehr schnell auf eventuelle Fehler zu reagieren, lässt aber das aktuell ablaufende Motor-Programm unbeeinflusst entsprechend dem internen Modell. Salthouse<sup>24</sup> bemerkte, dass die Eingabegeschwindigkeit geübter Personen auf einer alphanumerischen Tastatur etwa doppelt so schnell ist wie die Reaktionszeit (250 Millisekunden), die es braucht, um auf ein Signal hin einen Knopf zu drücken. Die hohe Eingabegeschwindigkeit kann also nur erreicht werden, wenn die Prozesse im Gehirn, die die Bewegung steuern, parallel ablaufen, sich also überlappen.

Die ursprüngliche Definition von Keele, das Motor-Programm sei eine Sequenz von Bewegungsbefehlen, die noch vor der Bewegungsausführung definiert werde und dann ohne den Einfluss von Rückkopplung ablaufe, muss darum mit Vorsicht betrachtet werden. Vielmehr könnte man von einem System sprechen, das Bewegungssequenzen plant, ausführt und parallel dazu überwacht. Abbs et al.<sup>25</sup> zum Beispiel schrieben, dass das Motor-Programm nicht eine vordefinierte Sequenz von Bewegungen, sondern vielmehr dynamische Prozesse repräsentiert, wobei die Zielsetzung anhand von motorischen wie auch sensorischen Kriterien definiert werde. Das heisst, dass das Motor-Programm nicht nur motorische Elemente beinhaltet, sondern dass zugleich auch eine sensorische Konsequenz der Hand-

---

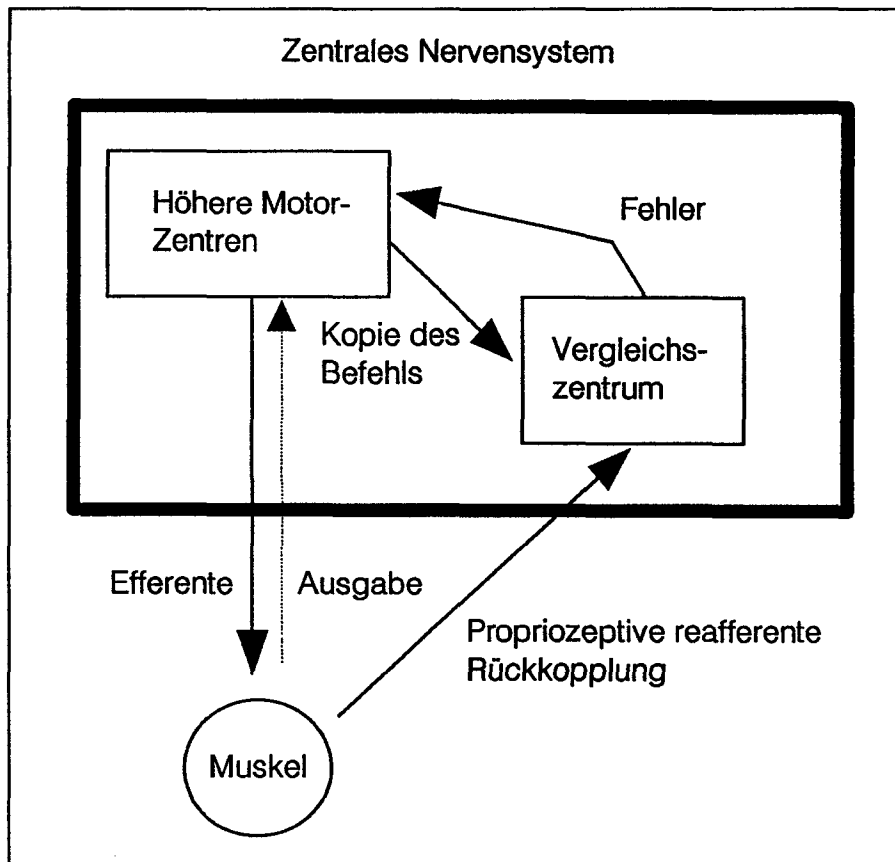
<sup>22</sup> Rabbitt, P., Detection of Errors by Skilled Typists, *Ergonomics*, 21 (11), 945-958 (1978)

<sup>23</sup> Rothwell, J.C., Traub, M., Day, B., Obeso, J., Thomas, B., Marsden C., Manual Motor Performance in Deafferented Man, *Brain*, 105, 515-542 (1982)

<sup>24</sup> Salthouse, T.A., The Skill of Typing, *Scientific American*, Feb. 250 (2), 94-100 (1984)

<sup>25</sup> Abbs, J.H., Gracco, V., Cole, K., Control of multi-joint movement coordination: Sensorimotor mechanisms in speech motor programming, *Journal of Motor Behavior*, 16, 195-231 (1984)

lung oder des Bewegungsablaufs definiert wird (Corollary discharge, Evarts<sup>26</sup>). Im gleichen Sinn beschreibt Cruse et al.<sup>27</sup> das Motor-Programm als eine dem Bewegungssystem untergeordnete Struktur, welche unabhängig Kontrollsignale zur Bewegungssteuerung an die Peripherie schickt, aber zugleich auch sensorische Informationen verarbeitet.



**Abb. 2.3:** Die Efferenzkopie nach von Holst<sup>28</sup>  
Der Befehl vom ZNS an den Muskel wird zugleich auch in ein Vergleichszentrum im ZNS kopiert und dort mit den afferenten Signalen verglichen.

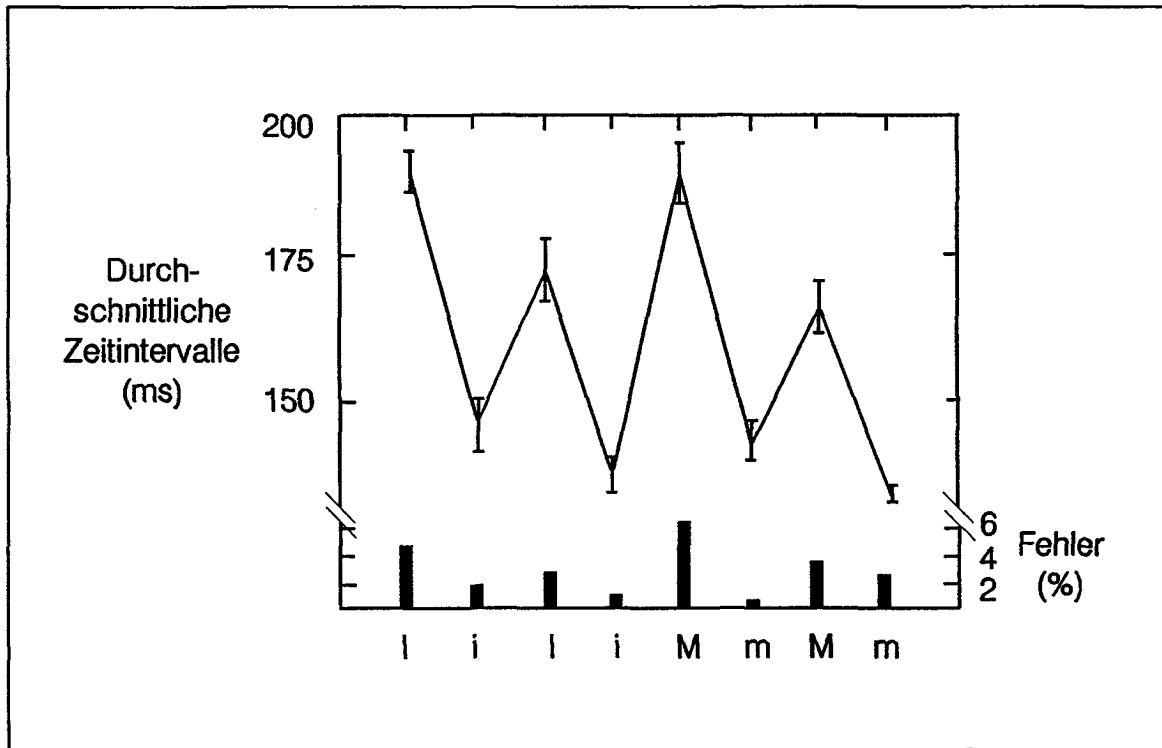
<sup>26</sup> Evarts, E.V., Feedback and Corollary Discharge: A Merging of the Concepts, Neuroscience Research Program Bulletin, 9, 86-112 (1971)

<sup>27</sup> Cruse, H., Dean, J., Heuer, H., Schmidt R.A., Information for Motor Control: In Neumann, O., & Prinz, W. (Ed), Relations between Perception and Action: Current approaches, Berlin, Springer Verlag (Im Druck)

<sup>28</sup> von Holst, E. und Mittelstädt, H., Das Refferenzprinzip: Wechselwirkungen zwischen Zentralnervensystem und Peripherie, die Naturwissenschaften, 37, 464-476 (1950)

## 2.2.4 Hierarchische Struktur des Motor-Programms

Die hierarchische Gliederung von Bewegungsabläufen wurde schon lange von verschiedenen Psychologen diskutiert (z.B. Miller et al.<sup>29</sup>). Vor kurzem publizierten Rosenbaum et al.<sup>30</sup> eine Studie, mit der sie zeigten, dass kurze Buchstabensequenzen, die direkt aus dem Gedächtnis auf einer Tastatur geschrieben wurden, nicht nur im Gedächtnis hierarchisch gegliedert sind, sondern auch die ausgeführten Bewegungen hierarchisch strukturiert sind.

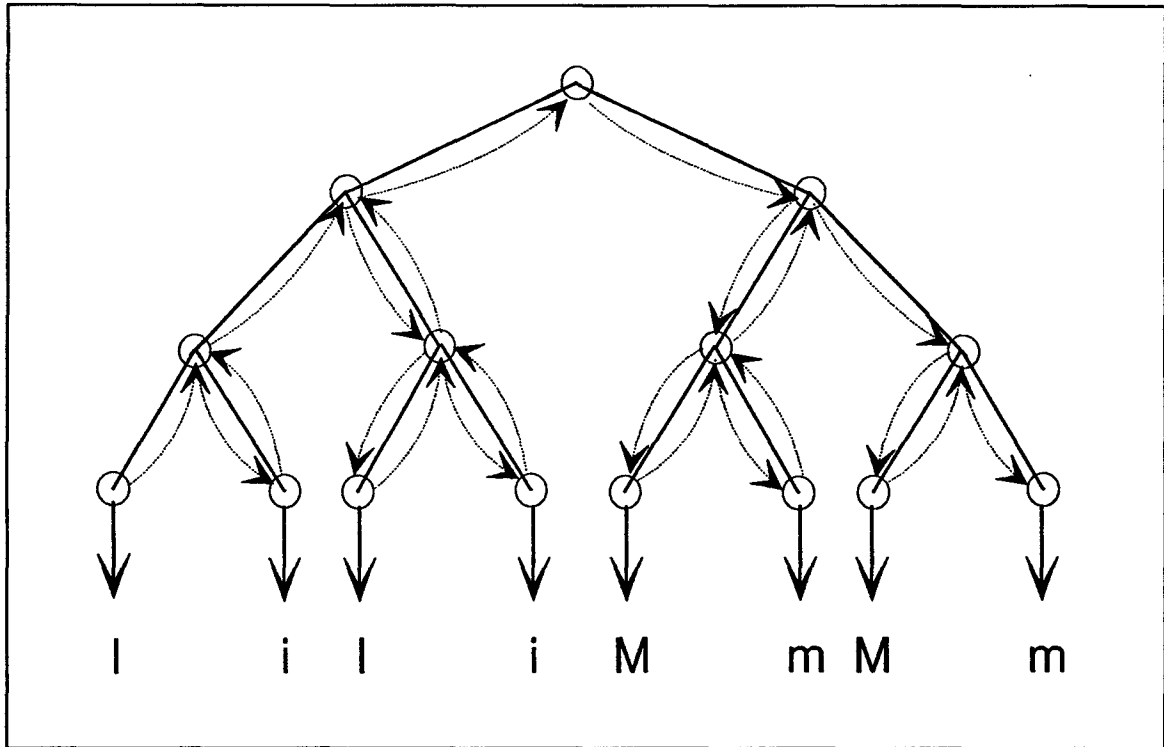


**Abb. 2.4:** Zeitintervalle zwischen den Buchstaben und Fehler einer erlernten und aus dem Gedächtnis abgetippten Buchstabensequenz. (Rosenbaum et al.<sup>30</sup>) (siehe Text).  
Die Zeitintervalle und Fehler, die in der ersten Position (l) aufgetragen sind, beziehen sich auf den Uebergang von einer Buchstabensequenz, die mit m beendet ist, zur nächsten, gleichen Buchstabensequenz, die wieder mit l beginnt. Die Sequenz wurde sechsmal wiederholt.

<sup>29</sup> Miller, A.G., Galanter, E., Pribram, H., Plans and the Structure of Behaviour, New York: Holt, Rinehart and Winston (1960)

<sup>30</sup> Rosenbaum, D.A., Keny, S. and Derr, M.A., Hierarchical Control of Rapid Movement Sequences, Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 9, 86-102 (1983)

Eine typische Sequenz, die sie für ihre Studie verwendeten, war *IiIiMmMm*, wobei *I* mit dem rechten und *i* mit dem linken Zeigefinger und *M* mit dem rechten und *m* mit dem linken Mittelfinger geschrieben wurden. Abbildung 2.4 zeigt die durchschnittlichen Zeitintervalle zwischen den eingegebenen Buchstaben. Die Zeitintervalle zwischen *m* und *I* und zwischen *i* und *M* waren am längsten, gefolgt von den Zeitintervallen zwischen *i* und *I* und zwischen *m* und *M*.



**Abb. 2.5:** Baumstruktur-Modell von Rosenbaum et al.<sup>30</sup>.  
Die Baumstruktur wird während der Eingabe der Buchstabensequenz von einer Seite zur anderen Seite durchquert. Eine typische Buchstabensequenz, die er für seine Studie verwendete, war *IiIiMmMm*, wobei sich *I* auf den rechten und *i* auf den linken Zeigefinger und *M* auf den rechten und *m* auf den linken Mittelfinger beziehen.

Diese Resultate erklärte Rosenbaum et al. an einem Baumstruktur-Modell, das während der Eingabe der Buchstabensequenz durchquert werden musste (siehe Abb. 2.5). Für diese Ausführung setzte er voraus, dass ein Motor-Programm zum Schreiben der Buchstabensequenz herangezogen wird und dieses hierarchisch strukturiert ist. Die Durchquerung der Baumstruktur könnte mit einer Kartei verglichen werden. Um eine Akte zu finden, muss eine bestimmte Schublade im Karteikasten geöffnet, ein bestimmter Ordner heraus-

gezogen und die Akte im Ordner lokalisiert werden. Wenn die nächste Akte im gleichen Ordner zu finden ist, geht es relativ schnell. Länger geht es, wenn die Akte in einem anderen Ordner zu finden ist usw. Die Durchquerung dieser Baumstruktur ergibt eine gute Übereinstimmung mit den Zeitintervallen, die Rosenbaum et al. gemessen hat. Zum gleichen Resultat kamen auch Collard und Povel<sup>31</sup>, die in ihrer Studie nicht Buchstabensequenzen, sondern Zahlensequenzen verwendeten. Die Buchstaben- oder Zahlensequenz ist also hierarchisch strukturiert und wird auch nach derselben hierarchischen Struktur ausgeführt. Nach neueren Erkenntnissen laufen diese Prozesse parallel ab.<sup>32</sup> Die Probanden können die Buchstaben- oder Zahlensequenz noch modifizieren oder "editieren", während bereits die Sequenzen ausgeführt werden.

Nach Sternberg et al.<sup>33</sup> nimmt neben den Zwischen-Ziffer-Zeiten auch die Reaktionszeit mit der Komplexität einer Buchstabensequenz zu. Die Buchstabensequenz wird in einem Motor-Programm-Speicher abgelegt. Zu jedem Buchstaben gehört ein spezifisches Unterprogramm, das den Bewegungsablauf zur Eingabe des Buchstabens steuert. Wenn der Befehl zur Ausführung der Buchstabensequenz gegeben ist, wird das erste Unterprogramm im Motor-Programm-Speicher gesucht, das zweite, das dritte usw. Da die Unterprogramme zufällig im Speicher verteilt stehen, bestimmt die Grösse des Speichers auch die mittlere Suchzeit. Mit der Anzahl der zu schreibenden Buchstaben nehmen die mittleren Reaktionszeiten sowie die mittleren Zwischen-Ziffer-Zeiten zu (siehe Abb. 2.6.).

Das Motor-Programm-Speicher-Konzept wird durch eine Studie von Kornbrot<sup>34</sup> gestützt. Im Gegensatz zu Sternberg et al.<sup>33</sup> unterscheidet sie aber zwischen der Organisation der Vorbereitungsphase und der Organisation der Ausführungsphase einer Schreibsequenz. Zwar werden beide Phasen durch die Tastensequenz beeinflusst (z.B. eine mit den Fingern der rechten Hand und der linken Hand geschriebene oder eine nur mit den Fingern einer

---

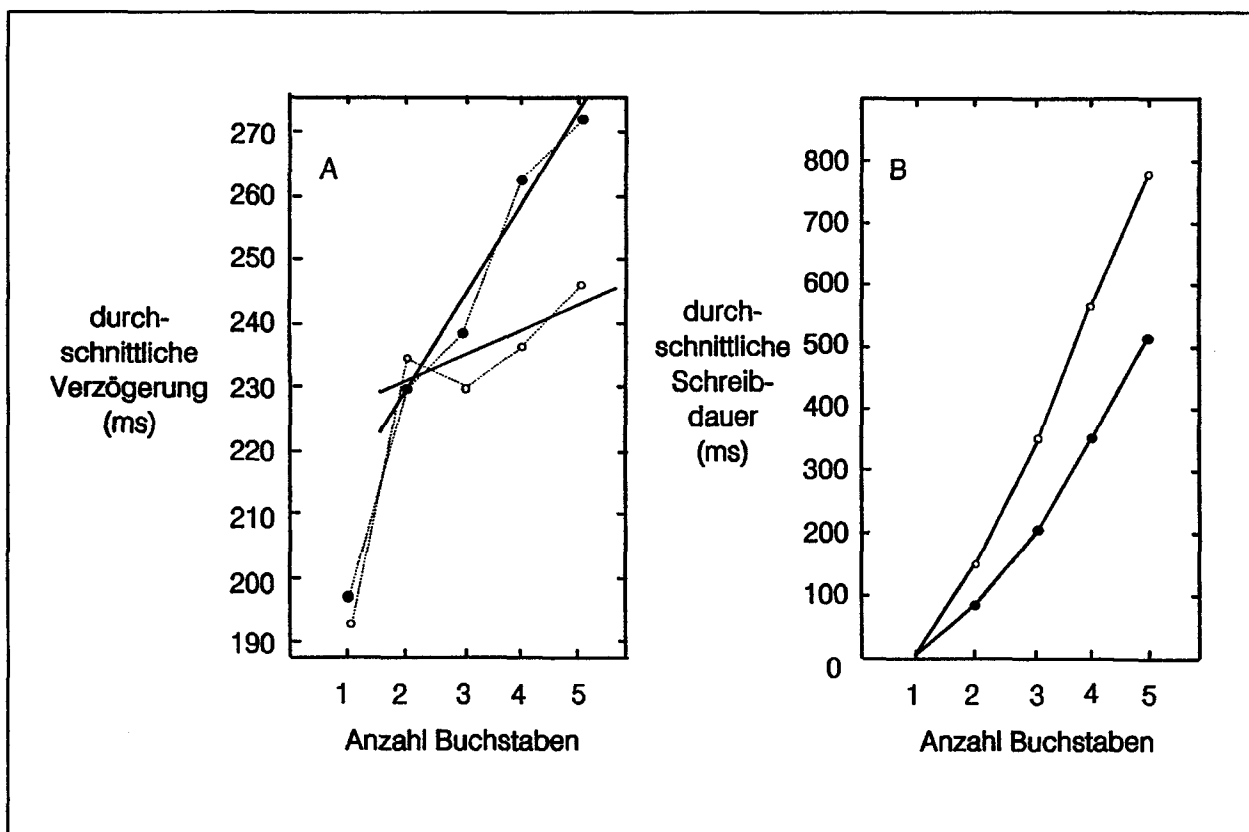
<sup>31</sup> Collard, R. and Povel D.J., Theory of Serial Pattern Production: Tree Traversals, *Psychological Review* 89, 6, 693-707 (1982)

<sup>32</sup> Rosenbaum, A.D., van Hindorff, Munoro, M., Scheduling and Programming of Rapid Finger Sequences: Tests and Elaborations of the Hierarchical Editor Model, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13, 2, 193-203 (1987)

<sup>33</sup> Sternberg, S., Monsell, S., Knoll, R., Wright, C., the Latency and Duration of Rapid Movement Sequences: Comparison of Speech and Typewriting; in Stelmach G.E., *Information Processing in Motor Control and Learning*, Academic Press, New York, 117-152 (1978)

<sup>34</sup> Kornbrot, D.E., Organization of Keying Skills: The Effect of Motor Complexity and Number of Units, *Acta Psychologica*, 70, 19-41 (1989)

Hand geschriebene Tastensequenz), der Einfluss ist aber für jede Phase verschieden. Diese Studie fand auch eine stark ausgeprägte hierarchische Struktur im Motor-Programm-Speicher, die nicht nur durch motorische Handlungen wie Hand- oder Fingerwiederholungen geprägt wurde, sondern durch eigene kognitive Handlungsstrukturen bestimmt wurde.



**Abb. 2.6:** Maschinengeschriebene Buchstabensequenzen, geschrieben mit beiden Händen (--●--) und nur mit einer Hand (--○--). (Sternberg et al.<sup>33</sup>)

A Die durchschnittliche Verzögerung zwischen einem Signal, auf welches der Proband eine Sequenz von n Buchstaben tippen muss, und dem Drücken der ersten Taste.

B Die durchschnittliche Dauer, die zum Schreiben der ganzen Buchstabensequenz benötigt wird.

Es gibt aber auch Hinweise, dass unter Feldbedingungen, wie zum Beispiel beim Maschinenschreiben mit 10 Fingern auf einer Tastatur, das Motor-Programm-Speicher-Konzept nicht mehr anwendbar ist. In seinen Studien fand Salthouse<sup>35</sup>, dass die Zeit bis zum ersten Tastenanschlag eines Wortes nicht von der Länge des Wortes abhängig ist. Kontinuierlich geschriebener Text scheint also anders organisiert zu werden als nur memorisierter Text.

<sup>35</sup> Salthouse, T.A., The Skill of Typing, Scientific American, Feb. 250 (2), 94-100 (1984)

Wie Keele<sup>36</sup> bemerkte, liegt einer der grossen Vorteile einer hierarchischen Struktur darin, dass Sequenzen höherer Stufen in der Hierarchie neu geordnet werden können, ohne dass die Sequenzen tieferer Stufen neu erlernt werden müssen. Wenn man zum Beispiel ein neues Wort lernt, müssen die dazugehörigen Buchstaben nicht neu erlernt werden. Wenn man einen ganzen Satz neu lernt, müssen die dazugehörigen Wörter nicht neu erlernt werden. MacKay<sup>37 38</sup> zeigte in einer Studie mit zweisprachigen Probanden (Englisch und Deutsch), dass die Sprechleistung ganzer Sätze von einer Sprache zur anderen übertragen werden kann. Nach MacKay wird der Satz hierarchisch gegliedert. Die obersten Stufen der Hierarchie, wie die Aufteilung des Satzes in Substantive und Verben etc., sind noch in beide Sprachen übertragbar. Er nennt dies die konzeptionelle Ebene. In den tieferen Stufen der Hierarchie wird das Konzept dann in Wörter spezifisch zu jeder Sprache aufgeteilt. Da die Probanden zweisprachig waren und schon jahrelange Erfahrung mit den beiden Sprachen hatten, konnte angenommen werden, dass das Uebersetzen in die einzelnen Wörter keine Mühe machte. Der Lerneffekt muss also auf der konzeptionellen Ebene der Hierarchie stattgefunden haben. Das heisst also, dass eine Sequenz, dargestellt in den oberen Stufen der Hierarchie, unabhängig von der speziellen Ausführung ist. Die gleiche Darstellung einer Sequenz kann also die Schnittstelle zu zwei verschiedenen Ausführungen sein. In diesem Fall war die Ausführung in Deutsch oder in Englisch.

### **2.2.5 Modularer Aufbau eines Motor-Programms**

Die Studien von Mackay weisen darauf hin, dass ein Motor-Programm das Resultat einer Zusammenarbeit verschiedener spezialisierter Module im ZNS ist ("Schema Theory", Schmidt<sup>39</sup>). Arbib<sup>40 41</sup> folgert zum Beispiel, dass das Ergreifen eines Objekts in Zu-

<sup>36</sup> Keele, S.W., Cohen, A., Ivry, R.B., Motor Programs: Concepts and Issues: In Jeannerod, M., Attention and Performance XIII, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 77-110 (1990)

<sup>37</sup> MacKay, D.G., The Problem of Flexibility and Fluency in Skilled Behavior, Psychological Review, 89, 483-506 (1982)

<sup>38</sup> MacKay, D.G., The Problem of Rehearsal or Mental Practice, Journal of Motor Behavior, 13 (4), 274-285 (1981)

<sup>39</sup> Schmidt, R.A., A Schema Theory of Discrete Motor Skill Learning, Psychological Review, 82 (4), 225-260 (1975)

<sup>40</sup> Arbib, M.A., Perceptual Structures and Distributed Motor Control: In Brooks V.D., Handbook of Physiology-The Nervous System II. Motor Control, Bethesda, MD: American Physiological Society, 1449-1480 (1981)



sammenarbeit mit den Modulen (Schemas), Standortbestimmung des Objekts, Formbestimmung des Objekts und Orientierung des Objekts, zustande kommt. Ein Modul kann auch für verschiedene Handlungen eingesetzt werden. Das visuelle System zum Beispiel, das zur Bestimmung des Standorts eines Objekts herangezogen wird, wird nicht nur für das Motor-Programm eingesetzt, um das Objekt zu erreichen, sondern kann auch für die verbale Beschreibung des Standorts des Objekts zur Verfügung stehen. Keele<sup>42</sup> zeigte, dass sich die Fähigkeit, regelmässige Zeitintervalle zu produzieren, nicht nur auf einen Effektor allein beschränkt, sondern auch für andere Effektoren (Finger, Arm und Fuss) gleich bleibt. Die Fähigkeit, regelmässige Zeitintervalle zu produzieren, korreliert auch stark mit der Wahrnehmung von Zeitintervallen zwischen akustischen Signalen. Für die Wahrnehmung und für motorische Handlungen scheint ein und dasselbe Zeitmessverfahren zur Verfügung zu stehen. Studien an Patienten mit neuronalen Schäden weisen darauf hin, dass der laterale Teil des Cerebellums als Zeitgeber in Frage kommt (Ivry<sup>43 44</sup>). Nach Keele<sup>45</sup> und Ivry<sup>44</sup> sind der Zeitmechanismus und die Bestimmung der Kraft notwendig für die Steuerung eines Bewegungsablaufs oder die Wahrnehmung der Lautheit akustischer Signale, unabhängige Module, die während eines Bewegungsablaufs nicht korrelieren. Eine Handlung ist also das Zusammenspiel verschiedener spezialisierter Module. Dieselben Module sind aber auch für andere Handlungen verfügbar.

Ein weiterer Hinweis für eine effektorunabhängige Darstellung eines komplexen Bewegungsablaufs kommt von der grundlegenden Arbeit von Raibert<sup>46</sup> (siehe Abb. 2.7). Die fünf Schriftzüge, die er darstellte, zeigen eine grosse Aehnlichkeit, obwohl sie mit ganz verschiedenen Effektoren geschrieben wurden.

---

<sup>41</sup> Arbib, M.A., Programs, Schemas, and Neural Networks for Control of Hand Movements: Beyond the RS Framework: In Jeannerod, M., Attention and Performance XIII, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 111-138 (1990)

<sup>42</sup> Keele, S.W., Parkarny, R.A., Corcos, D., Ivry, R., Do Perception and Production Share Common Timing Mechanisms: A Correlational Analysis, *Acta Psychologica*, 60, 173-191 (1985)

<sup>43</sup> Ivry, R.B., Keele, S.W., Diener, H., Dissociation of the lateral and Medial Cerebellum in Movement Timing and Movement Execution, *Experimental Brain Research*, 73, 167-180 (1988)

<sup>44</sup> Ivry, R.B., Keele, S.W., Timing Functions of the Cerebellum, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1 (2), 136-152 (1989)

<sup>45</sup> Keele, S.W., Ivry, R.B., Pokorny, R., Force Control and its Relation to Timing, *Journal of Motor Behavior*, 19, 96-114 (1987)

<sup>46</sup> Raibert, M.H., Motor Control and Learning by the State Space Model, Doctoral Dissertation, MIT (1977): Uebernommen aus Kelso, J.A.S., *Human Motor Behavior*, Lawrence Erlbaum Associates, Seite 173 (1982)

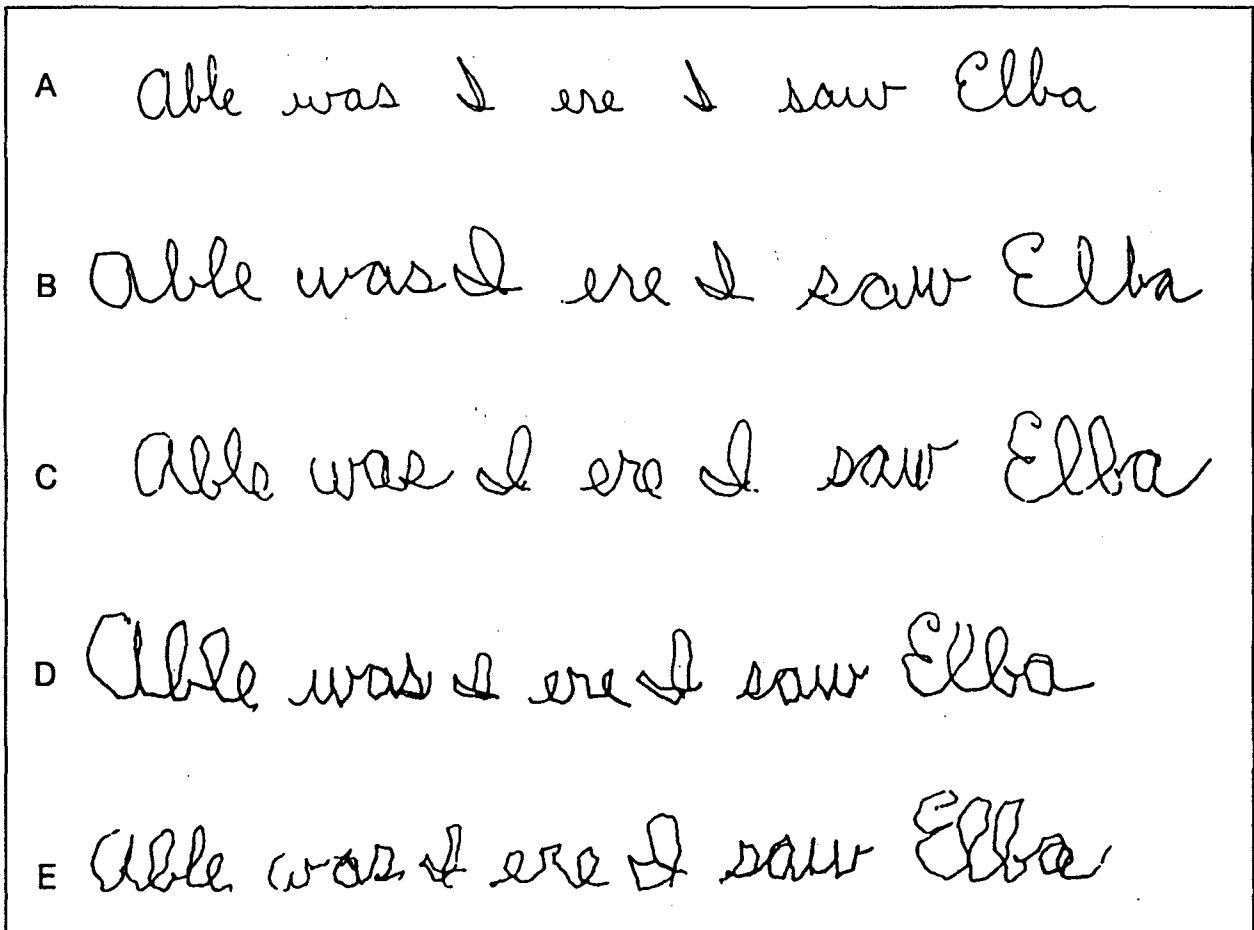


Abb. 2.7: Darstellung von fünf Sätzen, die von ein und derselben Person geschrieben wurden. (Raibert<sup>46</sup>)

- A Mit der rechten Hand geschrieben
- B Mit dem rechten Arm geschrieben
- C Mit der linken Hand geschrieben
- D Mit dem Mund geschrieben, indem der Schreibstift mit den Zähnen festgehalten wurde
- E Mit dem rechten Fuss geschrieben, indem der Stift am Fuss angeklebt wurde.

Wright<sup>47</sup> bemerkte allerdings zu Recht, dass bei einer genaueren Analyse der Bewegungsabläufe die Aehnlichkeit der mit verschiedenen Effektoren geschriebenen Schriftzüge nicht mehr so deutlich ist. Er folgerte aus seinen Untersuchungen, dass die Aehnlichkeit der von dominanter und nicht dominanter Hand geschriebenen Schriftzüge nur noch auf einer Ebene mit äusserst abstrakter, räumlicher Darstellung der Schriftzüge zu finden ist. Ganz im Gegensatz fand er aber, dass mit dominanter Hand und dominantem Arm geschriebene

<sup>47</sup> Wright, C.E., Generalized Motor Programs: Reexamining Claims of Effector Independence in Writing: In Jeannerod, M., Attention and Performance XIII, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 294-320 (1990)

Schriftzüge auch in tieferen Ebenen der "motorischen" Hierarchie noch Gemeinsamkeiten aufweisen.

Aus verschiedenen Studien mit Patienten, die Probleme beim Schreiben mit der Hand zeigten, folgerte auch Margolin<sup>48</sup>, dass eine Handlung durch die Zusammenarbeit verschiedener spezialisierter Module zustande kommen muss. Anhand seines Modells werden Buchstabensequenzen in einem orthographischen Speicher abgelegt. Motorische Handlungen, wie Abtippen, Handschreiben oder Buchstabieren, benutzen alle die Information dieses Speichers. Die Buchstabensequenz im orthographischen Speicher wird hingegen aus einem phonologischen Speicher oder aus einem semantischen Speicher abgeleitet. Margolins Modell bleibt aber als Hypothese stehen, da eine experimentelle Prüfung noch aussteht.

Keele und Ivry<sup>49</sup> hingegen konnten experimentell zeigen, dass die Darstellung einer Sequenz von Zahlen im ZNS unabhängig von der eigentlichen motorischen Ausführung dieser Sequenz ist. Die Wiedergabe einer erlernten Zahlensequenz war auf verschiedene Effektoren übertragbar. Die Hypothese eines modularen Aufbaus eines Motor-Programms wird also durch eine Reihe verschiedener Studien gestützt, muss aber noch mit gezielten Studien verifiziert werden.

---

<sup>48</sup> Margolin, D.J., *The Neurophysiology of Writing and Spelling: Semantic, Phonological, Motor and Perceptual Processes*, Quarterly Journal of Experimental Psychology, 36A, 459-489 (1984)

<sup>49</sup> Keele, S.W., Cohen, A., Ivry, R.b., *Motor Programs: Concepts and Issues*: In Jeannerod, M., *Attention and Performance XIII*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 77-110 (1990)

### 2.2.6 Zeitliche Struktur im Motor-Programm

Wie schon im Abschnitt 2.2.5 erwähnt wurde, spielt das Cerebellum in der zeitlichen Koordination motorischer Handlungen eine wichtige Rolle. Interessant ist auch die Fähigkeit, zeitlich erlernte Koordination nicht nur auf verschiedene Effektoren, sondern auch auf verschiedene Modalitäten (z.B. die Wahrnehmung) zu übertragen. Diese Erkenntnis unterstützt die These eines unabhängigen Zeitgebers, wie er von Wing und Kristofferson<sup>50</sup> vorgeschlagen wurde. Nach deren Modell initialisiert ein zentraler Zeitgeber motorische Aktionen. Nach der Initialisierung der motorischen Aktion vergeht aber einige Zeit bis zur eigentlichen Ausführung der Aktion (motorische Verzögerung).

Ein sehr interessanter Aspekt dieses Modells zeigt sich darin, dass die Streuung der Zeitgeberverzögerung und die der motorischen Verzögerung unabhängig voneinander sind (Wing<sup>51</sup>). Es scheint also eine zentrale Uhr zur Verfügung zu stehen, die motorische Sequenzen initialisiert. Die notwendige Zeit zur Ausführung der motorischen Aktion ist aber durch physikalische Grössen bestimmt, die den Bewegungsablauf steuern, und bleibt somit für einen bestimmten Bewegungsablauf in etwa konstant.

Ein sehr ähnliches Modell wie das von Wing und Kristofferson, aber mit einer hierarchischen Struktur wurde von Vorberg und Hambuch<sup>52</sup> vorgeschlagen. In ihrem Modell initialisiert ein höherer Zeitgeber einen hierarchisch tiefer liegenden Zeitgeber usw. Shaffer<sup>53</sup> sowie Vorberg und Hambuch<sup>54</sup> zeigten, dass bei komplexen zeitlichen Strukturen mit ungleichen Zeitintervallen (z.B. Klavierspiel) das hierarchische Zeitgebermodell Anwendung findet. Gleichmässige Intervalle (z.B. Schlagen zu einem Metronom) folgen aber dem linearen Modell von Wing und Kristofferson.

---

<sup>50</sup> Wing, A.M., Kristofferson, A.B., Response Delays and the Timing of Discrete Motor Responses, *Perception and Psychophysics*, 14, 5-12 (1973)

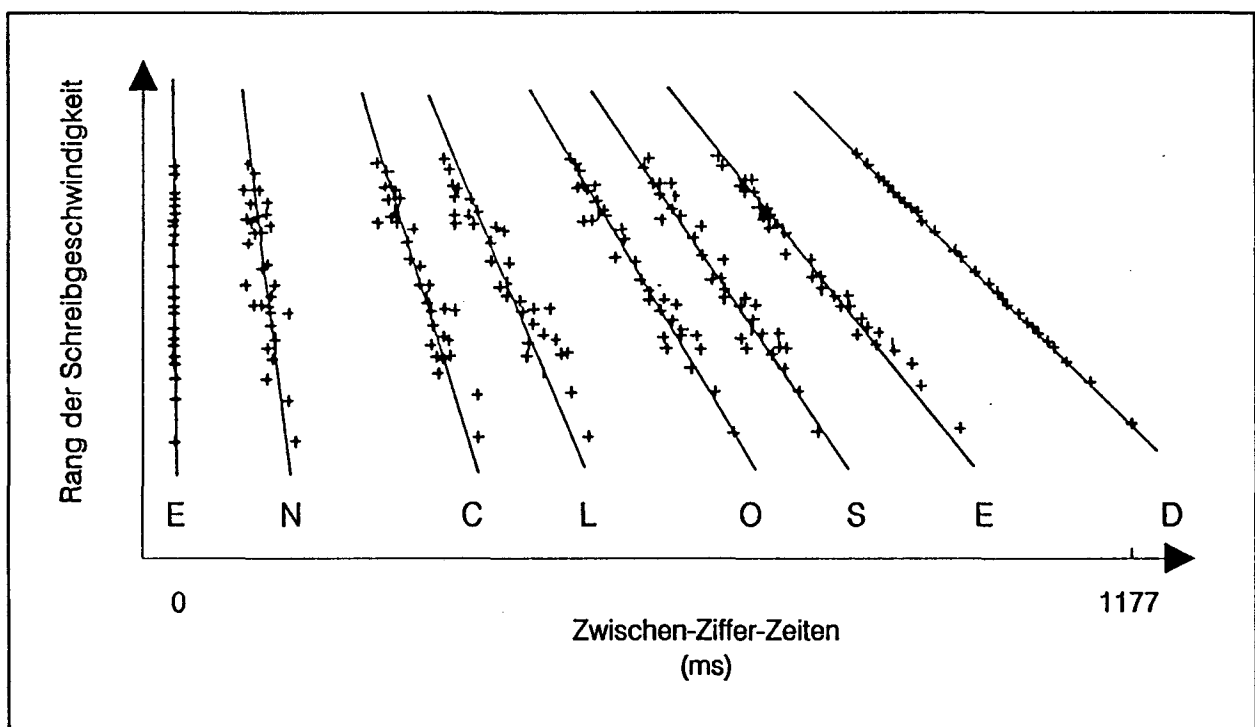
<sup>51</sup> Wing, A.M., the Long and Short of Timing in Response Sequences: In Stelmach, G.E. et al., *Tutorials in Motor Behavior*, North Holland, 469-486 (1980)

<sup>52</sup> Vorberg, D., Hambuch, R., On the Temporal Control of Rhythmic Performance: In Requin, J., (Ed.), *Attention and Performance VII*, Erlbaum, Hillsdale, NJ, 535-555 (1978)

<sup>53</sup> Shaffer, H., Timing in Musical Performance: In Gibbon, J., (Ed.), *Timing and Time Perception*, *Annals of the NY Academy of Sciences*, 420-428 (1984)

<sup>54</sup> Vorberg, D., Hambuch, R., Timing of Two-Handed Rhythmic Performance: In Gibbon, J., (Ed.), *Timing and Time Perception*, *Annals of the NY Academy of Sciences*, 390-406 (1984)

Eine Sequenz von Bewegungsabläufen ist auch geprägt durch eine eigene zeitliche Struktur. Summers<sup>55</sup> trainierte Probanden, 9 Tasten in einer bestimmten zeitlichen Reihenfolge zu drücken (z.B. in Abständen von 500 - 500 - 100 - 500 - 500 - 100 - 500 - 500 - 100 ms). Nach 500 Uebungen in dieser Reihenfolge mussten die Probanden dieselbe Tastensequenz drücken, aber dieses Mal so schnell sie konnten. Trotz der schnelleren Eingabe blieb der erlernte Rhythmus erhalten. Es scheint also, dass durch Uebung eine bestimmte zeitliche Sequenz von motorischen Handlungen festgelegt werden kann. Auch Shaffer<sup>56</sup> fand bestimmte Gruppen von Buchstabensequenzen, die beim Maschinenschreiben eine eigene zeitliche Struktur aufwiesen.



**Abb. 2.8:** Zeitliche Struktur des getippten Wortes "enclosed" (Terzuolo und Vivani<sup>57</sup>). In einem Text wurde das Wort "enclosed" von einem Probanden mehrmals mit verschiedenen Geschwindigkeiten geschrieben. Die zeitliche Struktur (Zwischen-Ziffer-Zeiten) jedes der geschriebenen "enclosed" wurde separat nach Rang seiner Schreibgeschwindigkeit untereinander (Y-Achse) aufgetragen. Dies ergab eine fächerförmige Darstellung der Zwischen-Ziffer-Zeiten.

<sup>55</sup> Summers, J.J., The Role of Timing in Motor Program Representation, *Journal of Motor Behavior*, 7, 229-241 (1975)

<sup>56</sup> Shaffer, L.H., Rhythm and Timing in Skill, *Psychological Review*, 89 (2), 109-122 (1982)

Nach Terzuolo und Vivani<sup>57</sup> werden sogar ganze Wörter mit einer erlernten und in sich konstanten zeitlichen Struktur geschrieben. Das heisst, dass unabhängig von der Schreibgeschwindigkeit das zeitliche Verhältnis zwischen den einzelnen Buchstaben des geschriebenen Wortes immer gleich bleibt. Wenn zum Beispiel ein erlerntes Wort mit vier Buchstaben in den zeitlichen Abständen zwischen den Buchstaben von 500, 250, 100 ms geschrieben wurde und dann in einem anderen Anlauf 1,2 mal langsamer geschrieben wurde, dann verändert sich nach Terzuolo und Vivani die zeitliche Struktur proportional und beträgt nun 600, 300, 120 ms. Trägt man die zeitliche Struktur eines Wortes, das in verschiedenen Geschwindigkeiten geschrieben wurde, nach Rang der Schreibgeschwindigkeit untereinander auf, so ergibt dies eine fächerförmige Darstellung (Abb. 2.8). Die Hypothese, dass die zeitliche Koordination einer erlernten Sequenz durch einen zentralen Zeitgeber bestimmt wird, liegt darum nahe. Wird eine Sequenz verlangsamt, dann muss nur der zentrale Zeitgeber verlangsamt werden. Dasselbe gilt auch beim Beschleunigen einer Sequenz.

### 2.2.7 Schlussfolgerungen

Der Mensch erlernt komplexe Bewegungsabläufe, die sich als Motor-Programme entfalten. Wie sich aus der Diskussion herausstellte, ist die ursprüngliche Definition, das Motor-Programm sei eine Sequenz von Bewegungsbefehlen, die noch vor der Bewegungsausführung definiert werde und dann ohne den Einfluss von Rückkopplung ablaufe, zu rigid. Vielmehr sollte man von einem allgemeinen Motor-Programm sprechen, das zwar ein Ziel definiert, aber den Bewegungsablauf nicht bis ins kleinste Detail vorbestimmt.

Der Ablauf einer Bewegung wird in groben Zügen in der höchsten Ebene der Hierarchie geplant und dann an das motorische System weitergegeben. Die Zielvorstellung der Bewegung ist also definiert und das motorische System darauf sensibilisiert. Die Ausführung der Bewegung ist dann das Resultat eines Zusammenspiels verschiedener spezialisierter Module. Informationen über den momentanen Zustand der Bewegung werden in allen Ebenen der Hierarchie rückgekoppelt und mit einem Soll-Wert (Efferenz-Kopie) verglichen. Das heisst, dass Rückkopplungen den Bewegungsablauf nicht direkt steuern,

---

<sup>57</sup> Terzuolo, C.A, Vivani, P., Determinants and Characteristics of Motor Patterns used for Typing, Neuroscience, 5, 1085-1103 (1980)

sondern den Bewegungsablauf überwachen. Neuere Studien<sup>58 59 60</sup> weisen darauf hin, dass sich während eines Bewegungsablaufs zwischen einzelnen Modulen Regelkreise bilden, die die Bewegung zum Ziel führen. Das macht das System robust. Bei unvorhergesehenen Einflüssen auf den Bewegungsablauf muss nämlich die Zielsetzung nicht unbedingt auf der höchsten Hierarchiestufe neu formuliert werden, sondern diese Eventualitäten können jetzt auch intermodular in tieferen Ebenen der Hierarchie geregelt werden.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich die folgende Definition eines Motor-Programms: Das Motor-Programm ist ein abstraktes Gebilde, das verschiedene spezialisierte Module involviert, die durch eine Zieldefinition lose verbunden sind, sich aber im Rahmen dieser Zieldefinition selber regulieren.

---

<sup>58</sup> Gordon, J. and Ghez, C., Trajectory Control in Target Force Impulses, *Experimental Brain Research*, 67, 253-269 (1987)

<sup>59</sup> Hening, W., Favilla, M., Ghez, C., Trajectory Control in Target Force Impulses, *Experimental Brain Research*, 71, 116-128 (1988)

<sup>60</sup> Parblanc, V., Pellison, D., Gaze Saccade Orienting and Hand Pointing are Locked to their Goal by Quick Internal Loops: In Jeannerod, M., *Attention and Performance XIII*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 653-676 (1990)

## 2.3 Studien über Rückkopplungen beim Schreiben auf einer Tastatur

### 2.3.1 Einleitung

Die Rückkopplung spielt nach wie vor eine zentrale Rolle bei der ergonomischen Beurteilung einer Tastatur (DIN<sup>61</sup>/ISO<sup>62</sup>). Aus traditioneller ergonomischer Sicht setzt sich das Maschinenschreiben aus einer Serie von "diskreten" Handlungen zusammen. Jede Handlung wird rückgekoppelt. Somit hat der Benutzer Gewähr, dass seine Handlung korrekt ausgeführt wurde und er zur nächsten Handlung übergehen kann. Wie in Abschnitt 2.2.3 diskutiert wurde, ist es fraglich, ob die Komplexität der Bewegungsabläufe beim Maschinenschreiben mit "diskreten" Handlung umfassend beschrieben werden kann. Vielmehr sollte zwischen geübten und ungeübten Maschinenschreibern unterschieden werden. Geübte Maschinenschreiber neigen eher zu einer "kontinuierlichen" Handlung als ungeübte, und die Aufgabe der Rückkopplungen verändert sich dementsprechend.

### 2.3.2 Interne (erlernte) Rückkopplung

Alden<sup>63</sup> berichtet in seiner Literaturzusammenfassung, dass zusätzliche Rückkopplungsmechanismen (visuell, akustisch etc.) vor allem in der Lernphase eine wichtige Rolle spielen. Geübte Benutzer haben gelernt, sich selber zu überwachen. Das heisst, im Laufe der Übungsphase wird ein Motor-Programm erstellt, mit dem jede Tippbewegung nicht nur gezielt ausgeführt, sondern auch überwacht werden kann. Arbeiten von Long<sup>64</sup> und Rabbitt<sup>65</sup> bestätigten dies insofern, als dass geübte Schreiber, denen die Tastatur sowie die geschriebene Kopie beim Schreiben abgedeckt wurden, also jegliche visuelle Kontrolle über die Fingerbewegung sowie über das Geschriebene entzogen wurde, immer noch die

---

<sup>61</sup> DIN 33401, Stellteile (1977)

<sup>62</sup> ISO/DIS 9241-4 (Draft Standard), Ergonomic Requirements for Office Work with Visual Display Terminals (VDTs), Part4: Keyboard Requirements (1992)

<sup>63</sup> Alden, D.G., Daniels, R., Kanarick, A., Keyboard Design and Operation: A Review of the Major Issues, Human Factors, 14 (4), 275-293 (1972)

<sup>64</sup> Long, J., Visual Feedback and Skilled Keying: Differential Effects of Masking the Printed Copy and the Keyboard, Ergonomics, 19 (1), 93-110 (1976)

<sup>65</sup> Rabbitt, P., Detection of Errors by Skilled Typists, Ergonomics, 21 (11), 945-958 (1978)



meisten gemachten Schreibfehler erkennen konnten. Sie folgerten aus ihren Arbeiten, dass geübte Maschinenschreiber vermehrt Gebrauch von internen (propriozeptiven) Rückkopplungsmechanismen (Muskelspannung und Sehnenspannung) machen und so auch ohne visuelle Kontrolle Fehler erkennen können. Dadurch kann das visuelle System für die Planung neuer Bewegungen eingesetzt werden (Feedforward), was das motorische System schneller und effizienter macht (Kelso<sup>66</sup>).

### 2.3.3 Akustische Rückkopplung

Wenn die akustische Rückkopplung in unregelmässigen oder verzögerten Zeitabständen auf eine Fingerbewegung folgt, werden ungeübte Schreiber in ihrer Schreibgeschwindigkeit langsamer. Geübte Schreiber werden aber nur kurze Zeit beeinflusst (Long<sup>67</sup>). Geübte Schreiber scheinen also besser adaptieren zu können, da sie vermehrt interne Rückkopplungsmechanismen zur Fehlererkennung heranziehen. Neuere Arbeiten zeigten bei geübten Schreibern, bei zusätzlicher akustischer Rückkopplung, eine Tendenz zu einer Leistungssteigerung (Brunner<sup>68</sup> Roe<sup>69</sup>). Vermutlich unterstützt die akustische Rückkopplung einen internen Taktgeber. Dadurch kann die Leistung "minimal" (nicht signifikant) gesteigert werden. Eine Schlussfolgerung, die auch von Terzuolo und Vivani<sup>70</sup> gezogen wurde.

### 2.3.4 Tastenweg, Druckpunkt und Stellkraft

Bei Tastaturen ohne Tastenweg (weglose Tastaturen) fehlt aus traditioneller ergonomischer Sicht ein wichtiger Rückkopplungsmechanismus, nämlich der Weg (kinästhetische Rückkopplung). Betrachtet man den Ablauf einer Tippbewegung, wird klar, dass

<sup>66</sup> Kelso, J.A., Human Motor Behaviour, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale New Jersey, 21-58 (1982)

<sup>67</sup> Long, J., Effects of Delayed Irregular Feedback on Unskilled and Skilled Keying Performance, Ergonomics, 19 (2), 183-202 (1976)

<sup>68</sup> Brunner, H., Richardson, R., Effects of Keyboard Design and Typing Skill on User Keyboard Preference and Throughput Performance, Proceedings of the Human Factors Society, 28<sup>th</sup> Annual Meeting, (1984)

<sup>69</sup> Roe, C.J., Muto, W., Feedback and Key Discrimination on Membrane Keypads, Proceedings of the Human Factors Society, 28<sup>th</sup> Annual Meeting, (1984)

<sup>70</sup> Terzuolo, C.A., Vivani, P., Determinants and Characteristics of Motor Patterns used for Typing, Neuroscience, 5, 1085-1103 (1980)

auch auf einer weglosen Tastatur der Finger einen bestimmten Weg zurücklegt. Der Weg als Rückkopplung ist also in den meisten Fällen auch auf einer weglosen Tastatur gewährleistet. Anders verhält es sich mit dem Druckpunkt, der auf einer weglosen Tastatur fehlt. Untersuchungen zeigten aber, dass die Schreibleistung auf konventionellen Tastaturen mit Weg sowie auf weglosen Folientastaturen für ungeübte Schreiber gleich war (Cohen<sup>71</sup>). Für geübte Schreiber wurde zwischen den beiden Tastaturtypen zu Beginn ein deutlicher Unterschied in der Leistung registriert. Aber schon nach kurzer Schreibzeit (von durchschnittlich 3 Std.) gewöhnten sich die Benutzer an die neue Tastatur. Die Leistung auf der weglosen Tastatur passte sich derjenigen auf der konventionellen Tastatur an. Bei ungeübten Schreibern fällt das Fehlen des Druckpunkts sehr wahrscheinlich nicht ins Gewicht, da vor allem visuelle Rückkopplungen für die Bewegungsoptimierung herangezogen werden. Bei geübten Schreibern, die sich bereits ein Motor-Programm zur Bedienung der Tastatur angeeignet haben, stört das Fehlen des Druckpunkts zu Beginn stark, kann aber durch Umlernen des Tippbewegungsablaufs schon bald kompensiert werden, wenn die Taste beim Tippen sicher auslöst und nicht nachgedrückt oder korrigiert werden muss. Wird die Taste schon mit wenig Kraft (kleiner als 0.5 Newton) ausgelöst oder ist die "Totzeit" (Zeit nach der Betätigung einer Taste, wo keine weitere Eingabe gemacht werden kann) zwischen den Tasten zu kurz (kleiner als 30 ms), können die Leistung sowie die Akzeptanz erheblich reduziert werden und zu Verkrampfungen im Unterarm führen (Rose<sup>72</sup>, Brunner<sup>73</sup>, Pollard<sup>74</sup>). Vermutlich fühlt sich der Benutzer unter diesen Schreibbedingungen unsicher, da die Taste auch ohne seine Absicht auslöst und er sich deshalb verkrampft. Kinkead und Gonzalez<sup>75</sup> empfehlen eine obere Grenze der Stellkraft (notwendige Kraft, um die Taste auszulösen) von 1,5 Newton. Sie entspricht der IBM-Empfehlung<sup>76</sup>. Deiningers<sup>77</sup> Untersuchungen an numerischen Tastaturen mit 10 Tasten

---

<sup>71</sup> Cohen Loeb, K.M., Membrane Keyboards and Human Performance, The Bell System Technical Journal, 62 (6), 1733-1749 (1983)

<sup>72</sup> Rose, M.J., Keyboard Operating Posture and Actuation Force: Implications for Muscle Over-Use, Applied Ergonomics, 22 (3), 198-203 (1991)

<sup>73</sup> Brunner, H., Richardson, R., Effects of Keyboard Design and Typing Skill on User Keyboard Preference and Throughput Performance, Proceedings of the Human Factors Society, 28<sup>th</sup> Annual Meeting, (1984)

<sup>74</sup> Pollard, D., The Effect of Feedback on Keying Performance, App. Ergonomics, 10 (4), 194-200 (1979)

<sup>75</sup> Kinkead, R.D., Gonzalez B.K., Human Factors Design Recommendations for Touch Operated Keyboards, Final Report (12091), Honeywell Inc (1969)

<sup>76</sup> IBM, Bildschirmgeräte am Arbeitsplatz - Benutzerakzeptanz (1982)

zeigten keine Unterschiede in der Leistung für Tastendrucke zwischen 1 und 4 Newton. Taylor<sup>78</sup> fand in seinen Untersuchungen, dass ein kleiner Tastenweg (2mm) und eine grosse Stellkraft (15 Newton) die besten Leistungen ergaben, wobei der Tastenweg vor allem die Eingabegeschwindigkeit beeinflusste und die Stellkraft die Fehlerrate verringerte. In seinem Experiment wurden die Tasten aber nur zum Ein- und Ausschalten und nicht zur kontinuierlichen Eingabe benutzt. Vermutlich ist der limitierende Faktor für das Erreichen einer optimalen Leistung und Akzeptanz nicht die Kraft allein, sondern die Kombination von Eingabegeschwindigkeit und Kraft. Bei der kontinuierlichen Eingabe auf alphanumerischen Tastaturen fällt die Stellkraft eher ins Gewicht als bei langsamer diskontinuierlicher Eingabe. In diesem Sinn wäre es interessant herauszufinden, wie sehr die Leistung durch ein zufälliges Variieren der Stellkraft während der Eingabe beeinflusst wird. Sicherlich würde das abgelegte Motor-Programm so stark durch das Variieren der Kraft gestört, dass keine kontinuierliche Eingabe mehr möglich wäre und dadurch die Leistung wie die Akzeptanz abnähme. Ein sicheres Auslösen der Taste wäre also die Voraussetzung für das Gelingen der Eingabe. "Smooth Key Movement" (interpretiert als sicheres Auslösen der Taste) wurde auch von Monty und Snyder<sup>79</sup> als wichtigster Einflussfaktor auf Leistung und Akzeptanz bezeichnet.

### 2.3.5 Form der Tasten

Es gibt nur sehr wenig Literatur über Vorzüge und Nachteile verschiedener Tastenformen. Richtlinien zur Gestaltung einer Tastatur beziehen sich nur auf die Grösse der Tasten (quadratisch, 12-15 mm Kantenlänge) und die Distanz zwischen den Tasten (18-20 mm, gemessen von Zentrum zu Zentrum) (Ericson<sup>80</sup>). Tastenrand oder eine fingerführende konkave Wölbung auf der Taste werden nicht erwähnt. Auf konventionellen Wegtastaturen ist ein Tastenrand durch die Trennung der Tasten automatisch gewährleistet. Für weglose

---

<sup>77</sup> Deininger, R.L., Human Factors Engineering Studies of the Design and Use of Pushbutton Telephone Sets, Bell Systems Technical Journal, 39, 995-1012 (1960)

<sup>78</sup> Taylor, R.M., Berman, J., Ergonomics Aspects of Aircraft Keyboard Design: The Effects of Gloves and Sensory Feedback on Keying Performance, Ergonomics 25 (11), 1109-1123 (1982)

<sup>79</sup> Monty, R.W., Snyder H.L., Keyboard Design: An Investigation of User Preference and Performance, Proceedings of the Human Factors Society, 27<sup>th</sup> Annual Meeting (1983)

<sup>80</sup> Ergonomic Principles in Office Automation, Ericson Information Systems AB, Sweden (1983)

Tastaturen ist dies nicht der Fall. Roe<sup>81</sup> hat darum die Wirkung verschiedener Oberflächenformen (Tastenformen) von weglosen Tastaturen auf das Benutzerverhalten untersucht. Sie folgerte aus ihren Resultaten, dass ein Tastenrand (Höhe 0.38 mm), neben den anderen untersuchten Parametern, eine deutliche Verbesserung in Leistung und Akzeptanz bewirkte.

### 2.3.6 Schlussfolgerungen

Dem Stand des Wissens folgend, scheint also vor allem der Uebungsgrad eines Schreibers zu bestimmen, welche Rückkopplungsmechanismen zum Schreiben herangezogen werden. Beim ungeübten Schreiber spielt in erster Linie die visuelle Rückkopplung eine wichtige Rolle. Aber auch akustische Rückkopplungen werden vom ungeübten Schreiber noch stark in Anspruch genommen. Mit dem Grad der Übung verliert sich der Bedarf an zusätzlicher Rückkopplung, da mit dem erlernten Motor-Programm auch eine interne (propriozeptive) Rückkopplung zustande kommt. Eine akustische Rückkopplung scheint dennoch auch die Leistung geübter Schreiber positiv zu beeinflussen. Die Stellkraft sollte so optimiert sein, dass einerseits die Kraft nicht unter 0.5 Newton liegt, und andererseits die Taste immer bei gleichem Kraftaufwand ausgelöst wird. Die Tasten einer Flachtastatur sollten mit einem erhöhten Rand markiert sein.

---

<sup>81</sup> Roe, C.J., Muto, W., Feedback and Key Discrimination on Membrane Keypads, Proceedings of the Human Factors Society, 28<sup>th</sup> Annual Meeting, (1984)

## 2.4 Gesundheitliche Aspekte beim Bedienen einer Tastatur

### 2.4.1 Einleitung

Gefühlslosigkeit und Schwäche im Unterarm und Handgelenk von Telegraphisten wurden schon im letzten Jahrhundert von E. Robinson<sup>82</sup> beschrieben. Er bezeichnete dieses Syndrom "Telegraphists Cramp". Klockenberg<sup>83</sup>, Lundervolt<sup>84</sup>, Duncan und Ferguson<sup>85</sup>, um nur einige zu nennen, sahen die Ursache der muskuloskeletalen Beschwerden vor allem in den häufigen, sich wiederholenden Bewegungen beim Maschinenschreiben oder Telegraphieren und den ungünstigen statischen Körperhaltungen an Tastaturarbeitsplätzen. Das "Cervicobrachial Syndrom" (CS), eine Bezeichnung dieser muskuloskeletalen Beschwerden, wurde 1973 vom Komitee der "Japan Association of Industrial Health" folgendermassen definiert: "Dieses Syndrom ist eine arbeitsbedingte funktionelle und organische Krankheit, welche auf Grund muskulärer und mentaler Ueberbeanspruchung auftritt (Maeda et al.<sup>86</sup>)." Verursachende Faktoren sind repetitive Bewegungen der Hände und Finger, verbunden mit Zwangshaltungen der oberen Extremitäten. Solche Situationen kommen bei der Arbeit an Büromaschinen vor, bei welcher die Extremitäten in einer gegebenen Stellung gehalten werden müssen (Rohmert<sup>87</sup>). Bei näherer Betrachtung dieser Definition wird aber klar, dass die Tastatur nur als ein Teil des gesamten Arbeitsplatzes zu betrachten ist und ihre ergonomische Gestaltung nur einen Teilbeitrag zur Verminderung hoher statischer Muskelbeanspruchungen liefern kann. Erst durch die Analyse des gesamten Arbeitssystems einschliesslich der Arbeitsorganisation können Zwangshaltungen auf ein Minimum reduziert werden.

---

<sup>82</sup> Robinson, E., Cases of Telegraphists Cramp, British Medical Journal, 4 (1982)

<sup>83</sup> Klockenberg, E., Rationalisierung der Schreibmaschine und ihrer Bedienung, Springer Verlag Berlin (1926)

<sup>84</sup> Lundervold, A., Electromyographic Investigation During Typewriting, Ergonomics, 1 (3), 226-233 (1958)

<sup>85</sup> Duncan, J., Ferguson D., Keyboard Operating Posture and Symptoms in Operating, Ergonomics, 17 (5), 651-662 (1974)

<sup>86</sup> Maeda, K., Harigudi, S., Hoskawa, M., History of the Studies on Occupational Cervicobrachial Disorder in Japan and Remaining Problems, Journal of Human Ergology, 11, 17-29 (1982)

<sup>87</sup> Rohmert, W., Forschungsbericht zur ergonomischen Gestaltung von Schreibmaschinentastaturen, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bericht DV 82-003, Deutschland (1982)

Aus biomechanischer Sicht sind Zwangshaltungen, kombiniert mit repetitiver Bewegung, für muskuloskeletale Beschwerden beim Schreiben auf einer Tastatur verantwortlich. Die Ursache für einen grossen Teil der Beschwerden ist aber nicht klar definierbar (Wallace<sup>88</sup>). Unsicherheit bei der durchzuführenden Aufgabe kann das muskuloskeletale System beanspruchen (Rose<sup>89</sup>, Brunner<sup>90</sup>, Pollard<sup>91</sup>). Bernstein<sup>92</sup> identifizierte das "Freiheitsgrad-Problem". Bei Unklarheiten in der Durchführung einer motorischen Handlung schränkt das motorische System die zu steuernden Freiheitsgrade ein. Wie Newell<sup>93</sup> zeigen konnte, gilt dies auch für ungeübte Bewegungsabläufe. Beim Unterschreiben mit der dominanten (geübten) Hand werden die Freiheitsgrade des Arms voll ausgenutzt. Beim Unterschreiben mit der nicht dominanten (ungeübten) Hand verhält sich der Arm wie ein steifer Stab. Mittels Muskelspannung wird das Hand-, Arm- und Schultergelenk zu einer unbeweglichen Einheit verkoppelt, und der Arm wird nur noch über das Schultergelenk bewegt. Es ist also durchaus möglich, dass Unsicherheiten bei der Bedienung einer Tastatur aus irgend welchen Gründen das muskuloskeletale System überbeansprucht.

#### 2.4.2 Die geteilte Tastatur

Die Idee einer geteilten Tastatur entstand aus einfachen anatomischen Ueberlegungen. Bei herunterhängendem Oberarm (ca.  $10^{\circ}$  -  $15^{\circ}$  zur Vertikalen abgewinkelt) beschreibt die Tangente zur Handfläche einen Winkel von etwa  $45^{\circ}$  zur Horizontalen. Bei der Bedienung einer Tastatur müssen die Hände nach innen gedreht werden (Pronation, Abb. 2.9).

---

<sup>88</sup> Wallace, M., Buckle, P., Ergonomic Aspects of Neck and Upper Limb Disorders, International Reviews of Ergonomics, Edited by Osborne, D.J., 1, Taylor and Francis (1987)

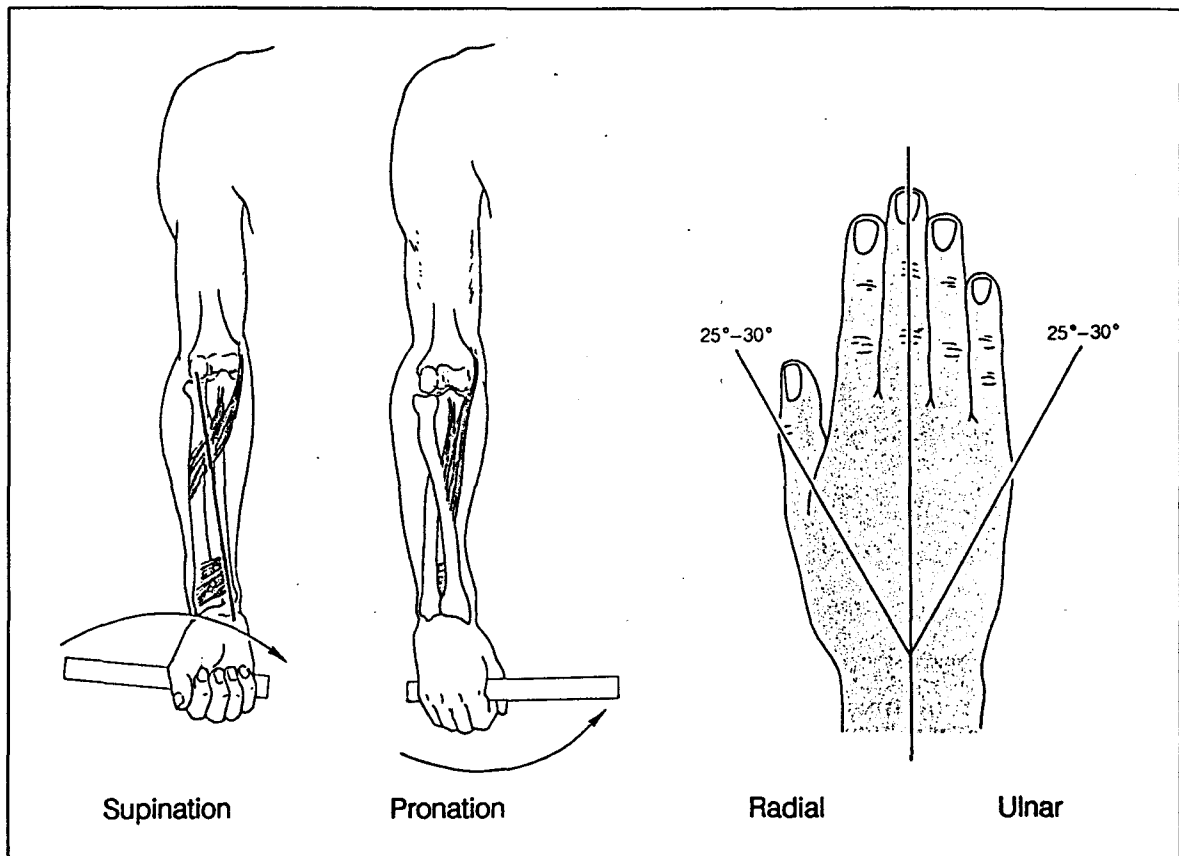
<sup>89</sup> Rose, M.J., Keyboard Operating Posture and Actuation Force: Implications for Muscle Over-Use, Applied Ergonomics, 22 (3), 198-203 (1991)

<sup>90</sup> Brunner, H., Richardson, R., Effects of Keyboard Design and Typing Skill on User Keyboard Preference and Throughput Performance, Proceedings of the Human Factors Society, 28<sup>th</sup> Annual Meeting, (1984)

<sup>91</sup> Pollard, D., The Effect of Feedback on Keying Performance, App. Ergonomics, 10 (4), 194-200 (1979)

<sup>92</sup> Bernstein, N., The Coordination and Regulation of Movements, Oxford: Pergamon Press (1967)

<sup>93</sup> Newell, K.M., Van Emmerik, R.E.A., The Aquisition of Coordination: Preliminary Analysis of Learning to Write, Human Movement Science, 8, 17-32 (1989)



**Abb.2.9.** Supinations- und Pronationsstellung des Unterarms, Radial- und Ulnarabduktion der Hand (nach Benninghoff<sup>94</sup>)

Diese Abweichung der natürlichen Handhaltung fordert von den Unterarmmuskeln eine ermüdende statische Haltearbeit. Durch ein Abheben der Ellenbogen kann aber der Winkel zwischen der Tangente zur Handfläche und der Horizontalen verringert werden (Kroemer<sup>95</sup>). Mit anderen Worten ist eine horizontale Handhaltung nur dann bequem, wenn gleichzeitig der Oberarm seitwärts hochgehalten wird. Dieses Hochhalten des Oberarms erfordert eine ungünstige statische Haltearbeit des Schultergürtels. Beim Bedienen einer Tastatur wird zusätzlich zur Pronation der Hand auch ein Abwinkeln der Hand nach aussen sichtbar (ulnare Abduktion, Abb. 2.9). Die ulnare Abduktion der Hand beim Schreiben auf einer Tastatur wird vor allem dann mit der Entwicklung eines Karpaltunnelsyndroms\* in Verbindung gebracht, wenn zusätzlich mit hoher Geschwindigkeit geschrie-

<sup>94</sup> Benninghoff, Anatomie Band 1, Urban & Schwarzenberg (1985)

<sup>95</sup> Kroemer, K.H.E., Ueber den Einfluss der räumlichen Lage von Tastenfeldern auf die Leistung an Schreibmaschinen, Int. Z. angew. Physiol., 20, 240-251 (1964)

\* Beschwerdebild: Beschwerden in der Hand oder im Arm, die vor allem in der Nacht auftreten.

ben wird (Anderson<sup>96</sup>). Um dieser Fehlhaltung im Hand-Arm-Bereich entgegenzuwirken, sollte die Tastatur in zwei Hälften geteilt werden, die beiden Hälften mit einem Öffnungswinkel von 25° nach hinten gedreht und einem seitlichen Neigungswinkel von 10° nach unten abgesenkt werden (Nakaseko et al.<sup>97</sup>). Zwei Tastaturen wurden bisher nach diesem Konzept kommerziell produziert<sup>98 99</sup> (STR-Tastatur siehe Abb. 2.2). Bei beiden wurde aber die Produktion bald wieder eingestellt.

#### 2.4.3 Form der Tastatur und Tastenanordnung

Eine Untersuchung von Rohmert<sup>100</sup> zeigte, dass ein positiver Neigungswinkel des Tastenfelds von 15° der beste Kompromiss zwischen der muskulären Beanspruchung des Unterarms und der Leistung ist. Bei einem Neigungswinkel, der grösser als 15° ist, wird zwar die Leistung gesteigert, aber die Unterarmmuskulatur neigt eher zur Ermüdung. Die Anpassung des Tastenfeldes an die unterschiedliche Krümmung der Finger während der Bedienung einer Tastatur war das Ziel einer Tastaturentwicklung der Firma PCD, England (Malt<sup>101</sup>). Sie entwickelte eine zweiteilige Tastatur mit ausgeprägter Schalenform, die überflüssige Beuge- und Streckbewegungen der Finger vermeiden sollte. Aus biomechanischer Sicht gibt es einige Kontroversen, die eine ausgeprägte Schalenform in Frage stellen (Rohmert<sup>100</sup>).

Die einseitige Belastung verschiedener Finger bei der Bedienung einer Standard-QWERTY-Tastenanordnung gab Anstoss, neuere und weniger belastende Tastenanordnungen zu entwickeln. Im Gegensatz zu einer QWERTY-Anordnung erlaubte das Tastenfeld von Dvorak (siehe Abb. 2.1) eine ausgeglichene Fingerbelastung beim Tippen. Die Häufigkeit der aufeinanderfolgenden Betätigungen desselben Fingers, entweder beim

---

<sup>96</sup> Anderson, V.P., Cumulative Trauma Disorders, Taylor & Francis (1988)

<sup>97</sup> Nakaseko, M., Grandjean, E., Studies on Ergonomically Designed Alphanumeric Keyboards, *Human Factors*, 27 (2), 175-187 (1985)

<sup>98</sup> Tastatur der Firma STR, CH-8055 Zürich

<sup>99</sup> Tastatur der Firma Marquardt, D-7207 Riehlheim-Weilheim

<sup>100</sup> Rohmert, W., Forschungsbericht zur ergonomischen Gestaltung von Schreibmaschinentastaturen, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bericht DV 82-003, Deutschland (1982)

<sup>101</sup> Malt, L.G., Keyboard Design in the Electronic Era, Malt Applied Systems GB, Conference Paper No. 6 (1977)



Niederdrücken benachbarter Tasten oder bei Bewegungen von der obersten Tastenreihe zur Mittelreihe bzw. unteren Tastenreihe, konnte durch die Dvorak-Anordnung in eine verstärkt wechselnde Hand- bzw. Fingerbewegung umgewandelt werden. Die Dvorak- sowie andere Tastenanordnungen, die eine ausgeglichene Auslastung der Finger erlaubten, fanden aber nie ihren Weg aus dem Labor heraus.

#### 2.4.4 Kraft-Weg-Verlauf

Aus der Literatur ist nicht ersichtlich, ob eine zu hohe Stellkraft zu muskuloskeletalen Beschwerden führt. Es ist darum auch nicht klar, welche Stellkraft als zu hoch bezeichnet werden kann. Muskelaktivitätsmessungen der Unterarmmuskeln ergaben aber eine erhöhte Aktivität des m. flexor digitorum profundus (Beuger) bei Vergrößerung der Stellkraft (Carlsöö<sup>102</sup>). Bei sehr hoher Stellkraft wäre es also durchaus möglich, dass nach längerer Bedienung einer Tastatur der Beuger im Unterarm überbeansprucht wird.

#### 2.4.5 Anschlagfrequenz

Obwohl die Bedienung einer Tastatur eine sich wiederholende (rhythmische) Bewegung ist, gibt die Literatur nur wenig Angaben über die Beziehung zwischen der Rhythmik beim Schreiben auf einer Tastatur und muskuloskeletaler Beanspruchung. Untersuchungen am menschlichen Gang (Rennen) zeigten, dass die elastische Energie, die durch das Dehnen eines Muskels beim Auftreten entsteht, beim Abstoßen aktiv durch die kontrahierenden Muskeln gebraucht wird (Astrand<sup>103</sup>). Ein rhythmischer Bewegungsablauf, wie er beim Rennen vorkommt, hat also eine bessere Energiebilanz als eine Einzelbewegung. Gute Sprinter konnten dadurch bei hohen Geschwindigkeiten noch an Kraft zulegen. Inwieweit sich dies auf die Fingerbewegung übertragen lässt, ist nicht klar. Lundervold<sup>104</sup> fand in seiner Untersuchung, dass nur wenige Muskeln zur Ausführung der Tippbewegung aktiviert werden, wenn die Schreibgeschwindigkeit frei gewählt werden kann. Wird die Schreibgeschwindigkeit infolge einer Anweisung oder aus anderen Gründen über das von

<sup>102</sup> Carlsöö, S., Schreiben mit mechanischer und elektrischer Schreibmaschine, International Congress on Ergonomics Dortmund, Taylor and Francis, London, 361-365 (1964)

<sup>103</sup> Astrand, P-O, Textbook of Workphysiology, McGraw-Hill, Kap. 2 u. 3 (1986)

<sup>104</sup> Lundervold, A., Electromyographic Investigation During Typewriting, Ergonomics, 1 (3), 226-233 (1958)

der Person bevorzugte Mass angehoben, zeigt sich dies auch bei nur einer geringen Frequenzsteigerung in einer Erhöhung der Muskelaktivität und der Anzahl rekrutierter Muskeln. Lundervold schliesst daraus, dass die Ermüdungserscheinungen am geringsten sind, wenn die schreibende Person ihre Anschlagfrequenz frei wählen kann.

#### **2.4.6 Schlussfolgerungen**

Die Zusammenhänge zwischen muskuloskeletalen Beschwerden und Tastaturbedienung sind unklar. Aus biomechanischer Sicht wurden zwar einige Verbesserungen an der Konstruktion der Tastatur unternommen. Ob sich diese Verbesserungen aber im alltäglichen Betrieb positiv auf den Bewegungsapparat auswirken, konnte leider nie untersucht werden. Motorische Aspekte, wie die Steuerung der Freiheitsgrade und die Rhythmik bei der Bedienung einer Tastatur, scheinen aber plausible Ansätze zu sein, den Einfluss der Bewegung auf muskuloskeletale Probleme besser zu verstehen.

## 2.5 Arbeitshypothesen

Tastaturkonstruktionen mit einer verbesserten räumlichen Anordnung der Tasten sind zwar wünschenswert, aber nicht ohne beträchtlichen Aufwand in unserer Arbeitswelt einführbar. So konnten sich gute Tastaturkonstruktionen (biomechanische Betrachtungsweise) auf dem Markt nicht durchsetzen. Sie blieben als Entwürfe im Designbüro liegen. Ergonomische Überlegungen zur Neugestaltung von Tastaturen sollten darum nicht nur auf einer hypothetischen Ebene angestellt werden, sondern sie sollten sich auch mit der Frage auseinandersetzen, ob die neugestaltete Tastatur auf unserem Markt auch eine Chance hat. Auf diesen Überlegungen basierend, wurde in der vorliegenden Studie auf eine Veränderung der räumlichen Anordnung der Tasten oder auf eine Aufteilung in Tastenfelder verzichtet. Vielmehr zielt die Studie auf ein besseres Verständnis der Bewegungsorganisation beim Bedienen einer Tastatur ab.

Eine erste und sehr wichtige Frage ergibt sich durch den fehlenden Tastenweg bei der Bedienung einer weglosen Tastatur, nämlich die Funktion der Rückkopplung im Bewegungsablauf, der für die Bedienung einer Tastatur typisch ist. Aus der Literatur ist ersichtlich, dass die Rückkopplung eher zur Überwachung eines Bewegungsablaufs herangezogen wird (Open-loop-Verhalten) und nicht zur direkten Steuerung der Bewegung benutzt wird (Closed-loop-Verhalten). Es ist darum naheliegend, dass mit Übung beim Bedienen einer Tastatur Rückkopplungen (kinästhetische, taktile, visuelle und akustische) für den Bewegungsablauf eine zunehmend unbedeutendere Rolle spielen. Aus diesen Überlegungen formuliert sich die erste allgemeine Arbeitshypothese:

**Bei geübten Tastaturbedienern werden Rückkopplungen nur zur Überwachung des Bewegungsablaufs ("feedforward") eingesetzt und nicht zur Regelung ("feedback"). Eine Tastatur kann darum auch ohne Tastenweg (kinästhetische Rückkopplung) effizient bedient werden.**

Ergonomische Überlegungen zu Tastaturen beziehen sich nicht nur auf deren Bedienbarkeit, sondern auch auf die damit verbundene muskuloskeletale Beanspruchung. Inwieweit die mechanischen Gesetze, welchen das muskuloskeletale System unterliegt, auch auf die Organisation des Bewegungsablaufs Einfluss nehmen, ist nicht klar. Aus der eher spärlichen Literatur geht hervor, dass die Mechanik des Bewegungsapparats zum Beispiel in der zeitlichen Organisation berücksichtigt wird. Es ist also durchaus möglich, dass periphere Einflüsse, die via afferente Nervenrouten ins ZNS einfließen, die Bewegungsorganisation beeinflussen. Die Frage ist also offen, ob Faktoren wie die Stellkraft, der

Druckpunkt, die Totzeit zwischen den Tasten oder andere Parameter der Tastatur die muskuloskeletale Beanspruchung bestimmen. Einige Stellen in der Literatur weisen darauf hin, dass beim Ueberschreiten gewisser Grenzbereiche, wie z.B. eine zu kleine Stellkraft oder eine zu kurze Totzeit, zu Verkrampfungen im Unterarm führen können. Wir gehen davon aus, dass beim Erlernen eines Bewegungsablaufs vom Bewegungsapparat mit Einbezug der vorgegebenen Bedingungen immer ein Optimum angestrebt wird. Die Muskulatur soll also während des Bewegungsablaufs so wenig wie möglich beansprucht werden. Verändern sich nun die Bedingungen, so kann der erlernte Bewegungsablauf das gesteckte Ziel nicht mehr erreichen. (Zu kleine Stellkraft führt zum Beispiel zum Prellen der Tasten.) Der Bewegungsapparat muss dementsprechend reagieren, was eine Abweichung vom erlernten und optimierten Bewegungsablauf zur Folge hat. Dadurch wird die Muskulatur vermehrt beansprucht. Es stellt sich also die Frage, ob überhaupt und wie Einflüsse von der Tastatur das muskuloskeletale System beanspruchen. Daraus formuliert sich die zweite allgemeine Arbeitshypothese:

**Das muskuloskeletale System wird durch unvorhergesehene Einflüsse beim Schreiben auf einer Tastatur vermehrt beansprucht.**

In den folgenden Experimenten sollen diese beiden Fragestellungen näher untersucht werden.

### **3. Experimente**

### 3.1 Untersuchungsmethode

Zum ergonomischen Vergleich verschiedener Tastaturen wurde eine Untersuchungsmethodik aufgebaut. Mit einem Leistungstest und der Erfassung der Akzeptanz sollen vor allem marktwirtschaftliche Kriterien betreffend der Ergonomie der verschiedenen Tastaturen abgedeckt werden. Mittels der Bewegungsmessung und der Muskelaktivitätsmessung soll das motorische Verhalten des Tastaturbenutzers untersucht werden. Mit dem Studium der Verhaltensweise eines Tastaturbenutzers während der Eingabe können Lösungsansätze zur ergonomischen Optimierung einer Tastatur gefunden werden.

#### 3.1.1 Leistung

Mit Hilfe eines IBM-AT-Personal-Computers wurde ein Leistungstest konfiguriert. Ueber einen Random-Generator werden 3-, 4-, 5stellige Zahlen generiert und auf einem Bildschirm dargestellt. Der Proband muss die gleichen Zahlen über eine der verschiedenen Testtastaturen (Zahlenblock Abb. 3.1.1) so schnell wie möglich eingeben, kann aber Falscheingaben nicht korrigieren. Die eingegebenen Zahlen werden zusammen mit der aktuellen Zeit (ms) im PC abgespeichert, mit den generierten Zahlen verglichen und am Ende jedes Tests als Anzahl Fehler und Anzahl Eingaben ausgedruckt. Mit Hilfe der Varianz-Analyse<sup>1</sup> wird die Leistung zwischen den Testtastaturen verglichen. Die Leistung (L) setzt sich aus der Anzahl eingegebener Zahlen (Z) und der Anzahl Fehler (F) zusammen, wobei die Anzahl Fehler jeweils von der Anzahl eingegebener Zahlen abgezogen wird ( $Z-F=L$ ). Die abgespeicherten Zeiten werden zusätzlich noch zur Ermittlung der durchschnittlichen Zwischen-Ziffer-Zeiten und der Gesamtzeiten der 3-, 4-, und 5stelligen Zahlen herangezogen.

Die verschiedenen Testtastaturen werden mittels einer speziell dafür entwickelten Schnittstelle mit dem PC/AT verbunden (Abb. 3.1.1). Das Tastaturfeld wird in eine Matrix aufgeteilt. Beim Berühren einer bestimmten Taste wird der betreffende Ort auf der Matrix lokalisiert und über einen Enkoder\* und ein Digital Board (Keithley Series 500) als 4-Bit-

---

<sup>1</sup> Statgraphics Vesion 4.0, Statistical Graphics Corporation (1989)

\* National Semiconductor, MM74C922 16-Key Encoder

Wort in den Computer übertragen. Im Computer wird das empfangene Wort noch einmal entschlüsselt und als Ziffer auf dem Bildschirm aufgezeichnet.

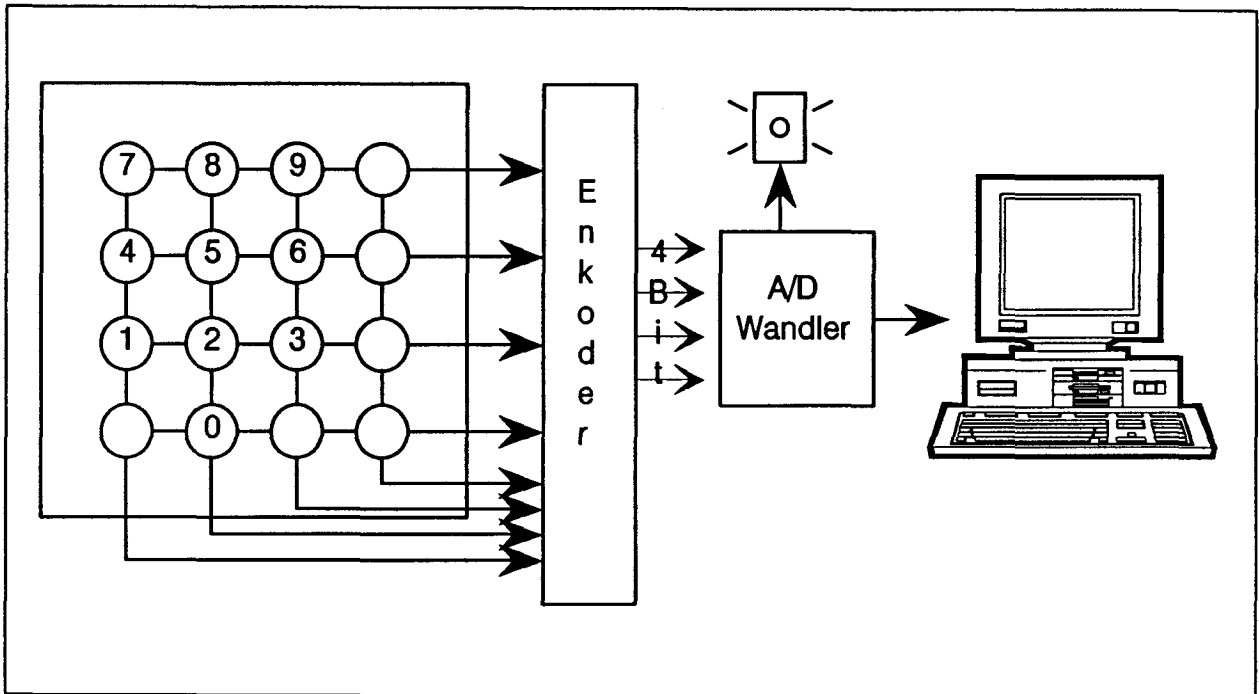


Abb. 3.1.1: Blockschaltbild der Apparatur für den Leistungstest

Vom Berühren der Taste bis zur Aufzeichnung der Ziffer (20 ms Systemzeit) bleibt die Tastatur blockiert. Ueber eine Verzögerungsschleife kann die Totzeit zwischen den Eingaben kontrolliert werden (Totzeit = Zeit der Verzögerungsschleife + Systemzeit). Bei einem Tastaturtyp wird zusätzlich nach jeder Eingabe über eine Leitung auf einem piezoelektrischen Element ein Knackton erzeugt.

### 3.1.2 Akzeptanz

Die Akzeptanz wurde anhand eines Fragebogens mit 5 Fragen gemessen. Jede der Fragen hat eine 7-Punkte-Antwortskala mit jeweils 2 beschrifteten Polen (siehe Anhang A).

Die 7-Punkte-Antwortskala hat sich bereits in einer früheren Arbeit bewährt<sup>2</sup>. Frage 1: "Wie war die Tastatur zu bedienen?" und Frage 5: "Wie hat Ihnen die Tastatur gefallen?" sollen als Grundlage zur Bestimmung der Akzeptanz dienen. Die Frage 2: "Wie haben Sie die Tastatur empfunden?", Frage 3: "War Ihnen die Tastatur vertraut?" und Frage 4: "Wie hat die Tastatur reagiert?" sollen Aufschluss über die Einflussfaktoren auf die Akzeptanz geben. Mit Hilfe der Varianz-Analyse werden die Fragen zwischen den verschiedenen Testtastaturen verglichen.

---

<sup>2</sup> Guggenbühl, U., An Investigation into the Subjective Effects of Short Duration Noise Interfering with Speech, Mastersarbeit, London University (1984)



### 3.1.3 Dreidimensionale Bewegungsmessung

#### 3.1.3.1 Bewegungsmesssysteme: Eine Uebersicht

Im letzten Jahrhundert begannen die Brüder Weber<sup>3</sup> mit einer einfachen Beobachtungstechnik den menschlichen Gang zu studieren. Aehnliche Verfahren werden auch heute noch zur Erfassung von Haltungen und zu einer rudimentären Beschreibung von Bewegungsabläufen verwendet (siehe z.B. Stoffert<sup>4</sup>, Graf<sup>5</sup>). Als dann in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts die Photographie erste Schritte wagte, wurde sie unter anderem auch für die Erfassung der menschlichen Bewegung eingesetzt. Zum Beispiel beschrieb Muybridge<sup>6</sup> anhand photographischer Serienaufnahmen (24 Photographien pro Sekunde) Bewegungsabläufe bei trainierten Sportlern und ungeübten Personen. In einem anderen Verfahren versuchte Marey<sup>7</sup>, die Fülle der Information einer Photographie auf das wesentliche im Bewegungsablauf zu reduzieren. Der Proband musste einen schwarzen Anzug anziehen, auf dem mit weissen Leuchtstreifen die verschiedenen Gelenke des Arms und des Beins miteinander verbunden wurden. Mittels "Chronophotographie" wurde eine Bildplatte bis zu 20 mal pro Sekunde belichtet, wobei nur die Positionen der Leuchtstreifen ausgewertet wurden. Braune und Fischer<sup>8</sup> benutzten für Ihre Bewegungsstudien dieselbe Methode wie Marey, mit dem einzigen Unterschied, dass sie die Leuchtstreifen durch Geisler-Röhren ersetzten, die 26mal pro Sekunde blinkten. Später in den zwanziger und dreissiger Jahren des 20. Jahrhunderts benutzte Bernstein unter anderem die "Cyclographie" als Bewegungsmessmethode für seine berühmten Studien über die menschliche Bewegung. Verschiedene Punkte am Körper wurden mit kleinen Glühbirnchen markiert, die im Be-

---

<sup>3</sup> Weber, W., Weber, E., Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge (1836), Berlin, (1894)

<sup>4</sup> Stoffert, G., Analyse und Einstufung von Körperhaltungen bei der Arbeit nach der OWAS-Methode, Zeitschrift für Arbeitswissenschaften, 39, 31-38, (1985)

<sup>5</sup> Graf, M., Guggenbühl, U., Krueger, H., Movement Dynamics of Sitting Behaviour during Different Activities, Designing for Everyone, Proceedings of the Elevens Congress of the International Ergonomics Association, Taylor & Francis, 15-17 (1991)

<sup>6</sup> Muybridge, E., Animal Locomotion, An Electrophotographic Investigation of Consecutive Phases of Animal Movements, 12 vol. Philadelphia.(1887), Nachdruck (in Auswahl) Dover, New York (1955)

<sup>7</sup> Marey, E-J., Le Movement, Masson, Paris (1894)

<sup>8</sup> Braune, W., Fischer, O., Ueber den Schwerpunkt des menschlichen Körpers, mit Rücksicht auf die Ausrüstung des deutschen Infanteristen, Abh. der math.-phys. Klasse der k. sachs. Gesellschaft der Wissenschaften, 26, 561-672 (1889)

wegungsablauf als Linien auf dem belichteten Bild erschienen. Um die zeitliche Struktur der Bewegung festhalten zu können, wurde zusätzlich eine rotierende Scheibe mit einer Oeffnung vor die Kamera montiert. Dadurch konnten die Punkte mit Frequenzen bis zu 600 Hertz aufgezeichnet werden. Bernstein<sup>9</sup> verfeinerte dieses Verfahren ("Kymocyclographie"), indem er den Photofilm während der Belichtung kontinuierlich und gleichmässig transportierte. Dadurch erreichte er auch bei sich wiederholenden Bewegungen eine Kurvendarstellung, die einfacher zu analysieren war. Dreidimensionale Bewegungsmessverfahren wurden in den dreissiger Jahren von Drill<sup>10</sup>, der mit 2 Photokameras arbeitete, und von Bernstein<sup>11</sup>, der über einen Spiegel und mit nur einer Kamera eine dreidimensionale Darstellung erreichte, auf der Basis der "Cyclographie" entwickelt. Obwohl die Analyse der Daten der cyclographischen Methode sehr zeitaufwendig ist, wird eine ähnliche Methode ("Motographie") noch heute für Bewegungsanalysen am Arbeitsplatz eingesetzt (Baum<sup>12 13 14</sup>).

Neuere Bewegungsmesssysteme bringen die gemessenen Koordinaten der verschiedenen markierten Punkte direkt in eine für den Computer lesbare Form. Im Gegensatz zu den oben erwähnten photographischen Methoden sind somit die gemessenen Punkte sofort zur Analyse verfügbar. Dadurch wird viel Auswertungszeit gespart, und mögliche Fehler können noch während der Messung erkannt und verbessert werden.

Im Bereich der Optoelektronik gibt es eine ganze Reihe von Bewegungsmesssystemen. In den sechziger Jahren entwickelte Furnée<sup>15</sup> auf der Basis der Videotechnik ein Bewegungs-

---

<sup>9</sup> Bernstein, N.A., Die kymocyclographische Methode der Bewegungsuntersuchung, Hbt. d. bio. Arbeitsmethoden, 5 (5a), Abderhalden (1927)

<sup>10</sup> Drill, R., Chronocyclographische Arbeitsstudien - Nagel einschlagen, , Psychophysiologische Arbeit, Riga (1930)

<sup>11</sup> Bernstein, N.A., Analyse der Körperbewegungen und Stellungen im Raum mittels Spiegel-Stereoaufnahmen, Arbeitsphysiologie, 3 (3), (1930)

<sup>12</sup> Baum, E., Motographie I, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung Dortmund, Bericht Nr.226, Wirtschaftsverlag N.W., Bremerhaven (1980)

<sup>13</sup> Baum, E., Motographie II, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung Dortmund, Bericht Nr.324, Wirtschaftsverlag N.W., Bremerhaven (1983)

<sup>14</sup> Baum, E., Motographie III, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung Dortmund, Bericht Nr.468, Wirtschaftsverlag N.W., Bremerhaven (1986)

<sup>15</sup> Furnée, E.H., Hybrid Instrumentation in Prosthetics Research, Proceedings 7th International Conference on Medical & Biological Engineering, Stockholm, 446 (1967)

messsystem, das mittels reflektierender Marker, die über eine stroboskopisch intermittierende Lichtquelle synchron zur Bildwiederholrate des Systems (50 Hz) angestrahlt wurden, die Bewegung aufnahm. Der Mittelpunkt jedes Markers wurde anhand seiner Helligkeit gerechnet und als XY-Koordinate des Videobildes registriert. Zur gleichen Zeit beschäftigten sich auch schottische Forscher (Jarrett<sup>16</sup>) mit der Entwicklung eines Videosystems zur Messung von dreidimensionalen Bewegungen. Dieses System wurde später unter dem Namen VICON<sup>17</sup> (Video CONverter) kommerziell vertrieben. Das VICON-Messgerät arbeitet mit zwei oder mehreren Fernsehkameras. Zur Kontrastverstärkung dienen bei diesem Verfahren Reflektorhütchen (Marker), die an den Versuchspersonen befestigt werden. Die Beleuchtung der Reflektoren erfolgt durch gepulste Infrarotquellen an den Kameras. Die Positionen der Reflektoren werden dann vom Gerät direkt ausgewertet. Auch dieses System arbeitet normalerweise mit einer maximalen Aufnahme­frequenz von 50 Hz. Die räumliche Auflösung einer einzelnen Kamera wird mit ca. 0.1% in der X-Achse und mit 0.17% (25 Hz Aufnahme­frequenz) oder mit 0.34% (50 Hz Aufnahme­frequenz) angegeben (siehe Furnée<sup>18</sup>). In neueren Systemen werden auch Aufnahme­frequenzen von bis zu 200 Hz (VICON 1986<sup>17</sup>, EXPERTVISION<sup>19</sup>, ELITE<sup>20</sup>) angeboten, wobei ein Verlust an räumlicher Auflösung in Kauf genommen werden muss.

Zwei weitere Systeme COSTEL<sup>21</sup> und OPTOTRAK<sup>22</sup> verwenden lineare (eindimensionale) CCD-Arrays (2048\*1 CCD Sensoren) und eine Optik als Messeinheit. Mit einer oder mehreren Kameras pro Achse (X-Y-Z) werden die Positionen der Marker im dreidimensionalen Raum berechnet. Mit der Verwendung von linearen CCD-Arrays wird eine grössere räumliche Auflösung erreicht als mit konventionellen, zweidimensionalen CCD-

---

<sup>16</sup> Jarrett, M.O., A TV/Computersystem for Human Locomotion Analysis, Dissertation: University of Strathclyde, Glasgow (1976)

<sup>17</sup> VICON-System Produktmappe, Oxford Medical Systems, Oxford Medical Computers, Oxford Metrics, UK (1981 und später)

<sup>18</sup> Furnée, E.H., TV/Computer Motion Analysis Systems: The First Two Decades, Dissertation: Delft University of Technology, Faculty of Applied Physics (1989)

<sup>19</sup> EXPERTVISION, Motion Analysis Corporation, Santa Rosa CA, USA

<sup>20</sup> ELITE, Elaboratore di immagini televisive, BTS Milano, Italien

<sup>21</sup> Macellari, V., CoSEL, a Computer Peripheral Remote Sensing Device for Tree-Dimensional Monitoring of Human Motion, J. Med & Bio. Eng. & Comp., 21 (3) 311-318 (1983)

<sup>22</sup> Optotrack, Produktmappe, Northern Digital Inc. Waterloo, Kanada (1986)

Arrays (ca 0.02% für eine Achse). Die Marker (max. 256 LEDs) werden über einen Multiplexer zeitlich gestuft. Die maximale Aufnahme­frequenz (1 Sender) liegt bei 5 kHz.

In einem anderen System (Selspot<sup>23</sup>) werden die Positionen der Marker nicht über einen durchgescannten CCD-Chip, wie sie heute für die oben erwähnten Video-Systeme gebräuchlich sind, ermittelt, sondern direkt auf eine Silizium-Photodiode<sup>24</sup> abgebildet. Als Marker (Sender) werden kleine IRLED (Infrarot-Dioden) verwendet, die direkt von der Kamera angesteuert werden. Das System vermag bis zu 128 Sender zu verarbeiten. Normalerweise wird aber mit einer kleineren Anzahl Marker (8-30) gearbeitet. Interessant sind vor allem die hohe Aufnahme­frequenz von maximal 10 kHz und die räumliche Auflösung von 0.01% für einen Sender. Die realisierbare räumliche Auflösung bei Verwendung von mehreren Sendern liegt nach Holzhausen<sup>25</sup> aber eher bei 0.1 %. Konstruktionsbedingt reagieren die Photodioden sehr empfindlich auf Streulicht, was die Messgenauigkeit zusätzlich beeinträchtigen kann. Dies kann zum Teil mit Infrarotfiltern und einer dynamischen Anpassung der IRLED-Intensität verbessert werden (Stammbach & Giesinger<sup>26</sup>). Ein weiteres Problem bereiten die Reflexionen der IRLED, die nicht so einfach fassbar sind wie Licht im visuellen Bereich und die an den meisten Materialien ungehemmt reflektiert werden. Dies bedingt eine umfassende Anpassung des Untersuchungsraums an das Messsystem (z.B. Samuelson et al.<sup>27</sup>). Die dreidimensionale Messung bedingt auch eine aufwendige Eichung des Messsystems (z.B. Holzhausen<sup>25</sup>), was auch für die oben erwähnten Messsysteme zutrifft.

Ein weiteres dreidimensionales Bewegungsmessverfahren benutzt kleine reflektierende Prismen als Marker (max. 12 Marker), die von einer Messeinheit mit drei nebeneinander angeordneten Scannern erfasst werden (CODA-3<sup>28</sup>). Das Messprinzip beruht darauf, dass die Scanner horizontal bzw. vertikal mit Hilfe von rotierenden Spiegeln Lichtstrahlen aus-

---

<sup>23</sup> SELSPOT AB, Mölndal, Schweden

<sup>24</sup> United Detector Technology Inc., Santa Monica CA, USA

<sup>25</sup> Holzhausen, K., Beitrag zur ergonomischen Arbeitsplatzanalyse durch rechnergestützte Bewegungsstudien, Fortschritt Berichte VDI, Reihe 17: Biotechnik, 26, VDI Verlag, Düsseldorf (1985)

<sup>26</sup> Stammbach, M., Giesinger, T., Optoelektronisches Bewegungsmessgerät, Diplomarbeit, betreut durch U.Guggenbühl, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, ETH-Zürich, (1991)

<sup>27</sup> Samuelson, B., Wagenheim, M., Wos, H., A Device for Three-Dimensional Registration of Human Movement, Ergonomics, 30 (12), 1655-1670 (1987)

<sup>28</sup> CODA-3, Movement Techniques Ltd, Loughborough, UK

senden. Die zurückgeworfenen Reflexionen von den Markern werden dann von einer Photodiode empfangen und der Winkel der rotierenden Spiegel registriert. Die Marker sind verschiedenfarbig, die Sensoren haben Farbfilter zur Unterscheidung. Die drei Scanner sind in einem Gehäuse untergebracht. Wegen seiner soliden Bauweise wiegt das Gerät 65 kg, was die Mobilität des Geräts stark einschränkt. Dafür wird es von der Firma bereits geeicht und kann ohne weitere Einstellungen benutzt werden. Die maximale Aufnahmefrequenz wird mit 300 Hz angegeben, und die räumliche Auflösung liegt bei ca. 0.1 %

Neben den optoelektronischen und einer weiteren Gruppe von auf akustischer Signalübertragung basierenden Bewegungsmessgeräten, die im nächsten Abschnitt diskutiert werden, gibt es eine ganze Anzahl von spezialisierten Messprinzipien, wie z.B. verschiedene Ausführungen von Goniometern, Beschleunigungsmesser, Kistlerplatte (eine Uebersicht gibt Atha<sup>29</sup>).

In einer anderen Gruppe von Bewegungsmesssystemen werden die Laufzeiten von Schallsignalen herangezogen, die von einem Marker (Schallquelle) ausgestrahlt werden. Goldmann und Nadler<sup>30</sup> stellten in den fünfziger Jahren ein Messgerät (UNIPAR) vor, das mit Hilfe des Doppler-Effekts die Geschwindigkeit von Schallgebern (Markern) berechnete. Dieses Messsystem sollte vor allem für die Erfassung von Arbeitsabläufen eingesetzt werden. Eine Bestimmung der Raumkoordinaten erfolgte jedoch nicht. Moritz und Shreve<sup>31</sup> benutzten die Schallübertragung für die Bestimmung von schallaussendenden Messpunkten (Marker), indem sie die Laufzeiten vom Sender zu stationären Messmikrophonen massen. Als Marker benutzten sie Funkenstrecken mit 2 Mikrosekunden dauernden Funken. Moritz und Shreve untersuchten ihr System ziemlich ausführlich auf seine Messgenauigkeit. Sie kamen zum Schluss, dass die Messgenauigkeit in einer typischen Laborumgebung vor allem durch Schwankungen der Raumtemperatur beeinflusst werden kann. Einflüsse der Luftfeuchtigkeit und der Luftbewegungen beschreiben sie als unbedeutend. Die Messgenauigkeit mit Temperaturschwankungen  $< 1^{\circ}\text{C}$  gaben sie bei einem Ab-

---

<sup>29</sup> Atha, J., Current Techniques for Measuring Motion, Applied Ergonomics, 15 (4), 245-257 (1984)

<sup>30</sup> Goldmann, J., Nadler, G., Electronics for Measuring Human Motions, Science, 124, 07-810 (1956)

<sup>31</sup> Moritz, W.E., Shreve P.L., A system for Locating Points Lines and Planes in Space, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, IM-26 (1) (1977)

stand zwischen Marker und Mikrofon von 835 mm als  $\pm 1$  mm an. Shumpe et al.<sup>32</sup> sowie Fleischer und Lange<sup>33</sup> benutzten dasselbe Prinzip für die Messung von Bewegungen. Damit die Marker leichter und besser am bewegenden Körperteil befestigt werden konnten, wurden die Funkenstrecken durch Ultraschallsender ersetzt. Die Messgenauigkeit wurde für beide Systeme wie oben als  $\pm 1$  mm angegeben. Die oben erwähnten drei Ultraschall-Bewegungsmesssysteme werden aber alle mit grossen Recheneinheiten betrieben und eignen sich darum nicht für den Feldeinsatz.

Die hohen Anschaffungskosten (optoelektronische Messsysteme) und der auf das Labor beschränkte Einsatzbereich der oben erwähnten Bewegungsmesssysteme haben uns (Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie) bewogen, in Zusammenarbeit mit Zebris Medizintechnik<sup>34</sup> ein Bewegungsmesssystem auf dem Prinzip der Schallübertragung zu entwickeln. Das System sollte portabel und für den Feldeinsatz tauglich sowie preiswert sein. Prototypen dieses Messsystems kamen bereits im Rahmen von früheren Projekten zum Einsatz (Guggenbühl<sup>35</sup>).

### **3.1.3.2 Messprinzip und Funktionsweise der Bewegungsmessapparatur mit Ultraschallübertragung**

Marker (Gewicht = 1 g, Durchmesser = 10 mm), die aus kleinen Ultraschallsendern und Infrarotlichtempfängern aufgebaut sind und am Körper befestigt werden, erzeugen einen Schallimpuls bei 40 kHz. Die Marker (max. 8 Marker) sind mit einer batteriebetriebenen, frei beweglichen Ansteuereinheit verbunden, welche in einem kleinen Gehäuse am Körper getragen werden kann.

Eine auf die Marker ausgerichtete Messeinheit besteht aus vier in definiertem Abstand zueinander angeordneten Ultraschallmikrofonen und Infrarotlichtsendern. Im Betrieb

---

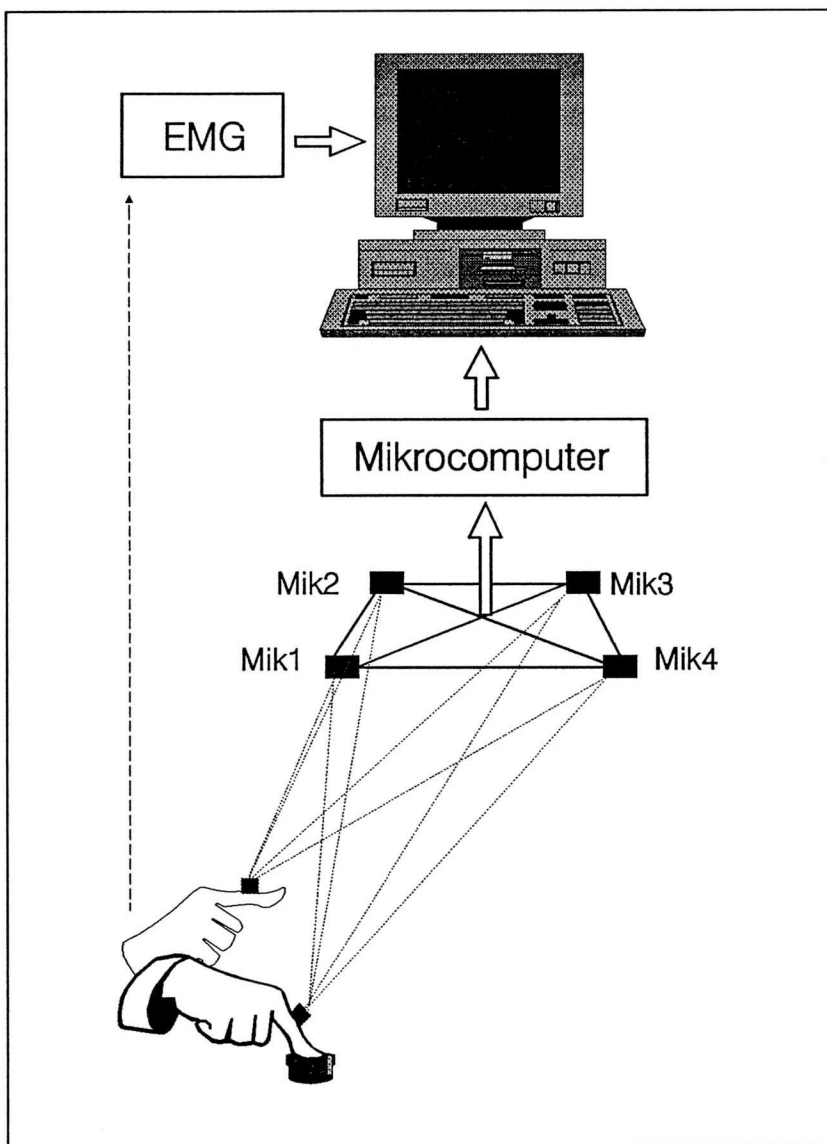
<sup>32</sup> Shumpe, G., Hansen, G., Syndicus, G., Rössler, H., Ganguntersuchungen und funktionelle Wirbelsäulenvermessungen mittels eines neu entwickelten Echtzeit-Stereo-Ultraschall-Topometers (ESUT). Funktionelle Diagnostik in der Orthopädie, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 69-72 (1979)

<sup>33</sup> Fleischer, A.G., Lange, W., Analysis of Hand Movements During the Performance of Positioning Tasks, Ergonomics, 26 (6), 555-564, (1983)

<sup>34</sup> Zebris Medizintechnik GmbH, Grabenstrasse 17, D-7972 Isny im Allgäu

<sup>35</sup> Guggenbühl, U., Krüger, H., Bewegungsanalyse an verschiedenen industriellen Arbeitsplätzen, Sozial- und Präventivmedizin, 32, 266-268 (1987)

werden von dieser Messeinheit aus kodierte Lichtsignale in Richtung der Marker abgegeben, wobei diese jeweils durch einen unterschiedlichen Kode angesprochen werden. In der mit den Markern über dünne Kabel verbundenen Ansteuereinheit wird das Signal dekodiert und der angesprochene Marker zur Abgabe eines Ultraschallimpulses veranlasst. Dieser Schallimpuls wird nun von den Mikrofonen der Messeinheit empfangen. Durch die Zeitdifferenzen der abgegebenen Licht- zu den empfangenen Schallimpulsen lassen sich, durch die Kenntnis der Schallgeschwindigkeit in Luft, die Entfernungen vom jeweiligen Markierungspunkt zu den Mikrofonen bestimmen (Abb. 3.1.2). Zur Berechnung der Raumkoordinaten werden drei Abstände benötigt. Ein vierter wird redundant gemessen.



**Abb.3.1.2:**  
Messprinzip der Ultraschall-  
messung.

Der Einsatz von Infrarotlichtsendern und -empfängern hat den Vorteil, dass bei verdeckten Markern kein Lichtsignal empfangen und somit auch kein Schallsignal abgegeben wird. Dies führt zu einer Verminderung von Fehlmessungen durch Schallreflexionen. Um eine optimale Schallabstrahlung zu erreichen, werden die Schallintensitäten durch eine Regelung nach der Amplitude der empfangenen Lichtsignale eingestellt.

### 3.1.3.3 Bewegungsmessapparatur mit Ultraschallübertragung

Die von den Schallgebern abgegebenen und von den Mikrofonen empfangenen Schallwellen entsprechen keiner idealen Impulsform. Deshalb werden die gemessenen Signale nach einer Digitalisierung in einem eigens dafür entwickelten Mikrorechner zwischengespeichert und per Software ausgewertet. Neben der Feststellung der Triggerzeitpunkte wird eine digitale Filterung sowie eine Erkennung von unerwünschten Schallreflexionen erreicht.

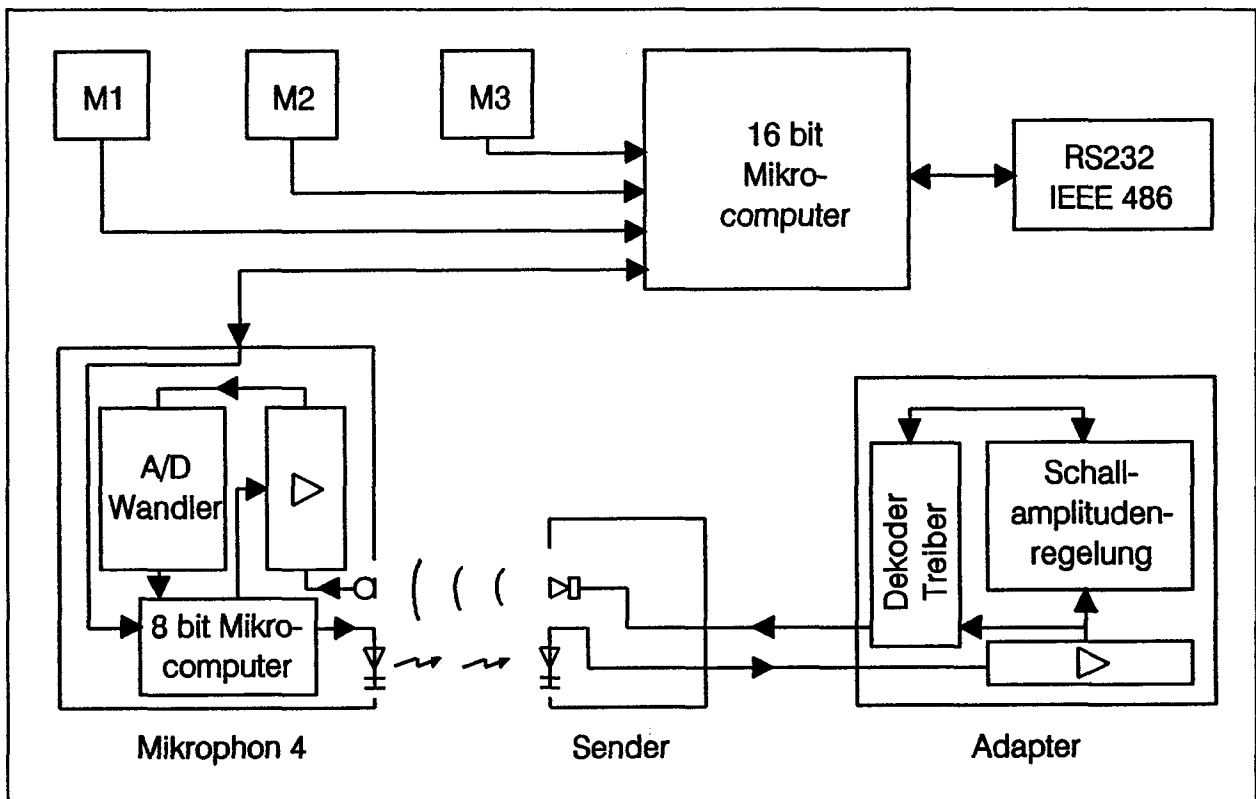


Abb.3.1.3: Blockschaltbild des Ultraschallbewegungsmesssystems; M1, M2 und M3 bezeichnen die ersten 3 Messmikrophone, die identisch zum Mikrophon 4 aufgebaut sind.



Ein 16-Bit-Mikrocomputer steuert den Messablauf und berechnet die X-, Y-, Z-Koordinaten, die dann über eine IEEE- oder eine RS232-Schnittstelle in einen Kleincomputer (PC, Compaq 368/20) eingelesen und dort abgespeichert und analysiert werden (Abb. 3.1.3). Im Messadapter werden die Infrarotsignale nach Verstärkung auf ihre Amplitude untersucht und anschließend dekodiert. Das Schallsignal wird abhängig davon eingestellt. Es können bis 8 Marker sequentiell betrieben werden.

#### **3.1.3.4 Räumliche und zeitliche Auflösung der Bewegungsmessapparatur mit Ultraschallübertragung**

Theoretisch kann mit dem Messsystem eine räumliche Auflösung  $< 0.1$  mm erreicht werden. Eine Messgenauigkeit von ca.  $\pm 0.5$  mm bei einer konstanten Raumtemperatur erweist sich in der Anwendung als realistisch. Das System wird jeweils am Anfang einer Messung kalibriert. Ein Marker wird 50 cm senkrecht vom Nullpunkt des kartesischen Koordinatennetzes zur Mikrophonebene gehalten und die Schallgeschwindigkeit bestimmt. Danach werden die gemessenen Koordinaten on-line auf dem Bildschirm dargestellt. In Anbetracht der kurzen Messdauer (24 min. pro Proband) wird auf eine kontinuierliche Messung der Raumtemperatur verzichtet.

Das Messsystem erreicht eine zeitliche Auflösung von maximal 100 Hz. Bei Verwendung von mehreren Markern werden die Marker mittels eines Multiplexers zeitlich gestuft ( $100/n$ ;  $n$  = Anzahl der Marker).

#### **3.1.3.5 Anordnung der Bewegungsmessapparatur für diese Studie**

Für die Bewegungsmessung aller vier Experimente wird jeweils ein Marker auf der Oberseite im unteren Drittel des rechten Zeigefingers angeklebt. Der Finger bewegt sich während der Messung in einem Bereich von ca.  $150 \times 150 \times 150$  mm. Die vier Mikrophone sind 700 mm oberhalb der Mitte dieses Kubus in einer Ebene angebracht, die in einem Winkel von  $20^\circ$  zum Proband steht. Das dreidimensionale kartesische Koordinatensystem wird dann rechnerisch so gedreht, dass die Messebene parallel zur Mikrophonebene steht. In der Z-Achse wird somit die vertikale Verschiebung des Fingers gemessen, und in der XY-Ebene werden die horizontalen Fingerbewegungen gemessen. Die Blickrichtung des Probanden liegt parallel zur Y-Achse.

### 3.1.4 Elektromyographie (EMG)

#### 3.1.4.1 Einleitung

Als Elektromyogramm (EMG) wird die Ableitung der elektrischen Aktionspotentiale bezeichnet, wie sie in einem belasteten Muskel auftreten. Je höher die Belastung im Muskel ist, desto grösser wird die Anzahl der darin enthaltenen Aktionspotentiale. Die Ableitung dieser Aktionspotentiale geschieht entweder durch die Haut mit Oberflächen-Elektroden oder durch Nadel-Elektroden, die in die Muskulatur eingestochen werden. Oberflächen-Elektroden, wie sie für diese Untersuchung verwendet wurden, sind wegen des Tiefpassverhaltens des Bindegewebes für eine differenzierte Untersuchung der elektrischen Aktivität im Muskel ungeeignet. Dafür müssten Nadelelektroden verwendet werden. Für eine quantitative Messung der Gesamtaktivität in einem Muskel eignen sich die Oberflächen-Elektroden jedoch gut (siehe Basmajian und Deluca<sup>36</sup> für eine ausführliche Beschreibung der EMG-Technik).

#### 3.1.4.2 Messanordnung

Das EMG-Signal des m. flexor digitorum und des m. extensor digitorum wurde für jeden Muskel mit 3 Ag-AgCl-Oberflächen-Elektroden abgeleitet. Die Position der EMG-Abgriffpunkte für den m. flexor und für den m. extensor wurde nach der Anleitung von Zipp<sup>37</sup> ausgewählt. Die Elektroden sind für eine bipolare Messung angeordnet. Zwei Elektroden liegen 2 cm nebeneinander auf dem zu messenden Muskel, und die dritte Elektrode wird als Referenzelektrode eingesetzt. Im Gegensatz zu einer monopolen Anordnung können mit einer bipolaren Anordnung ungewollte elektrische Signale, wie durch Wechselspannung induzierte Störungen, durch Bilden der Differenz der beiden nebeneinanderliegenden Elektrodensignale ausgeschaltet werden. Nach einer 20000fachen Verstärkung werden die Signale gefiltert (Bandpass 10Hz-1kHz) und mit einem RMS-Converter (Mittelungszeit 50 ms) gemittelt. Die Signale werden über einen Analog-Digital-Wandler (Burr Brown PCI-20'000) in den Computer eingelesen (Abb. 3.1.4). Ohne analoge Vorver-

---

<sup>36</sup> Basmajian, J., Deluca C.J., *Muscle Alive: Their Functions Revealed by Electromyography*, 5th Edition, Williams & Wilkins (1985)

<sup>37</sup> Zipp, P., *Recommendations for the Standardization of Lead Positions in Surface Electromyography*, Eur. J. Appl. Physiol, 50, 41-54 (1982)

arbeitung der EMG-Signale würde die Datenverarbeitungsgeschwindigkeit des Computers nicht ausreichen, die EMG-Signale parallel mit den Bewegungskordinaten einzulesen. Die 50 ms Mittelungszeit reichen aus, um die Gesamtaktivität der beiden Muskeln bestimmen zu können.

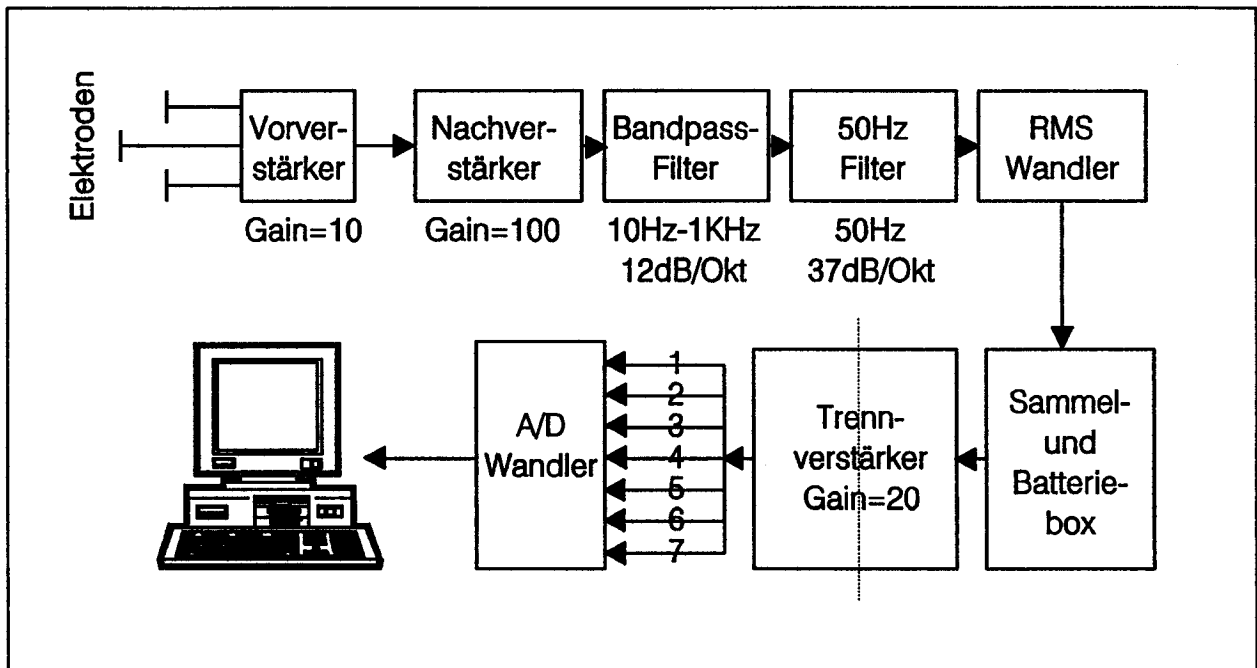


Abb. 3.1.4: Blockschaltbild der EMG-Messapparatur

### 3.1.4.3 Kalibrierung der Muskeln

Das Tiefpassverhalten der Bindegewebe ist von Person zu Person verschieden, was es unumgänglich macht, die Aktivität jedes einzelnen Muskels zu kalibrieren. Dafür wurde eine Apparatur entwickelt, die den Fingerdruck bei Flexion sowie bei Extension misst. Der Proband muss mit voller Kraft (Maximal Voluntary Contraction, MVC) während 3-4 s mit dem Finger nach oben (Aktivierung des m. extensor digitorum) drücken. Während dieser Zeit wird das EMG gemessen. Nach einer kurzen Erholungspause (1 min) muss der Proband noch 80 % des MVC drücken. Nach einer weiteren Pause noch 60 %, dann noch 40 % und 20 % des MVC. In einem zweiten Durchgang muss der Proband die selbe Prozedur wiederholen, indem sie mit dem Finger nach unten drückt (Aktivierung des m. flexor digitorum). MVC wird dann gegen EMG (Volt) aufgetragen, und mit linearer Regression wird der Gradient für den jeweiligen Muskel gerechnet.

### **3.1.5 Methode der Auswertung der Bewegungsmessung und des Elektromyogramms**

#### **3.1.5.1 Fehlerkorrektur der gemessenen Koordinaten**

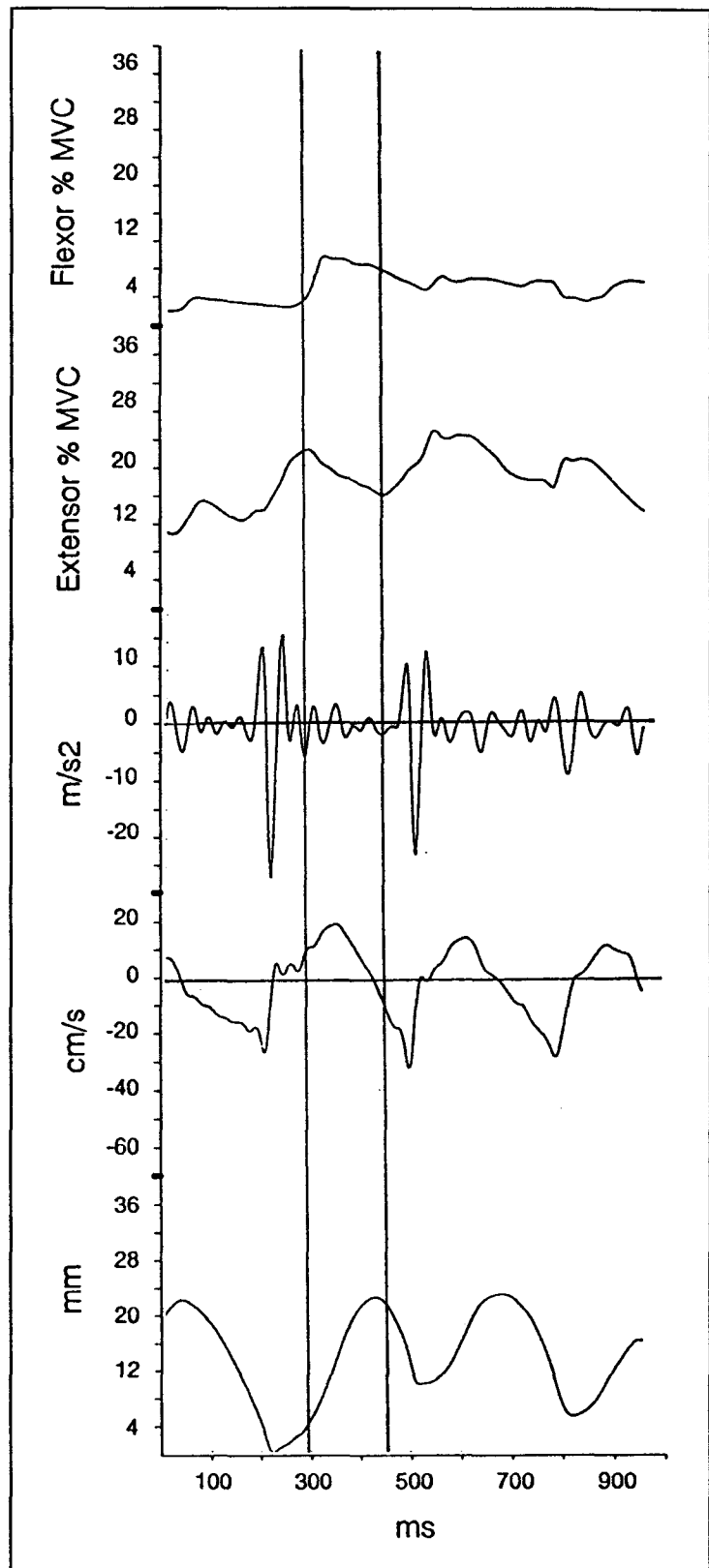
Manchmal treten während einer Bewegungsmessung Fehler auf, die entweder durch Reflexionen des Ultraschalls oder durch Fremdschall verursacht werden. Die Fehler zeigen sich als sprunghafte Abweichungen der natürlichen Fingerbewegung. Die gemessenen Koordinaten werden deshalb korrigiert. Mit Hilfe der ersten Ableitung der Fingerbewegung können die Fehlerpositionen im Datenarray geortet werden und durch eine lineare Interpolation korrigiert werden. Die Fehlerrate war relativ gering (bei  $dx < 1.5$  m/s wurden pro Messung zwischen 1 % - 1,5% Fehler korrigiert). Dadurch wird die Aufzeichnung der Fingerbewegung durch die Datenkorrektur nicht verändert.

#### **3.1.5.2 Aufzeichnung der Fingerbewegung, der Fingergeschwindigkeit, der Fingerbeschleunigung und der Aktivität der Muskeln flexor und extensor digitorum**

In einem zweiten Schritt wurden alle Fingerbewegungen in der Z-Achse (vertikale Achse), die Geschwindigkeit und die Beschleunigung aufgezeichnet (siehe Abb. 3.1.5). Die Betrachtung dieser Kurven gibt Aufschluss über die Rhythmik der Bewegung und über das psychomotorische Verhalten der Person während der Tippbewegung. Zusätzlich zu den Geschwindigkeits- und Beschleunigungskurven wurde auch die Muskelaktivität der beiden Unterarmmuskeln, m. extensor digitorum und m. flexor digitorum, parallel zur Fingerbewegung aufgezeichnet. Die unterste Kurve zeigt die Fingerbewegung in der Z-Achse während der Bedienung einer Piezotastatur. Der Finger bewegt sich also nach unten, schlägt auf die Taste und schnellt wieder nach oben. Bei der zweiten und dritten Tippbewegung zieht der Finger nicht wie bei der ersten Bewegung ganz nach unten. Der Grund dafür ist, dass die Tastatur angewinkelt auf dem Tisch steht. Die vertikale Auslenkung des Fingers beträgt etwa 20 mm. Ein Anschlag dauert etwa 250-300 ms, was einer Anschlagfrequenz von etwa 3-4 Hz entspricht. Die obere Kurve (zweite Kurve von unten) zeigt die Geschwindigkeit der Bewegung in der Z-Achse in cm/s. Die maximalen Geschwindigkeiten liegen zwischen 20 cm/s und 30 cm/s und wird kurz vor dem Aufsetzen des Fingers auf die Tastatur erreicht. Die nächste Kurve nach oben zeigt die Beschleunigung der Fingerbewegung. Die Werte sind in  $m/s^2$  aufgezeichnet.

**Abb. 3.1.5:**

Darstellung einer typischen Fingerbewegung in der Z-Achse, dessen Geschwindigkeit, Beschleunigung und die Muskelaktivität der Muskeln extensor und flexor digitorum bei der Bedienung einer Piezotastatur (Experiment 1)



Die hohen Werte von  $-25 \text{ m/s}^2$  kommen durch den Aufprall des Fingers auf die Tastatur zustande; d.h., dass hier der Finger stark abgebremst wird. Die beiden obersten Kurven zeigen die Muskelaktivität der beiden Muskeln *extensor digitorum* und *flexor digitorum*. Der *m. extensor digitorum* wird aktiv, wenn eine Aufwärtsbewegung des Fingers eingeleitet wird, er hat also die Aufgabe, den Finger hochzuziehen. Im Gegensatz zum *extensor* hat der *flexor* die Aufgabe, den Finger an den Handballen zu ziehen. Er wird also aktiv bei der Bewegung des Fingers auf die Taste, vor allem dann, wenn zusätzlich eine grosse Stellkraft überwunden werden muss.

### 3.1.5.3 Statistische Auswertung der Fingerbewegungen

In einem dritten Schritt wurden die Fingergeschwindigkeiten sowie die MVC der EMG in Perzentile aufgeteilt, und mit Hilfe der Varianzanalyse wurden die gerechneten Perzentile gegeneinander verglichen. Mit der Spearman Rang Korrelation wurden Zusammenhänge zwischen den gerechneten Daten, den Daten des Leistungstests und den Daten des Akzeptanztests gesucht.

Das EMG wird in verschiedene Perzentile aufgeteilt (Jonsson<sup>38</sup>). Die Werte des EMG einer Messung werden nach Amplitude (MVC) sortiert. Ueber eine Summenhäufigkeit werden das 10., 50. und 90. Perzentil berechnet. Zwischen dem 0. und dem 10. Perzentil liegen die niedrigsten gemessenen Amplituden (MVC) der Muskelkontraktion. Wird der Muskel dynamisch kontrahiert und sinkt zwischen den Kontraktionen die Amplitude auf das Niveau der Ruhestellung ab (0% MVC), dann zeigt der Bereich zwischen dem 0. und dem 10. Perzentil die Ruhestellung des Muskels an (Muskeltonus bei 0% MVC). Wird während eines Arbeitsvorgangs (dynamische und statische Muskelkontraktionen) der Muskeltonus (MVC) angehoben, so verschiebt sich auch der Bereich zwischen dem 0. und dem 10. Perzentil. Der Bereich zwischen dem 0. und dem 10. Perzentil zeigt nun nicht mehr die Ruhestellung des Muskels an, sondern einen Wert (MVC), der der statischen Arbeit des Muskels entspricht (Hagberg<sup>39</sup>). Somit ist das 10. Perzentil ein Indikator für den statischen Anteil der Muskularbeit, das 50. Perzentil ist ein Indikator des durchschnittlichen dynamischen Anteils der Muskularbeit und das 90. Perzentil ein Indikator für Spit-

---

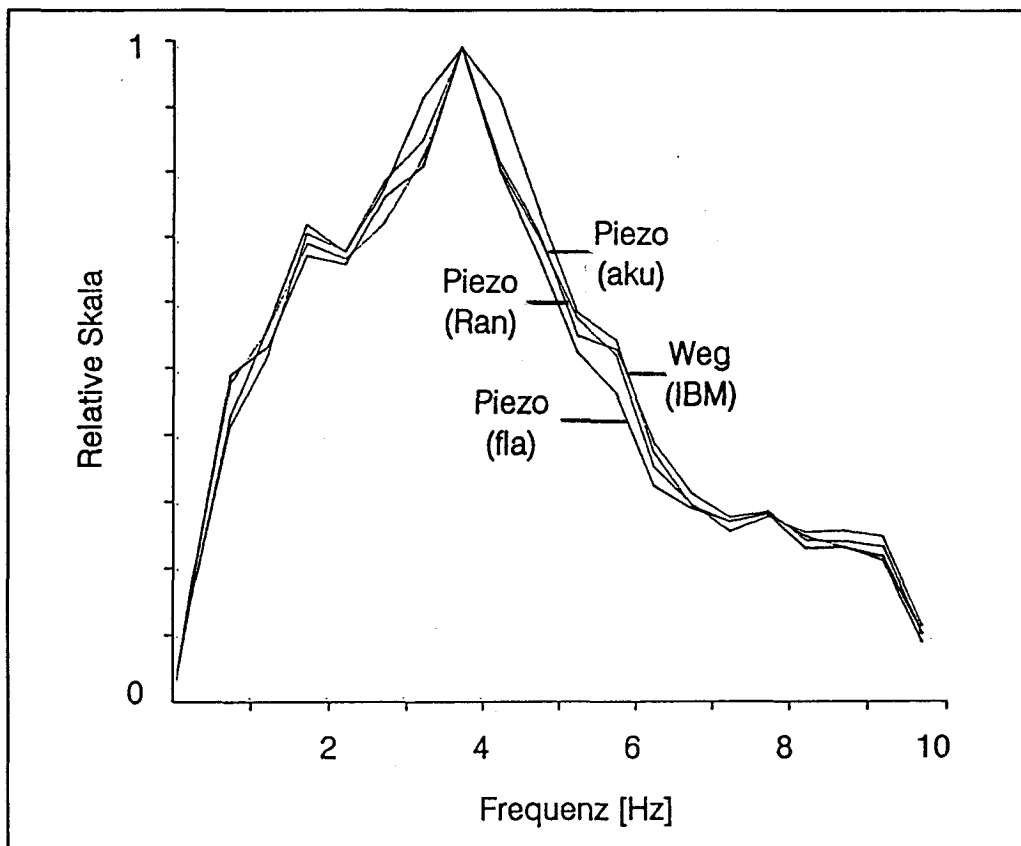
<sup>38</sup> Jonsson B., Quantitative Electromyographic Evaluation of Muscular Load during Work, *Scand. J. Rehab. Med.* 6, 69-74 (1978)

<sup>39</sup> Hagberg, M., On Evaluation of Local Muscular Load and Fatigue by Electromyographie, National Board of Occupational Safety and Health, *Arbete Och Hälsa*, 24 (1981)

zenwerte des dynamischen Anteils der Muskelarbeit. Jonsson und Hagberg benutzten diese Grössen vor allem zur Beurteilung der Langzeitbeanspruchung eines Muskels. In dieser Arbeit wurden aber keine Langzeitexperimente durchgeführt. Diese Grössen werden darum nur zu Vergleichszwecken zwischen den verschiedenen Tastaturen herangezogen.

### 3.1.5.4 Fast Fourier Transform der Fingerbewegung

In einem vierten Schritt wurde die erste Ableitung der Fingerbewegungen (Finger-  
geschwindigkeit) mittels des Fast Fourier Transform (FFT) in einzelne Frequenzen  
aufgeteilt und die Frequenzen in 0.5-Hz-Bändern zusammengefasst (Abb. 3.1.6).



**Abb.3.1.6:** Frequenzspektrum der Fingergeschwindigkeiten in der Z-Achse, gemittelt über alle Probanden des Experiments 2  
Piezotastatur mit Tastenrand (Ran), Piezotastatur ganz flach (fla),  
Piezotastatur mit Tastenrand und Knackton (aku), Wegtastatur (IBM)

Dadurch kann das rhythmische Verhalten während der Eingabe etwas näher untersucht werden. Die Kurven zeigen einen deutlichen "Gipfel" bei 3,75 Herz, d.h., dass während einer Messdauer (4 x 3 min.) Bewegungsgeschwindigkeiten mit Frequenzen zwischen 3,5 Hz und 4 Hz dominieren. Mit Einbezug der Informationen, die man aus der zeitlichen Darstellung der Fingerbewegung gewinnen kann, beziehen sich diese 3,5 Hz - 4 Hz auf die eigentliche Tipp-Bewegung und nicht auf die Wartezeiten zwischen den Eingaben. Ein deutlicher "Gipfel" weist also auf eine einheitliche Tippfrequenz der Taste hin. Umgekehrt bedeutet ein nicht ausgeprägter "Gipfel", dass die Bewegungsabläufe der Tipp-Bewegungen zeitliche Unterschiede aufweisen. Ein weiterer interessanter Punkt der Darstellung der Fingerbewegung im Frequenzbereich ist der Vergleich zwischen den Probanden. Hier besteht die Annahme, dass alle Probanden im gleichen Frequenzbereich tippen, d.h., dass der zeitliche Ablauf der Tipp-Bewegung von Parametern (z.B. den mechanischen Eigenschaften des muskuloskeletalen Systems) bestimmt wird, die bei allen Probanden ähnlich sind. Eine Korrelationsanalyse (Spearman Rang Korrelation) zwischen Frequenz, Akzeptanz sowie Muskelaktivität soll Aufschluss über mögliche Einflüsse des Tipp-Rhythmus auf das Wohlbefinden des Probanden bei der Bedienung der Tastatur geben.



### 3.1.6 Statistik

Neben der deskriptiven Statistik wurden vor allem die einfaktorielle Varianzanalyse und der Scheffe-Test zur Auswertung der Messdaten eingesetzt (Bortz<sup>40</sup>). Mit dieser Methode kann die Signifikanz der Unterschiede in Akzeptanz, Leistung und Bewegungsverhalten (abhängige Variable) bei der Bedienung verschiedener Tastaturtypen (unabhängige Variable) errechnet werden.

Um mögliche Einflüsse auf den Probanden durch die Reihenfolge der Tests (Sequenzeffekte) zu eliminieren und eine gleichmässige Verteilung der Stichproben zu erreichen, wurden die Testsequenzen mittels dreier Lateinquadrate bestimmt. Jeder Proband benutzt jeweils alle im Test vorhandenen Tastaturtypen (Messanordnung mit Messwiederholungen, siehe Tab. 3.1.1).

Versuchspersonen, (n)	Tastaturtypen (Treatmentstufen, (p))			
	1	2	3	4
1	3	4	1	2
2	4	1	2	3
3	2	3	4	1
4	4	1	2	3
5	3	4	1	2
6	1	2	3	4
7	1	2	3	4
8	4	1	2	3
9	3	4	1	2
10	1	2	3	4
11	2	3	4	1
12	2	3	4	1

Tabelle 3.1.1: Messanordnung mit Messwiederholungen

Für die Prüfung der Signifikanz in der einfaktoriellen Varianzanalyse wird der F-Test eingesetzt. Wie verschiedene Untersuchungen (Bortz<sup>40</sup>) gezeigt haben, ist der F-Test bei gleichgrossen Stichproben gegenüber Verletzungen der Voraussetzung einer Normal-

<sup>40</sup> Bortz, J., Statistik für Sozialwissenschaftler, Springer Verlag (1989)

verteilung der Messresultate relativ robust. Dem Vorteil der reduzierten Probandenzahl durch die Anwendung der oben beschriebenen Testanordnung mit Messwiederholungen stehen eventuelle Interaktionseffekte (Sequenzeffekte) zwischen den Treatmentstufen entgegen. Die Homogenität der Fehlervarianz (Residualvarianz in Versuchsanordnungen mit Messwiederholungen), eine weitere Voraussetzung des F-Tests, könnte dadurch beeinträchtigt werden. Mit der gewählten Verteilung der Tests (Treatments) wird der grösste Teil der Sequenzeffekte eliminiert. Um sicher zu gehen, werden zusätzlich modifizierte Freiheitsgrade (Reduktion der Freiheitsgrade) für den F-Test verwendet. Der so modifizierte F-Test vergleicht damit den empirischen F-Wert mit einem grösseren kritischen F-Wert als der "normale" F-Test. Die Wahrscheinlichkeit eines zufällig signifikanten Ergebnisses wird somit verringert.

Für Einzelvergleiche der Treatmentstufen wurde der Scheffe-Test eingesetzt. Der Scheffe-Test neigt zu konservativen Entscheidungen. Die Wahrscheinlichkeit, die Null-Hypothese ( $H_0$ , keine Unterschiede zwischen den Treatmentstufen) fälschlicherweise zu verwerfen, ist somit klein, und die Entscheidung liegt auf der sicheren Seite.

Die Resultate wurden jeweils für jede Treatmentstufe in Form eines Box-Plots dargestellt. Dadurch kann die Verteilung der Resultate jeder Treatmentstufe der mittleren 50 %, der Median und die Extremwerte der Daten dargestellt werden.

Die Resultate einzelner Treatmentstufen wurden zusätzlich noch mit Hilfe der Spearman-Rang-Korrelation verglichen. Im Gegensatz zur Produkt-Moment-Korrelation hat die Spearman-Rang-Korrelation den Vorteil, dass sie für kleine Datensätze robust ist. Die Produkt-Moment-Korrelation reagiert nämlich sehr empfindlich auf Extremwerte (Ausreisser), die vor allem bei kleinen Datensätzen stark zum Tragen kommen.

### 3.1.7 Tastaturen

In drei Versuchen wurden jeweils vier Tastaturen gegeneinander verglichen. Die Tasten waren in einer 4 x 4-Matrix als numerischer Block (siehe Abb. 3.1.1) angeordnet. Die Tastaturen lassen sich grob in zwei Kategorien unterteilen, in eine ohne Tastenhub und eine mit Tastenhub. In der Kategorie ohne Tastenhub wurden zwei Folientastaturen, eine mit Druckpunkt und eine ohne Druckpunkt, sowie verschiedene Piezotastaturen (Typ Dynaptic), eine ganz flache, eine mit erhöhter Umrandung jeder Taste und eine mit erhöhter Umrandung jeder Taste und zusätzlicher akustischer Rückkopplung, untersucht. In der Kategorie Tastaturen mit Tastenhub wurde eine ohne Druckpunkt und eine mit Druckpunkt (Typ IBM) untersucht (siehe Anhang B). Die Merkmale jeder Tastatur sind in Tabelle 3.1.2 aufgelistet.

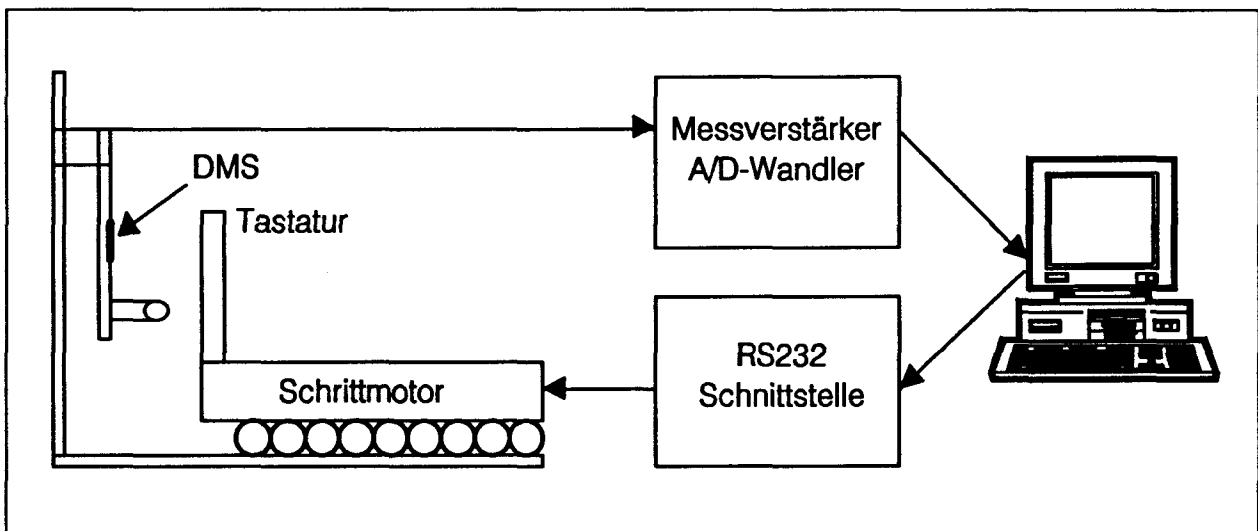


Abb. 3.1.7: Blockdiagramm der Messanlage zur Bestimmung des Weg-Kraft-Verlaufs und der Stellkraft einer Taste.

Im Gegensatz zu den Weg- sowie Folientastaturen, bei denen das Schliessen eines Kontakts die Taste auslöst, wird auf den piezoelektrischen Tastaturen durch den Fingerdruck eine elektrische Spannung erzeugt, die das Auslösen der Taste bewirkt. Das piezoelektrische Element reagiert aber vor allem auf Druckänderungen, d.h. beim Aufprall des Fingers auf die Tastatur. Bei kontinuierlichem Fingerdruck auf die Taste reagierte das Element nur noch schlecht. Ein sicheres Auslösen der Piezotastatur wurde also nur durch

	Piezo (Dynaptic)			Folie		Weg	
	fla	Ran	aku	fla	Dru	lin	IBM
<u>Oberfläche</u>							
- Wegtasten	-	-	-	-	-	J	J
- ganz flach	J	-	-	J	J	-	-
- Tastenrand (0.5 mm)	-	J	J	-	-	-	-
- Konkavwölbung	-	-	-	-	-	J	J
<u>Tastenabstand</u>							
- 19 mm	J	J	J	J	J	J	J
<u>Tastengrösse</u>							
- 15 x 15 mm	J	J	J	J	J	-	-
- 18 x 18 mm	-	-	-	-	-	J	-
- 15 x 13 mm	-	-	-	-	-	-	J
<u>Rückkopplung</u>							
- Weg in mm	-	-	-	-	0.9	4.2	3.4
- Druckpunkt (Newton)	-	-	-	-	2.8	-	0.8
- Endkraft (Newton)	-	-	-	-	2.9	0.8	0.8
- Stellkraft (Newton)	0.6	0.4	0.4	1.4	2.9	0.5	0.8
- Akustisch	-	-	J	-	-	-	J

**Tabelle 3.1.2:** Physikalische Merkmale der Tastaturen

**Piezotastaturen (Dynaptic)**

fla = Piezotastatur ganz flach mit Metalloberfläche

Ran = Piezotastatur mit Tastenrand und Polycarbonatoberfläche

aku = Piezotastatur wie in 2, aber mit akustischem Signal

**Folientastaturen**

fla = Folientastatur ohne Druckpunkt

Dru = Folientastatur mit Druckpunkt

**Wegtastaturen**

lin = Tastatur mit Tastenhub ohne Druckpunkt

IBM = Tastatur mit Tastenhub und Druckpunkt

Tipp-Bewegungen der Finger gewährleistet. Die Stellkraft, um die Piezotaste auszulösen, wird mit einem speziell dafür entwickelten Messsystem gemessen (Abb. 3.1.7). Das Messsystem simuliert einen Finger, der auf die Taste prallt, wobei der Weg-Kraft-Verlauf (für Taste mit Hub) und die Stellkraft gemessen werden. Ein Balken (Aluminium), bestückt mit zwei Dehnungsmessstreifen (DMS), ist an einem Galgen aufgehängt. Am unteren Ende des Balkens befindet sich eine Kugel (simuliert die Fingerspitze). Die zu messende Tastatur wird auf einem Schrittmotor eingespannt und mit einer bestimmten Geschwindigkeit in die Kugel gefahren. Dadurch biegt sich der Balken, und das Biegemoment wird mittels der DMS gemessen. Parallel dazu wird das Auslösen der Taste abgefragt. Das Biegemoment beim Auslösen der Taste ergibt die Stellkraft der Taste (die Weg-Kraft-Diagramme sind in Anhang B abgebildet).

## **3.2 Experiment 1: Vergleichsstudie zwischen drei marktgängigen Flachtastaturen und einer konventionellen Wegtastatur**

### **3.2.1 Einleitung**

Im folgenden Experiment wurden 4 Tastaturen, eine Piezotastatur (ganz flach), 2 Folientastaturen (eine mit Druckpunkt und eine ohne Druckpunkt) und eine Tastatur mit Tastenweg (ohne Druckpunkt) (siehe Anhang B), gegeneinander verglichen. Im Vordergrund stand die Fragestellung, ob für die effiziente Bedienung einer Tastatur ein Tastenweg notwendig ist. Aufgrund der in 2.5 formulierten Arbeitshypothese sollten geübte Tastaturbenutzer eine Tastatur auch ohne Tastenweg effizient benutzen können. Die in diesem Experiment untersuchten Tastaturen sollten also in Leistung, Akzeptanz und in der Organisation der Fingerbewegung sowie deren Ausführung keine wesentlichen Unterschiede aufweisen. Die für dieses Experiment eingesetzte Untersuchungsmethodik ist in 3.1 beschrieben.

### **3.2.2 Probanden**

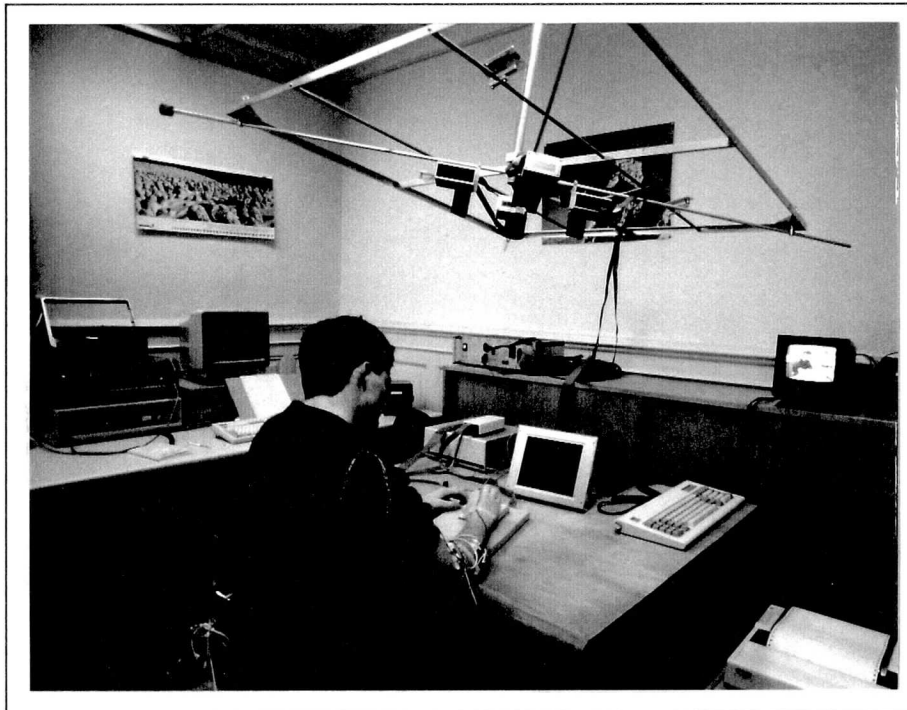
In diesem Versuch wurden 12 Probanden getestet. Die Probanden waren Studenten und Mitarbeiter der ETH-Zürich (3 Frauen und 9 Männern im Alter zwischen 20 und 30 Jahren).

Jeder Proband musste an 3 verschiedenen Tagen alle Tastaturtypen je 3 Minuten lang bedienen. Dadurch konnten Sie mit den 4 Tastaturtypen vertraut werden. Alle 4 Tastaturen zeigen eine tendenzielle, aber nicht signifikante Steigerung der Leistung während der 3 Übungsphasen (F-Test,  $p > 0.5$ ). Zwischen der letzten Übungsphase und der eigentlichen Testphase wurde keine Steigerung der Leistung mehr registriert.

### **3.2.3 Testablauf**

Am Anfang des Versuchs wurde der Proband instruiert. Sie wurde aufgefordert, so schnell wie möglich die 3-, 4- oder 5stelligen Zahlen, die auf dem Bildschirm dargestellt wurden, über eine der 4 Tastaturen einzugeben. Falsch eingetippte Zahlen konnte sie nicht korrigieren. In diesem Fall musste sie die falsche Zahl ignorieren und mit der Eingabe fort-

fahren. Jede Tastatur musste sie während drei Minuten bedienen. Nach jeder Tastatur wurde der Proband aufgefordert, den Fragebogen auszufüllen. Während der Eingabezeit wurden die Fingerbewegung und die Muskelaktivität aufgezeichnet. Zusätzlich wurde mit einem Videosystem der ganze Testablauf festgehalten.

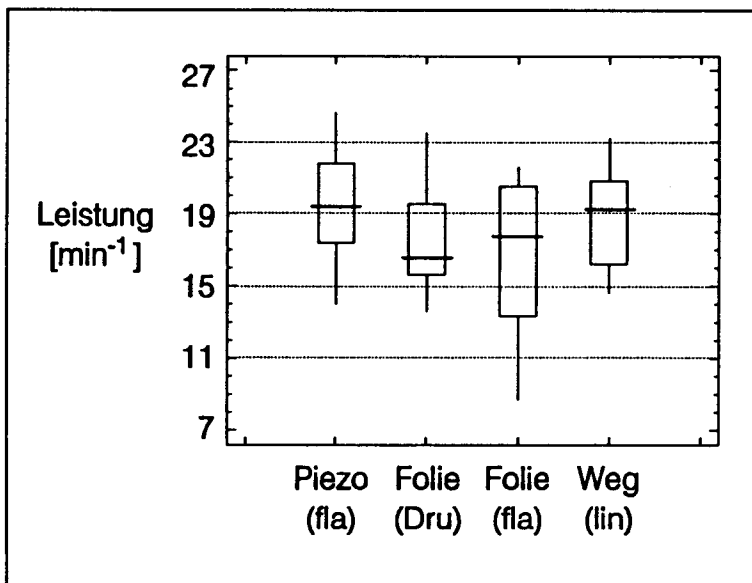


**Abb. 3.2.1:** Testanordnung. Im obersten Teil des Bildes sieht man die 4 Mikrophone, die das Signal vom Sender am Finger empfangen und so die Bewegung des Fingers messen.

### 3.2.4 Resultate

#### 3.2.4.1 Leistung

Die Leistung, zusammengesetzt aus der Anzahl eingegebener Zahlen minus der gemachten Fehler, zeigt keine signifikanten Unterschiede (F-Test,  $p > .05$ ) zwischen den Tastaturen (Abb. 3.2.2). Auf der Folientastatur ohne Druckpunkt werden signifikant mehr Fehler (Scheffe,  $p < .05$ ) gemacht als auf der Folientastatur mit Druckpunkt. Im Vergleich mit den beiden anderen Tastaturen ist zwar kein signifikanter Unterschied der Anzahl gemachter Fehler festzustellen, aber die Piezotastatur liegt mit durchschnittlich 3 Fehlern eher bei der Folientastatur mit Druckpunkt (durchschnittlich 1.8 Fehler) als bei der Weg- (5.8 Fehler) und der Folientastatur ohne Druckpunkt (6.5 Fehler). Auf der Folientastatur mit Druckpunkt wird tendenziell langsamer gearbeitet als auf den anderen drei Tastaturen. Die durchschnittliche Leistung der Folientastaturen fällt darum entsprechend etwas tiefer aus als für die Weg- und die Piezotastatur.



**Abb. 3.2.2:**  
Box and Whisker Plot der Leistungen im Experiment 1.  
Piezotastatur flach (fla)  
Folientastatur mit Druckpunkt (Dru)  
Folientastatur ohne Druckpunkt (fla)  
Tastatur mit Weg, aber ohne Druckpunkt (lin)



### 3.2.4.2 Akzeptanz

Die Antworten auf die Frage "Wie war die Tastatur zu bedienen?" (Abb. 3.2.3) unterscheiden sich hoch signifikant (F-Test,  $p < .01$ ); d.h., dass wenigstens eine der 4 Tastaturen stark von der Bewertung der anderen abweicht. Die Folientastatur mit Druckpunkt wird am unangenehmsten und die flache Piezotastatur am angenehmsten empfunden. Der Unterschied ist signifikant (Scheffe,  $p < .05$ ). Auch die Folientastatur ohne Druckpunkt unterscheidet sich signifikant von der Piezotastatur. Die Bedienung der Folientastaturen wird also als unangenehmer eingestuft als die Bedienung der Piezotastatur. Die Wegtastatur unterscheidet sich nur signifikant von der Folientastatur mit Druckpunkt.

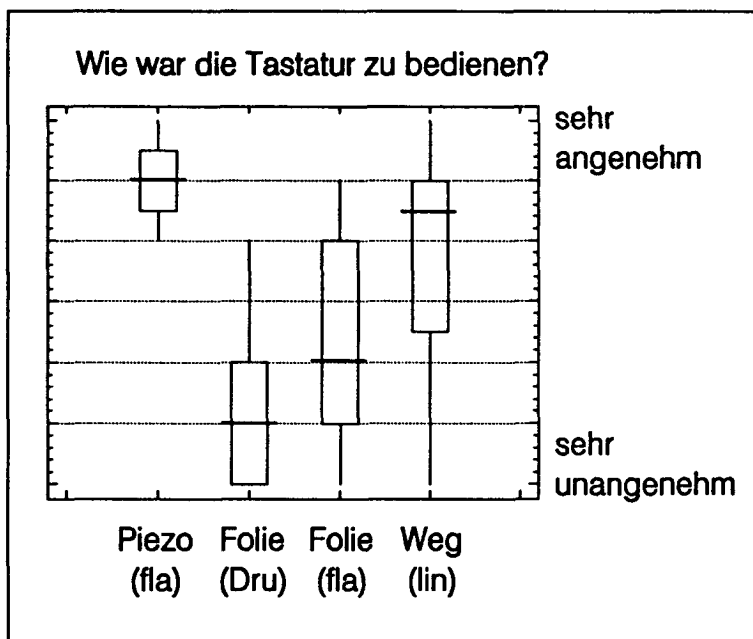


Abb. 3.2.3:

Box and Whisker Plot der Antworten auf die Frage "Wie war die Tastatur zu bedienen?"

Piezotastatur flach (fla)

Folientastatur mit Druckpunkt (Dru)

Folientastatur ohne Druckpunkt (fla)

Tastatur mit Weg, aber ohne Druckpunkt (lin)

Die Beurteilung der Härte der Tastaturen (Abb. 3.2.4) zeigt hoch signifikante Unterschiede (F-Test,  $p < .01$ ). Die Tastatur mit Weg wird als signifikant weicher beurteilt (Scheffe,  $p < .05$ ) als die Folientastatur mit Druckpunkt. Die Piezotastatur und die Folientastatur ohne Druckpunkt werden zwar auch als härter empfunden als die Wegtastatur, aber der Unterschied ist nicht signifikant.

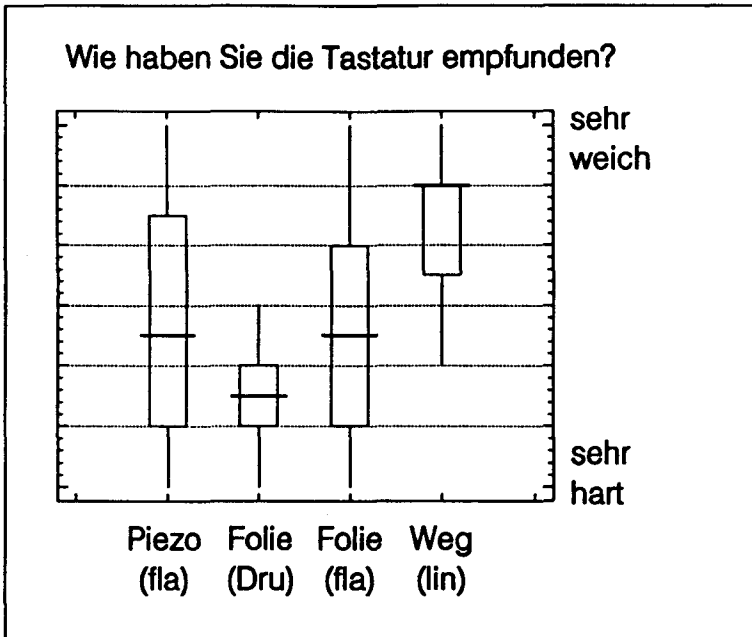


Abb. 3.2.4:

Box and Whisker Plot der Antworten auf die Frage "Wie haben Sie die Tastatur empfunden?"

Piezotastatur flach (fla)

Folientastatur mit Druckpunkt (Dru)

Folientastatur ohne Druckpunkt (fla)

Tastatur mit Weg, aber ohne Druckpunkt (lin)

Als vertrauteste wird die Wegtastatur bezeichnet (Abb. 3.2.5). Sie zeigt aber keine signifikanten Unterschiede zu den Folien- und Piezotastaturen (Scheffe,  $p > 0.5$ ).

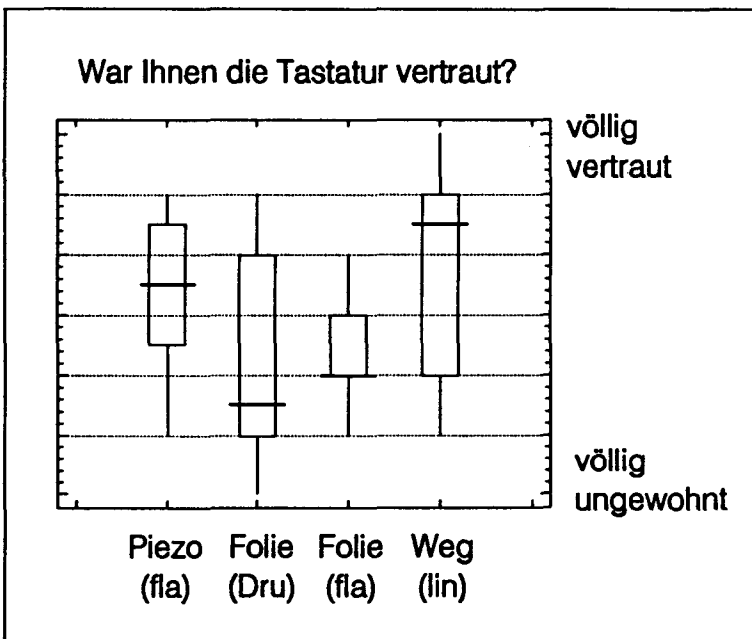


Abb. 3.2.5:

Box and Whisker Plot der Antworten auf die Frage "War Ihnen die Tastatur vertraut?"

Piezotastatur flach (fla)

Folientastatur mit Druckpunkt (Dru)

Folientastatur ohne Druckpunkt (fla)

Tastatur mit Weg, aber ohne Druckpunkt (lin)

Die Reaktivität der Piezotastatur wird als die schnellste bezeichnet (Abb. 3.2.6). Der Unterschied zwischen der ganz flachen Piezotastatur und den anderen drei Tastaturen ist sehr ausgeprägt (Scheffe,  $p < .05$ ).

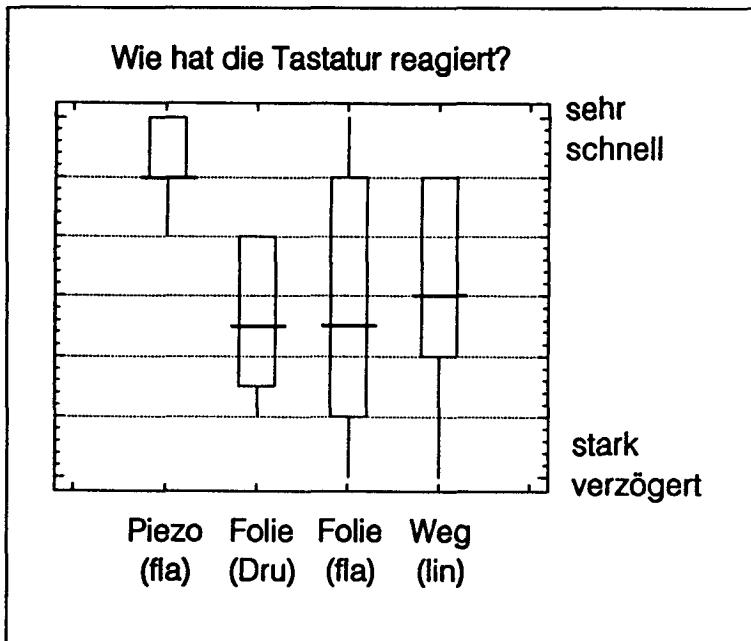


Abb. 3.2.6:

Box and Whisker Plot der Antworten auf die Frage "Wie hat die Tastatur reagiert?"

Piezotastatur flach (fla)

Folientastatur mit Druckpunkt (Dru)

Folientastatur ohne Druckpunkt (fla)

Tastatur mit Weg, aber ohne Druckpunkt (fla)

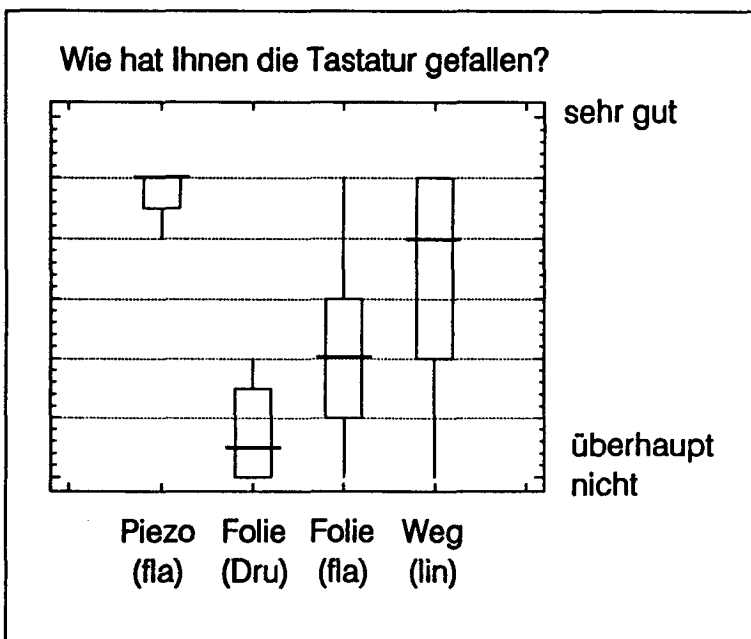


Abb. 3.2.7:

Box and Whisker Plot der Antworten auf die Frage "Wie hat Ihnen die Tastatur gefallen?"

Piezotastatur flach (fla)

Folientastatur mit Druckpunkt (Dru)

Folientastatur ohne Druckpunkt (fla)

Tastatur mit Weg, aber ohne Druckpunkt (lin)

Die Antworten auf die Frage "Wie hat Ihnen die Tastatur gefallen?" (Abb. 3.2.7) unterscheiden sich hoch signifikant (F-Test,  $p < .01$ ). Die Piezotastatur wird signifikant besser bewertet als die Folientastaturen (Scheffe,  $p < .05$ ).

Eine Spearman-Rang-Korrelation hat ergeben, dass die Antworten zu den Fragen "Wie war die Tastatur zu bedienen?" und "Wie hat Ihnen die Tastatur gefallen?" stark korrelierten ( $R > .65$ ,  $p < .05$ ). Dies scheint nicht überraschend, da mit beiden Fragen ein subjektives Wohlfühl bei der Bedienung der Tastaturen erfragt wird. Die beiden Fragen können also als Einheit betrachtet werden und gelten so als Mass der Akzeptanz. Bei der Folientastatur ohne Druckpunkt zeigt die Korrelationsanalyse einen schwachen Zusammenhang zwischen der Abnahme der Leistung und einer zunehmenden Einstufung der Tastatur als hart ( $R = -.53$ ,  $p = .07$ ). Je härter die Tastatur empfunden wird, desto mehr nimmt die Leistung ab.

### **3.2.4.3 Bewegungsanalyse**

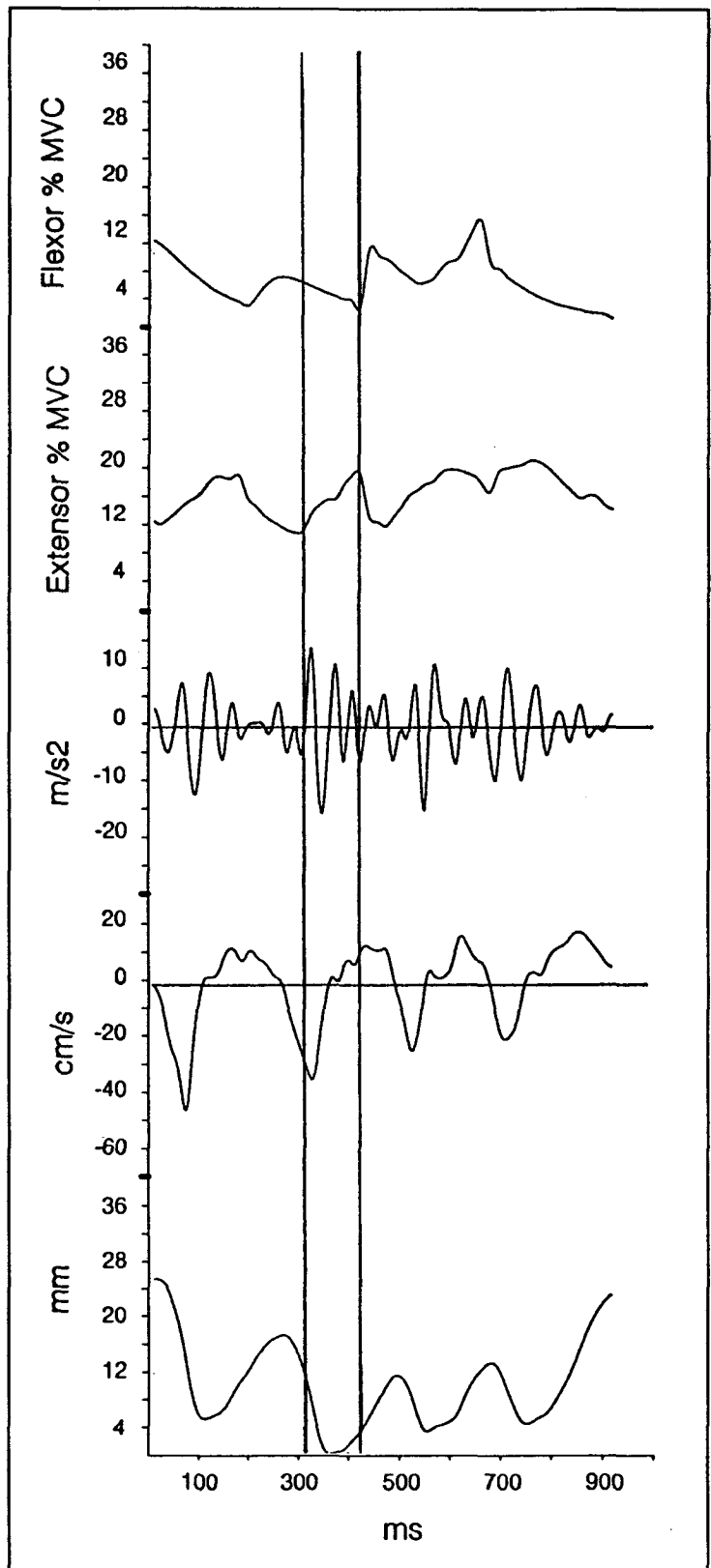
#### **3.2.4.3.1 Fingerbewegungen in der Z-Achse**

Die Abbildungen 3.1.5, 3.2.8 und 3.2.9 zeigen eine typische Anschlagbewegung des Zeigefingers während der Eingabe von Zahlen auf der Piezotastatur, der Wegtastatur und der Folientastatur mit Druckpunkt. Die Gleichmässigkeit der Anschlagbewegung und die Zeit einer Tippbewegung (Anschlagdauer) sind für die Weg- und die Piezotastatur sehr ähnlich. Hingegen zeigt die Anschlagbewegung auf der Folientastatur mit Druckpunkt überhaupt keine Ähnlichkeit mit den anderen beiden Tastaturen. Ausser der Folientastatur mit Druckpunkt zeigen alle Tastaturtypen ähnliche Anschlagbewegungen. Auf der Wegtastatur sowie der Piezotastatur und der Folientastatur ohne Druckpunkt dauert ein Anschlag 200 bis 300 Millisekunden. Ein Anschlag auf der Folientastatur mit Druckpunkt dauerte 500 bis 700 Millisekunden.

Für die Weg- (Abb. 3.2.8) sowie die Piezotastatur (Abb. 3.1.7) weist die Fingergeschwindigkeit ein ähnliches Muster auf wie die eigentliche Fingerbewegung. Der Bewegungsablauf des Fingers unterteilt sich in 2 verschiedene Geschwindigkeiten; nämlich eine, die die Abwärtsbewegung des Fingers auf die Taste charakterisiert, und eine, die die Aufwärtsbewegung von der Taste charakterisiert.

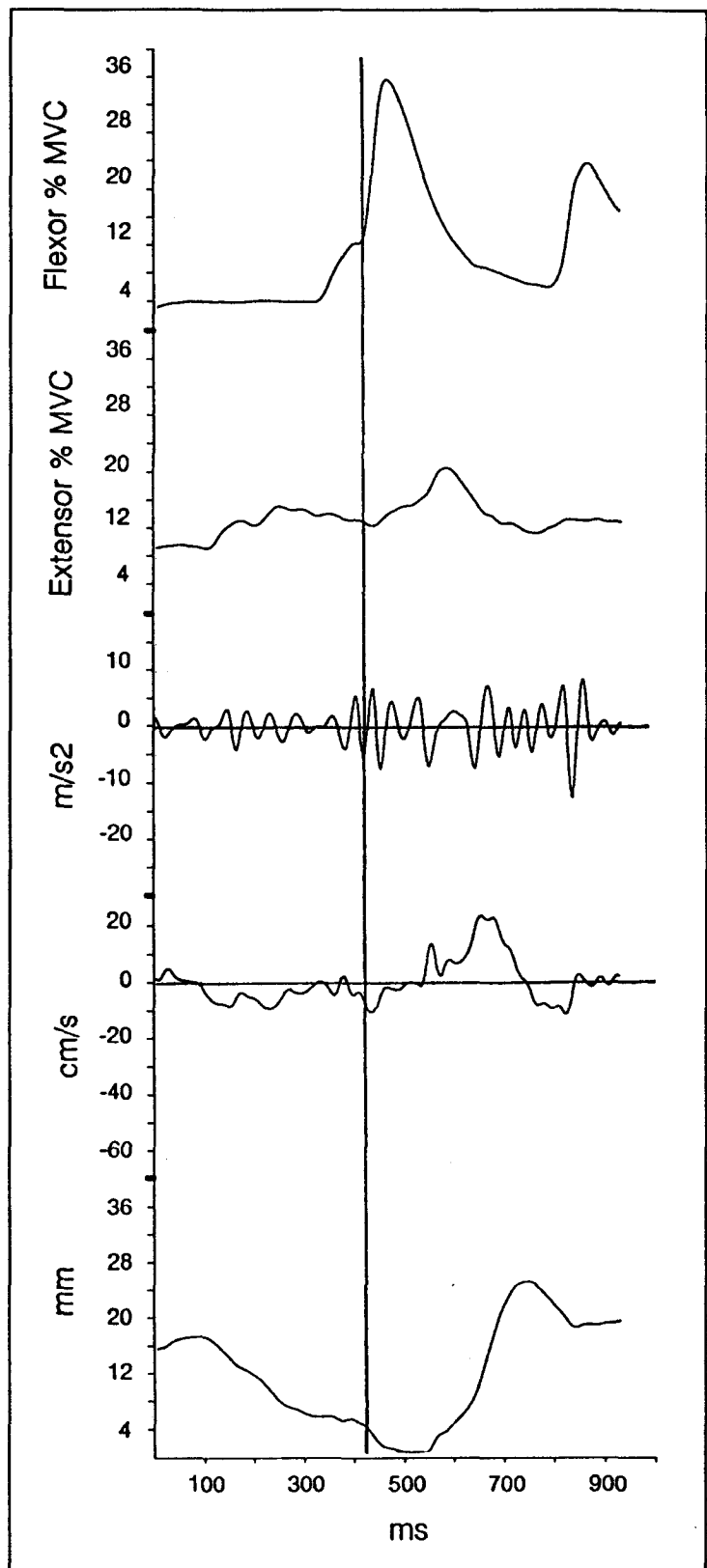
Die Aktivität des *m. extensor digitorum* zeigt ein ähnliches Muster wie die Fingerbewegung. Die Muskelaktivität erreicht jeweils kurz, bevor der Finger von der Taste nach oben schnell, ihr Maximum. Dies entspricht der Aufgabe des *m. extensor digitorum*, der hilft, den Zeigefinger nach oben zu ziehen. Bei kurzer Anschlagdauer ( $<$  als 200 ms) nimmt die Aktivität des *m. flexor digitorum*, der den Finger zum Handballen zieht, schnell zu und erreicht noch während der Aufwärtsbewegung ein Maximum. Bei langer Anschlagdauer bleibt der *m. flexor* dagegen inaktiv. Während einer kurzen Anschlagdauer greift der *m. flexor* aktiv in die Bewegungssteuerung ein und kann möglicherweise sogar zu einer Kontraktion beider Antagonisten *m. extensor* und *m. flexor* führen. Bei längerer Anschlagdauer profitiert die Abwärtsbewegung vermutlich von der Elastizität des *m. extensor*, der vom kontrahierten Zustand wieder in den Normalzustand will, und nicht zuletzt auch vom Gewicht des Fingers. Die Zugkraft des *m. flexor* wird darum gar nicht gebraucht. Bei kurzer Anschlagdauer hingegen tritt der *m. flexor* aktiv dem *m. extensor* entgegen und zwingt den Finger in eine Abwärtsbewegung.

**Abb. 3.2.8:**  
Darstellung einer typischen Finger-  
bewegung in der Z-Achse, dessen  
Geschwindigkeit, Beschleunigung und  
Muskelaktivität der Muskeln extensor  
und flexor digitorum bei der Bedienung  
einer Wegtastatur (IBM)



**Abb. 3.2.9:**

Darstellung einer typischen Fingerbewegung in der Z-Achse, dessen Geschwindigkeit, Beschleunigung und Muskelaktivität der Muskeln extensor und flexor digitorum bei der Bedienung einer Folientastatur mit Druckpunkt



Interessant ist auch, dass der m. extensor bereits bei der Abwärtsbewegung des Fingers aktiv wird, also bereits die Aufwärtsbewegung vorbereitet. Die gesamte Tippbewegung (runter und rauf) bildet bewegungsorganisatorisch eine Einheit. Die Gleichmässigkeit, in der die Tippbewegungen aneinander gereiht sind, und die kurze Dauer jeder Tippbewegung (200 ms - 300 ms) weisen auf einen programmgemässen Bewegungsablauf hin.

Bei der Piezotastatur liegen die Abbremswerte des Fingers ( $-25 \text{ m/s}^2$ ), wenn er auf der Tastatur aufschlägt, höher als auf der Wegtastatur ( $-15 \text{ m/s}^2$ ). Vermutlich wird der Finger durch den Weg der Taste kontinuierlich abgebremst. Der m. extensor wirkt aktiv beim Abbremsen des Fingers mit, da seine Aktivität schon bei der Abwärtsbewegung ansteigt. Die Beschleunigungswerte des Fingers während eines Anschlages auf der Folientastatur mit Druckpunkt (Abb. 3.2.9) sind im Gegensatz zu Piezo- wie Wegtastaturen klein. Vermutlich konzentriert sich die ganze Bewegung auf das Ueberwinden des hohen Druckpunktes, was vor allem durch die hohe Aktivität des m. flexor markiert wird. Die kinästhetische Energie des Fingers beim Aufprall auf die Taste reicht nicht aus, um den hohen Druckpunkt zu überwinden. Daher muss mit Hilfe des m. flexor der hohe Druckpunkt überwunden werden, was zu einer Veränderung des Bewegungsverhaltens führt.

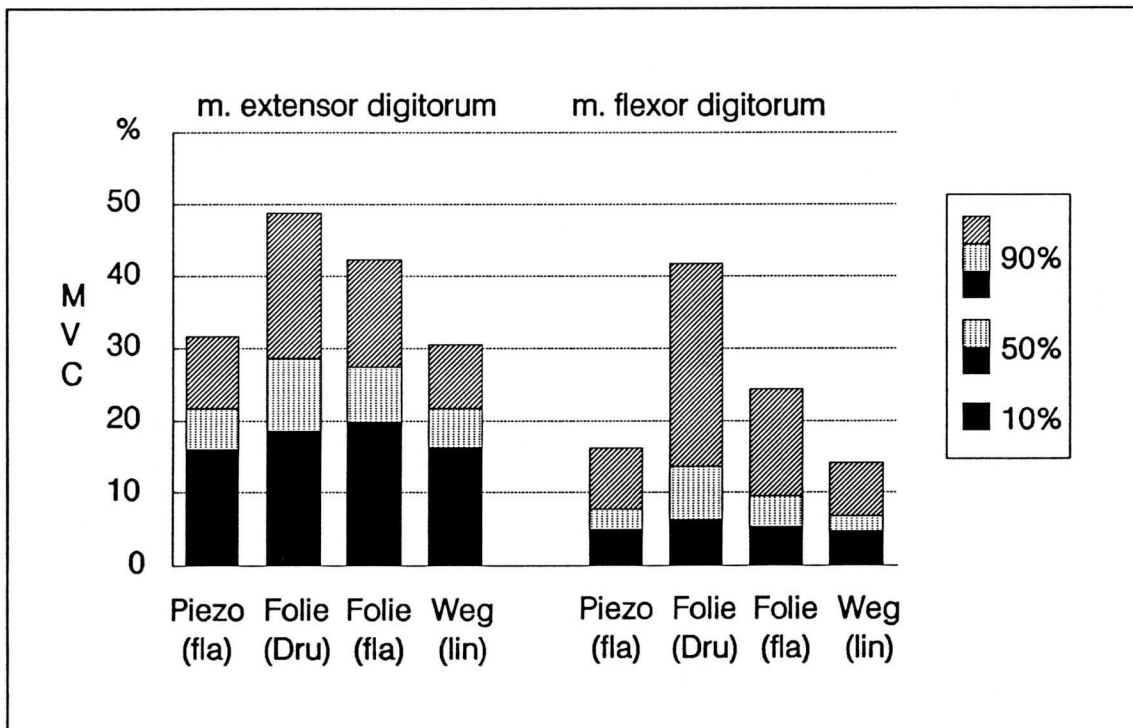
#### **3.2.4.3.2 Fingergeschwindigkeiten**

Die Varianz-Analyse zeigt hoch signifikante ( $p < .01$ ) Unterschiede der Fingergeschwindigkeiten. Bei der Bedienung der Folientastatur mit Druckpunkt werden signifikant langsamere Fingerbewegungen registriert als auf der Weg- oder auf der Piezotastatur (Scheffe,  $p < .05$ ). Dies bestätigt die in Abschnitt 3.2.4.2.1 diskutierten Resultate. Die Rangkorrelations nach Spearman zeigt für die Wegtastatur einen hohen positiven Korrelationskoeffizienten der Fingergeschwindigkeit und der Anzahl Fehler (.66,  $p < .05$ ). Bei grösseren Fingergeschwindigkeiten werden auch mehr Fehler gemacht. Wie schon erwähnt, ist die Fehlerrate der Wegtastatur relativ hoch. Möglicherweise lösen die hohen Fingergeschwindigkeiten beim Tippen ein Prellen der Tasten aus. Die anderen Tastaturen zeigen keine Abhängigkeit der Fehler auf die Fingergeschwindigkeit.



### 3.2.4.3.3 Muskelaktivität (EMG)

Wie in 3.1.5.3 beschrieben, wird die Muskelaktivität in ein 90., ein 50. und ein 10. Perzentil aufgeteilt. Dadurch können der statische Anteil der Muskelarbeit (10. Perzentil) und der dynamische Anteil der Muskelarbeit (50. und 90. Perzentil) auseinandergehalten werden. Die Aktivität des m. flexor digitorum zeigt bei der Bedienung der Folientastatur mit Druckpunkt signifikant (Scheffe,  $p < .05$ ) höhere Werte im dynamischen Bereich als die Muskelaktivität bei den anderen Tastaturen. Im Bereich der Aktivität des m. extensor digitorum kann kein signifikanter Unterschied zwischen den Tastaturen festgestellt werden.



**Abb. 3.2.10:** Dargestellt ist die Aktivität des m. extensor und des m. flexor digitorum.  
Piezotastatur flach (fla)  
Folientastatur mit Druckpunkt (Dru)  
Folientastatur ohne Druckpunkt (fla)  
Tastatur mit Weg, aber ohne Druckpunkt (lin)

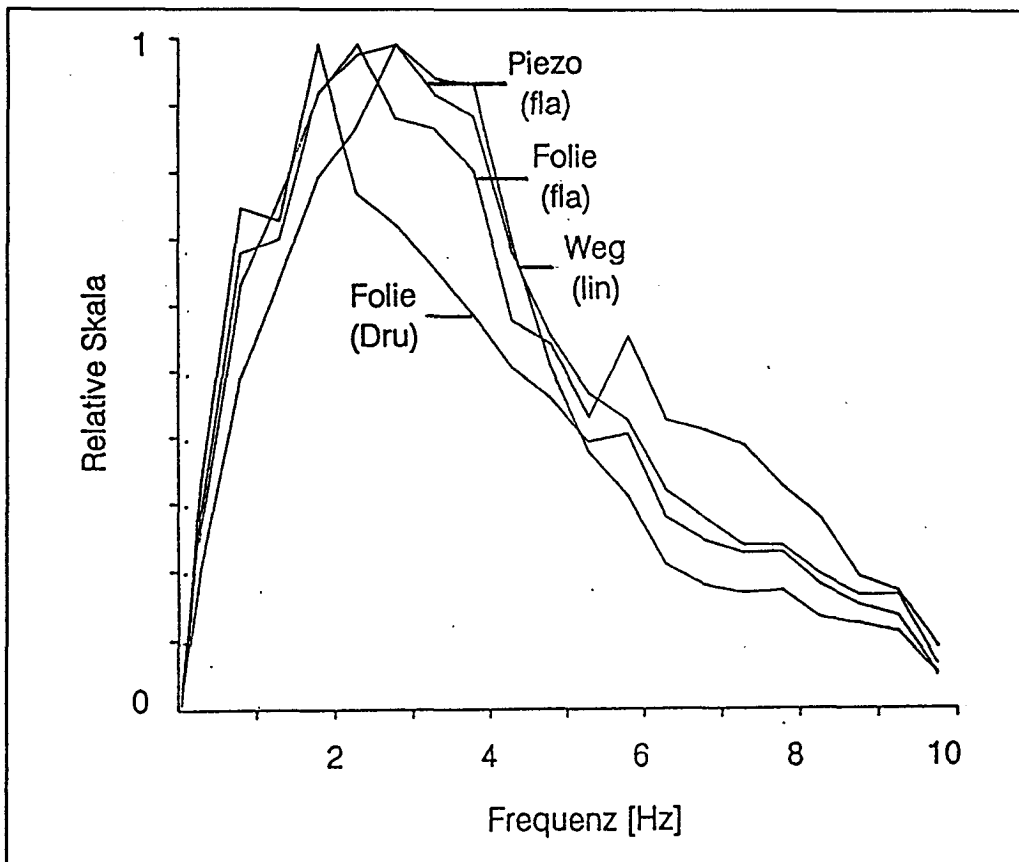
Obwohl sich die Aktivität des m. extensor bei der Bedienung der verschiedenen Tastaturen nicht signifikant unterscheidet, zeigen die durchschnittlichen Werte der beiden Folientastaturen, im statischen sowie im dynamischen Bereich des m. extensor, eine etwas größere Aktivität als die Weg- oder die Piezotastatur (Abb. 3.2.10). Was vor allem auffällt, ist

die erhöhte statische Aktivität (10. Perzentil) der Folientastatur ohne Druckpunkt. Eigentlich würde man für diese Tastatur ähnliche Werte der Muskelaktivität wie für die Piezo- oder die Wegtastatur erwarten. Für das Auslösen der Taste dieser Tastatur ist nämlich keine stark erhöhte Kraft notwendig wie bei der Folientastatur mit Druckpunkt. Die erhöhte statische und dynamische Muskelaktivität des *m. extensor digitorum*, die bei der Bedienung der Folientastatur ohne Druckpunkt auftritt, könnte durch Unsicherheiten bei der Bedienung dieser Tastatur verursacht sein. Wegen des steilen Kraftgradienten quer über die Taste (in der Tastenmitte liegt die Stellkraft bei 1,4 Newton, 3 mm von der Tastenmitte steigt die Stellkraft bereits auf 2,4 Newton, und bei 5 mm von der Tastenmitte löst die Taste nicht mehr aus) ist der Benutzer gezwungen, die Taste präzise in der Mitte zu berühren. Abweichungen werden mit einem Nichtauslösen der Taste bestraft. Es ist also durchaus möglich, dass diese Fehlerquelle zu einer Erhöhung des Muskeltonus führt, um so den Finger genauer positionieren zu können. Bei der Folientastatur mit Druckpunkt steht die erhöhte Muskelaktivität des *m. extensor digitorum* (dynamischer Bereich) wahrscheinlich in direktem Zusammenhang mit dem hohen Druckpunkt der Tastatur. Dies zeigt sich auch in der stark erhöhten Muskelaktivität des *m. flexor digitorum*. Die beiden Muskeln, die als Antagonisten wirken, werden im Bewegungsablauf als eine Einheit behandelt und darum auch in einem bestimmten Verhältnis aktiviert. Wenn ein hoher Druckpunkt mit Hilfe des *m. flexor* zu überwinden ist, steigt die Gegenreaktion des *m. extensor* in gleichem Verhältnis an. Die hohe Muskelaktivität bei der Bedienung der Folientastaturen, gemessen gegen die Aktivität der Piezo- und der Wegtastatur, hat zwei Ursachen. Einerseits wird der Muskeltonus durch eine unsichere Bedienung der Tastatur erhöht (statische Beanspruchung des Muskels), andererseits bewirkt ein hoher, zu überwindender Druckpunkt der Taste eine hohe Muskelaktivität beider Antagonisten (dynamische Beanspruchung des Muskels).

#### **3.2.4.3.4 Frequenzanalyse**

Die Abbildung 3.2.11 zeigt den durchschnittlichen Frequenzverlauf der Tippbewegungen auf den vier Versuchstastaturen. Die Folientastatur mit Druckpunkt zeigt im Frequenzverlauf der Tippbewegung einen Gipfel zwischen 1,5 Hz und 2 Hz. Wie schon die Analyse der Fingerbewegungen zeigte (siehe Abb. 3.2.9), dauert ein Anschlag auf der Folientastatur mit Druckpunkt etwa 500 - 700 Millisekunden, was einer Frequenz von 1,5 Hz und 2 Hz entspricht. Auch bei der Folientastatur ohne Druckpunkt liegt der Gipfel tiefer (zwischen 2 Hz und 2,5 Hz) als bei der Piezo- oder der Wegtastatur (zwischen 2,5 Hz und 3 Hz). Die

Varianzanalyse ergibt einen signifikanten Unterschied zwischen der Folientastatur mit Druckpunkt und der Piezo- sowie der Wegastatur (Scheffe,  $p < .05$ ). Die Folientastatur ohne Druckpunkt unterscheidet sich nicht von den anderen Tastaturen.



**Abb. 3.2.11:** Frequenzspektrum der Fingergeschwindigkeit in der Z-Achse, gemittelt über alle Probanden des Experiments 1  
Piezotastatur flach (fla)  
Folientastatur mit Druckpunkt (Dru)  
Folientastatur ohne Druckpunkt (fla)  
Tastatur mit Weg, aber ohne Druckpunkt (lin)

Die beiden Folientastaturen zeigen im Vergleich mit der Piezo- und der Wegastatur eine höhere Muskelaktivität des m. extensor und des m. flexor digitorum. Im Fall der Folientastatur ohne Druckpunkt könnte die Ursache für die erhöhte Beanspruchung der Unterarmmuskulatur in einem unsicheren, ungleichmässigen Bewegungsablauf zu finden sein. Bei der Folientastatur mit Druckpunkt ist vermutlich der hohe zu überwindende Druckpunkt der Taste für die hohe Muskelaktivität verantwortlich. Nach diesen Ueberlegungen

muss eine Abnahme der Anschlagfrequenz auf der Folientastatur ohne Druckpunkt mit der Aktivität des m. extensor korrelieren. Wie erwartet zeigt eine Spearman-Rang-Korrelation einen negativen Korrelationskoeffizienten zwischen den registrierten Frequenzen und den Aktivitäten des m. extensor digitorum (10. Perzentil  $R = -.43$ ,  $p > .05$ ; 90. Perzentil  $R = -.43$ ,  $p > .05$ ). Die Korrelation ist nicht signifikant. Die Vermutung, dass die hohe Muskelaktivität des m. extensor digitorum bei der Bedienung der Folientastatur ohne Druckpunkt vor allem durch Störungen im gleichmässigen Ablauf der Anschlagbewegung zustande kommt, kann deshalb nicht bestätigt werden. Die erhöhte Muskelaktivität könnte somit auch eine Konsequenz der hohen Stellkraft auf der Folientastatur ohne Druckpunkt sein. Die Folientastatur mit Druckpunkt zeigt aber eine positive Korrelation zwischen der Anschlagfrequenz und der Aktivität des m. extensor digitorum. Das Tippen der Taste wird auch mit einer ganz anderen Bewegung ausgeführt als mit der Folientastatur ohne Druckpunkt. Folglich ist der Grund für die erhöhte Aktivität des m. extensor digitorum beim Bedienen der beiden Folientastaturen nicht derselbe. Die Korrelationsanalyse hat keine weiteren Zusammenhänge ergeben.

### 3.2.4.4 Zeitliche Analyse

Wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, wird jeweils mit einem Tastendruck die Ziffer und die entsprechende Zeit, die seit dem letzten Tastendruck verstrichen ist, abgespeichert. Daraus können die durchschnittlichen Eingabezeiten, die durchschnittlichen Zwischen-Ziffer-Zeiten und die Zeiten zwischen der letzten Ziffer einer Zahl und der ersten Ziffer der nächsten Zahl für die 3-,4- und 5stelligen Zahlen abgeleitet werden.

#### 3.2.4.4.1 Zeit zwischen den eingegebenen Zifferen einer Zahl (Zwischen-Ziffer-Zeit)

Die Varianzanalyse der Zwischen-Ziffer-Zeiten ergibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Tastaturen für die 3-, 4- und 5stelligen Zahlen. Zwischen den 3-, 4- und 5stelligen Zahlen zeigt die Varianzanalyse nur für die Piezotastatur signifikante Unterschiede, wobei sich im Einzelvergleich die 3stelligen Zahlen von den 4- und 5stelligen Zahlen unterscheiden (Scheffe,  $p < .05$ ). Aus der Tabelle 3.2.1 ist ersichtlich, dass die Zwischen-Ziffer-Zeiten länger werden, je mehr Ziffern die Zahlen aufweisen. Die kürzesten Zeiten wurden bei der Piezo- und der Wegtastatur gemessen. Wie erwartet, zeigte die Folientastatur mit Druckpunkt die längsten Zwischen-Ziffer-Zeiten.

Anzahl Ziffern ->	3	4	5
Piezotastatur flach	368 (113)	514 (144)	539 (148)
Folientastatur mit Druckpunkt	518 (129)	590 (129)	643 (143)
Folientastatur ohne Druckpunkt	486 (175)	565 (187)	603 (163)
Wegtastatur	400 (183)	484 (151)	526 (160)

**Tabelle 3.2.1:** Durchschnittliche Zwischen-Ziffer-Zeiten und Standardabweichungen (Klammern) in Millisekunden der verschiedenen Versuchstastaturen, aufgeteilt in 3-,4-, 5stellige Zahlen.

Die Folientastatur ohne Druckpunkt und die Wegtastatur zeigen eine grössere Streuung der Zwischen-Ziffer-Zeiten als die Piezo- und die Folientastatur mit Druckpunkt. Der Unterschied ist vor allem bei den 3stelligen Zahlen sehr ausgeprägt. Interessanterweise ergibt die Spearman-Rang-Korrelation für die Folientastatur ohne Druckpunkt hohe negative Korrelationskoeffizienten zwischen der Anschlagfrequenz und den Zwischen-Ziffer-

Zeiten (3stellige Zahlen,  $R = -.78$ ,  $p < .05$ ; 4stellige Zahlen,  $R = -.83$ ,  $p < .01$ ; 5stellige Zahlen,  $R = -.88$ ,  $p < .01$ ). Ausser bei der Piezo- (3stellige Zahlen,  $R = -.70$ ,  $p < .05$ ) und der Wegtastatur (3stellige Zahlen,  $R = -.60$ ,  $p = .05$ ) sind keine weiteren signifikanten Zusammenhänge zwischen der Anschlagfrequenz und den Zwischen-Ziffer-Zeiten gefunden worden. Die Resultate der Bewegungsanalyse (Abschnitt 3.2.4.3) weisen darauf hin, dass der zeitliche Ablauf einer Tippbewegung unabhängig von der Zahlengrösse nur wenig streut. Wenn die einzelne Zahl als Block memorisiert und eingetippt würde, könnte man erwarten, dass die durchschnittlichen Zwischen-Ziffer-Zeiten, unabhängig von der Anzahl Ziffern in einer Zahl, gleich bleiben. Die Resultate zeigen aber eine Erhöhung der Zwischen-Ziffer-Zeiten mit zunehmender Zahlengrösse. Vermutlich werden die Zahlen nicht als ganze Zahlen memorisiert und als Block eingetippt, sondern aufgeteilt in kleinere Blöcke. Die Zwischen-Ziffer-Zeiten der 3stelligen Zahlen entsprechen etwa den Anschlagzeiten, wie sie aus den Fingerbewegungen abgeleitet werden. Somit kann man annehmen, dass im Gegensatz zu den 4- und 5stelligen Zahlen die 3stelligen Zahlen mehrheitlich als Block memorisiert und eingetippt werden. Anhand dieser Ueberlegungen wäre bei 3stelligen Zahlen nur eine geringe Streuung der Zwischen-Ziffer-Zeiten zu erwarten, und bei längeren Zwischen-Ziffer-Zeiten müsste die Anschlagfrequenz unabhängig von den Zwischen-Ziffer-Zeiten sein. Die Folientastatur ohne Druckpunkt zeigt als einzige der vier Tastaturen eine Abweichung von beiden Bedingungen. Die Streuung bei der Wegtastatur (Tab. 3.2.1) ist wie bei der Folientastatur ohne Druckpunkt hoch. Vergleicht man aber den interquartilen Bereich der Zwischen-Ziffer-Zeiten der beiden Tastaturen für 3stellige Zahlen (Abb. 3.2.12), so fällt auf, dass die Wegtastatur eine Verteilung der Zwischen-Ziffer-Zeiten mit Schwergewicht bei den kleinen Zeiten (Median = 311 ms) hat und die Folientastatur eher zu einer normalen Verteilung der Zwischen-Ziffer-Zeiten neigt (Median = 446 ms). Interindividuell streuen die Zwischen-Ziffer-Zeiten bei der Bedienung Folientastatur ohne Druckpunkt somit breiter als bei der Wegtastatur. Diese Resultate lassen vermuten, dass im Gegensatz zu den anderen drei Tastaturen die Bedienung der Folientastatur ohne Druckpunkt die Probanden stark verunsichert und dies zu unterschiedlichen Bedienungsstrategien führt. Diese Vermutung wird weiter durch die Tatsache gestützt, dass die Folientastatur ohne Druckpunkt einen hohen positiven Korrelationskoeffizienten zwischen der Aktivität des m. extensor digitorum und den Zwischen-Ziffer-Zeiten aufweist (3stellige Zahlen und 10. Perzentil  $R = .64$ ,  $p < .05$ ; 3stellige Zahlen und 90. Perzentil  $R = .62$ ,  $p < .05$ ). Eine Zunahme der Aktivität der Streckermuskulatur bei einer Verlangsamung der Tippbewegung und gleichbleibendem Druckpunkt wäre nicht zu erwarten, da der m. extensor vor allem für das Wegziehen des Fingers eingesetzt wird. Eine

erhöhte Aktivität des m. extensor könnte als Reaktion zu einer Unsicherheit bei der Bedienung der Tastatur gewertet werden.

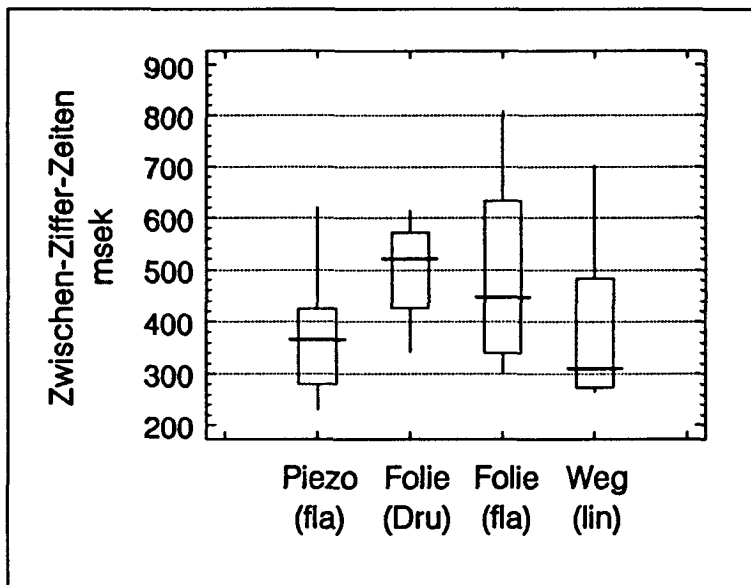


Abb. 3.2.12:

Box and Whisker Plot der Zwischen-Ziffer-Zeiten von 3stelligen Zahlen.  
Piezotastatur flach (fla)  
Folientastatur mit Druckpunkt (Dru)  
Folientastatur ohne Druckpunkt (fla)  
Tastatur mit Weg, aber ohne Druckpunkt (lin)

Für die Wegtastatur ergibt die Spearman-Rang-Korrelation einen hohen negativen Korrelationskoeffizienten zwischen der Aktivität des m. flexor digitorum und den Zwischen-Ziffer-Zeiten für 3-, 4- und 5stellige Zahlen (für 3-, 4- und 5stellige Zahlen und 10. Perzentil,  $-0.65 < R < -0.67$ ,  $p < .05$ ; für 3-, 4- und 5stellige Zahlen und 90. Perzentil,  $-0.82 < R < -0.84$ ,  $p < .01$ ). Die Zwischen-Ziffer-Zeiten korrelieren auch mit den Fehlern (für 3-, 4- und 5stellige Zahlen,  $-0.68 < R < -0.75$ ,  $p < .05$ ). Das heisst, je kürzer die Zwischen-Ziffer-Zeiten sind, desto mehr nehmen die Aktivität des m. flexor und die Anzahl Fehler zu. Dies erhärtet die Annahme, dass die relativ hohe Fehlerrate der Wegtastatur durch zu hohe Fingerschwindigkeiten beim Tippen (vergl. Abschnitt 3.2.4.2.2) zustande kommt. Für die Piezotastatur zeigt die Spearman-Rang-Korrelation auch eine Tendenz zu hoher Aktivität des m. flexor digitorum und kurzen Zwischen-Ziffer-Zeiten, die aber nur für 4- und 5stellige Zahlen signifikant sind. (Für 3stellige Zahlen, 10. Perzentil,  $R = -0.44$ ,  $p > .05$ , 90. Perzentil  $R = -0.45$ ,  $p > .05$ ; für 4- und 5stellige Zahlen, 10. Perzentil,  $-0.59 < R < -0.64$ ,  $p < .05$ , 90. Perzentil,  $-0.58 < R < -0.60$ ,  $p < .05$ .)

### 3.2.4.4.2 Eingabezeiten

Die Varianzanalyse der Eingabezeiten zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Tastaturen für 3-,4- und 5stellige Zahlen. Die Unterschiede zwischen den 3-,4- und 5stelligen Zahlen sind alle signifikant (Scheffe,  $p < .05$ ). Mit Hilfe der Regressionsanalyse wird die Steigung zwischen den 3-,4- und 5stelligen Zahlen der verschiedenen Tastaturen gerechnet. Die beste Anpassung der Steigung entspricht einem multiplikativen Modell der Form  $Y = aX^b$  ( $\ln Y = \ln a + b \ln X$ ) (Tabelle 3.2.2).

Regression ( $\ln Y = \ln a + b \ln X$ ) ->	$\ln a$	b	R
Piezotastatur flach	4,34 **	2,07 **	0,84
Folientastatur mit Druckpunkt	5,06 **	1,72 **	0,86
Folientastatur ohne Druckpunkt	4,92 **	1,77 **	0,79
Wegtastatur	4,55 **	1,92 **	0,78

**Tabelle 3.2.2:** Resultate der Regressionsanalyse der durchschnittlichen Eingabezeiten der 3-, 4- und 5stelligen Zahlen.

a = Schnittpunkt

b = Steigung

R = Korrelationskoeffizient,

\*\* = hochsignifikant

Die errechnete Steigung zeigt einen quadratischen Anstieg der Eingabezeiten der 3-,4- und 5stelligen Zahlen für die Piezo- und die Wegtastatur. Für die beiden Folientastaturen ist die Steigung kleiner. Wenn die Anschlagdauer der Tippbewegungen konstant bliebe - was aus den Resultaten der Bewegungsanalyse gefolgert werden kann (Abschnitt 3.2.4.3) -, könnte man einen linearen Anstieg mit einer Steigung, entsprechend der durchschnittlichen Anschlagdauer, erwarten. Die oben errechneten Steigungen zeigen eine deutliche Abweichung von dieser Annahme. Die 4- und 5stelligen Zahlen sind also nicht kontinuierlich eingegeben worden, sondern mit Unterbrüchen. Die Unterbrüche dienten vermutlich zur Orientierung. Nachdem ein Teil der Zahl geschrieben wurde, musste der restliche Teil der Zahl noch erfasst und formuliert werden.



### 3.2.4.4.3 Zwischen-Zahlen-Zeiten

Die Zeiten zwischen der letzten Ziffer einer Zahl und der ersten Ziffer der nächsten 3-, 4- oder 5stelligen Zahl zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Tastaturen oder den 3-, 4- und 5stelligen Zahlen (Varianzanalyse,  $p > .05$ ). Die Vorbereitungszeit wird also nicht von der Zahlengrösse oder den verschiedenen Tastaturen beeinflusst.

Anzahl Ziffern ->	3	4	5
Piezotastatur flach	1536 (262)	1503 (183)	1514 (171)
Folientastatur mit Druckpunkt	1601 (270)	1617 (291)	1596 (191)
Folientastatur ohne Druckpunkt	1526 (196)	1521 (152)	1538 (178)
Wegastatur	1517 (207)	1525 (189)	1550 (155)

**Tabelle 3.2.3:** Durchschnittliche Zeiten zwischen der letzten Ziffer einer Zahl und der ersten Ziffer der nächsten Zahl und die Standardabweichungen (Klammer) in Millisekunden der verschiedenen Versuchstastaturen, aufgeteilt für 3-, 4- und 5stellige Zahlen.

### **3.2.5 Diskussion**

#### **3.2.5.1 Bewegungsablauf beim Tippen auf einer Tastatur**

Die Gleichmässigkeit der Fingerbewegung (siehe Abb. 3.1.7, 3.2.8) sowie die Anschlagfrequenz bei der Bedienung der Piezo- und der Wegtastaturen (3 Hz) (siehe Abb. 3.1.8, 3.2.11) lassen darauf schliessen, dass das Anschlagen gemäss einem automatisierten Programm stetig abläuft und das Tippen einer Taste nicht aus zwei einzelnen Bewegungen - hinunter und hinauf -, sondern aus einer einzigen sich wiederholenden Bewegung besteht. Die Fingerbewegung zum Tippen der Taste entspricht einem typischen Fingerklopfen, wie es jeder Mensch beherrscht. Die Tippbewegung ist also bereits als Motor-Programm vorhanden. Die Resultate zeigen aber Unterschiede in der Tippbewegung bei den verschiedenen Tastaturen. Die Tippbewegung muss während der Trainingsphase an die vorgegebenen Bedingungen der Tastatur angepasst und im Motor-Programm integriert worden sein. Bedeutsam ist, dass der Bewegungsablauf auf der Piezotastatur sehr ähnlich abläuft wie derjenige auf der Wegtastatur, obwohl ganz verschiedene Rückkopplungen der Tastaturen vorliegen. Mit dem Ablegen eines Motor-Programms neigt das motorische System vermehrt zu einem "Open-Loop-Verhalten". Bei geübten Tastaturbedienern werden Rückkopplungen lediglich zur Ueberwachung des Bewegungsablaufs (Efferenzkopie, vergl. Abschnitt 2.2.3) eingesetzt und nicht zur Regelung. In anderen Worten, die Ausführung der Bewegung ist nur noch vom abgelegten Motor-Programm abhängig, das sich selber kontrolliert. Für die korrekte Ausführung des Programms müssen optimale Bedingungen herrschen. So stört eine Tastatur, die nicht präzise auf die Tippbewegung reagiert, den vorbestimmten Bewegungsablauf. Bei beiden Folientastaturen zeigt die Frequenzanalyse durchschnittlich tiefere Anschlagfrequenzen als 2,5 Hz. Diese Anschlagfrequenzen liegen deutlich unter 3 Hz, wie sie für die Bedienung der Piezo- und der Wegtastaturen typisch waren. Die Voraussetzungen für einen problemlosen Ablauf des Motor-Programms sind für die Folientastaturen nicht günstig wie für die Piezo- oder die Wegtastatur. Ein zu hoher Druckpunkt (Folientastatur mit Druckpunkt) oder ein unpräzises Reagieren der Tastatur auf einen Anschlag (Folientastatur ohne Druckpunkt) kann den Bewegungsablauf so sehr beeinflussen, dass eine Veränderung der Anschlagfrequenz gemessen wird. Ob und wie diese Abweichung der Anschlagfrequenz die subjektive Beurteilung einer Tastatur beeinflusst, geht aus den Resultaten nicht hervor. Das Zusammenspiel der physikalischen Eigenschaften einer Tastatur, die auch für die Abweichung der Anschlagfrequenz verantwortlich sind, und die eigentliche Abweichung der Anschlagfrequenz selber könnten ein

bestimmender Faktor sein. Nehmen wir an, das Hand/Arm-System schwingt ähnlich wie bei einem Feder/Masse-System in einer bestimmten Resonanzfrequenz, dann kann sich der motorische Ablauf der Tippbewegung an der Resonanzfrequenz des Systems orientieren und so den Kraftaufwand gering halten. Eine Abweichung von dieser Resonanzfrequenz käme einer Abweichung vom effektivsten Ablauf der Tippbewegung gleich. Das würde heissen, dass bei einer Abweichung von der Resonanzfrequenz sich nicht nur die Arbeitsgeschwindigkeit ändert, sondern gleichzeitig der Kraftaufwand ansteigt. In einer Untersuchung der Bewegungsrhythmik der Finger (Experiment 4) soll auf diese Fragestellung noch näher eingegangen werden. Die Resultate der Analyse der Fingerbewegungen in der Z-Richtung zeigen bei kürzeren Anschlagzeiten ein aktives Einsetzen des m. flexor digitorum (Abb. 3.2.8). Bei der Weg- und der Piezotastatur zeigen die Resultate einen signifikanten Zusammenhang zwischen kurzen Zwischen-Ziffer-Zeiten und hoher Aktivität des m. flexor digitorum. Auf der anderen Seite zeigt auch ein Abnehmen der durchschnittlichen Anschlagfrequenz ein Ansteigen der Aktivität des m. flexor und des m. extensor digitorum. Die Abweichung von der Eigenfrequenz und die Zunahme der Muskelaktivität sind eine Folge der physikalischen Eigenschaften der Folientastaturen. So verlangt zum Beispiel das Ueberwinden eines hohen Druckpunktes mehr Muskelkraft und verlangsamt dadurch auch die Anschlagfrequenz. Bei der Folientastatur ohne Druckpunkt bewirkt ein unpräzises Auslösen der Taste beim Tippen eine Erhöhung der Muskelaktivität. Die Resultate zeigen eine Tendenz zu einer Erhöhung der Aktivität des m. extensor digitorum und eine Abnahme der Anschlagfrequenz. Beim Vergleich mit den 3stelligen Zwischen-Ziffer-Zeiten ist ein signifikanter Zusammenhang zwischen langen Zwischen-Ziffer-Zeiten und hoher Aktivität des m. extensor festgestellt worden. Der Tastaturbenutzer verkrampft sich vor allem im Bereich der Streckermuskulatur des Unterarms (Heben der Hand), da er nie absolut sicher ist, ob sein Tippen auch zum Erfolg führt. Im Gegensatz zu den anderen 3 Tastaturen zeigt die Folientastatur ohne Druckpunkt eine grössere Streuung der Zwischen-Ziffer-Zeiten und einen signifikanten Zusammenhang zwischen Abnahme der Zwischen-Ziffer-Zeiten und Zunahme der Anschlagfrequenz. Das "Open-Loop-Verhalten" bei der Durchführung einer Tippbewegung neigt im Fall der Folientastatur ohne Druckpunkt eher zu einem "Closed-Loop-Verhalten". Eine Feststellung, die auf die Piezo-, die Weg- und die Folientastatur mit Druckpunkt nicht zutrifft. Es ist anzunehmen, dass bei diesen 3 Tastaturen die organisatorische Ebene und die motorische Ebene (Bewegungsausführung) nur lose gekoppelt sind, also relativ unabhängig voneinander. Durch die Ungewissheit, ob die Tippbewegung zum Ziel führt, wird der Bewegungsablauf auf der Folientastatur ohne Druckpunkt hingegen auf allen Ebenen wesentlich

beeinflusst und beansprucht deshalb das muskuläre System vermehrt. Auf diese Fragestellung soll in einer weiteren Untersuchung (Experiment 3) näher eingegangen werden.

Inwiefern der Bewegungsablauf die Akzeptanz und die Leistung beeinflusst, geht aus den Resultaten nicht hervor. Die Akzeptanz, abgeleitet aus den Fragen 1 und 5, ist aber für die Piezo- und die Wegtastatur bedeutend höher als für die beiden Folientastaturen. Wie die Resultate weiter gezeigt haben, macht es keinen Unterschied, ob die Tasten der Tastatur einen Weg haben oder nicht. In beiden Fällen, Piezo- und Wegtastaturen, kann dieselbe Anschlagfrequenz erreicht werden. Auch die Akzeptanz und die Leistung der beiden Tastaturtypen zeigen keine nennenswerten Unterschiede. Es ist darum naheliegend zu folgern, dass für geübte Tastaturbenutzer eine konventionelle Wegtastatur nicht unbedingt besser ist als eine Tastatur ohne Weg. Ob und wie weit sich eine flache Tastatur (Piezotastatur) über taktile und akustische Rückkopplungen noch verbessern lässt, soll im nächsten Experiment untersucht werden.

### **3.2.5.2 Beurteilung der Methodik**

Die in dieser Studie angewandte Methodik eignete sich gut für vergleichende Messungen zwischen verschiedenen Tastaturtypen. Die Leistung ist als operationales Beurteilungsmass zu wenig empfindlich, um ergonomisch bedeutsame Unterschiede zwischen den Tastaturen festzuhalten. Einerseits waren die Probanden zu verschieden, um in der kurzen Zeit von nur 3 Minuten Testzeit schon signifikante Unterschiede messen zu können. Andererseits ist der Bewegungsapparat recht flexibel und kann sich deshalb zum Teil den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften einer Tastatur schnell anpassen. Eine grössere Anzahl Probanden sowie längere Untersuchungszeiten, bei denen vor allem die Ermüdung zum Tragen kommt, könnten Unterschiede in der Leistung hervorbringen. Die Akzeptanz ist hingegen ein Untersuchungselement, das sehr empfindlich auf Unzulänglichkeiten in der Bedienung einer Tastatur reagiert. Es ist darum wichtig, dass die Randbedingungen gut definiert sind, da die Akzeptanz sonst durch unbekannte Faktoren stark beeinflusst wird. Auch die Bewegungsanalyse zeigt sich als sehr empfindliche Methode, um Unterschiede in der Bedienung der verschiedenen Tastaturtypen zu finden. Die Beschleunigung der Finger kann nur näherungsweise errechnet werden, da die zeitliche Auflösung des Messsystems (60 Hz) nicht ausreichte, den Uebergang von der Abwärtsbewegung des Fingers auf die Taste genau zu erfassen. Um diesen Uebergang im Detail erfassen zu können, müsste die zeitliche Auflösung des Messsystems grösser sein (>200 Hz).

### **3.3 Experiment 2: Werden Leistung und Komfort beim Bedienen von weglosen Flach-tastaturen durch eine zusätzliche Rückkopplung verbessert?**

#### **3.3.1 Einleitung**

Im folgenden Experiment wurden 4 Tastaturen, eine Piezotastatur ganz flach, eine Piezotastatur mit Tastenrand, eine Piezotastatur mit Tastenrand und akustischem Signal zum Quittieren der Eingabe und eine Tastatur mit Tastenweg des Typs IBM (Anhang B), gegeneinander verglichen. Im Vordergrund stand die Fragestellung, ob ein Tastenrand (taktile Rückkopplung) oder ein akustisches Signal zum Quittieren der Eingabe (akustische Rückkopplung) die Bedienbarkeit einer Flachastatur verbessert. Die Piezotastatur wurde vor allem wegen des guten Abschneidens dieses Tastaturtyps im Experiment 1 für dieses Experiment eingesetzt. Die Resultate des ersten Experiments weisen darauf hin, dass keine messbaren Probleme bei der Bedienung der flachen Piezotastatur auftraten. Somit wird ein Vergleich zwischen Flachastaturen mit verschiedenen Tastaturoberflächen und zusätzlichem akustischem Signal möglich, da keine anderen Parameter der Tastatur die Leistung, die Akzeptanz und das motorische Verhalten wesentlich beeinflussen. Wegen der relativ hohen Fehlerrate der Wegastatur im Experiment 1 wurde für dieses Experiment eine Wegastatur mit Druckpunkt des Typs IBM eingesetzt. Die für dieses Experiment eingesetzte Untersuchungsmethodik ist in 3.1 beschrieben. Der Testablauf für dieses Experiment war derselbe wie für Experiment 1 (vergl. Abschnitt 3.2.3).

#### **3.3.2 Probanden**

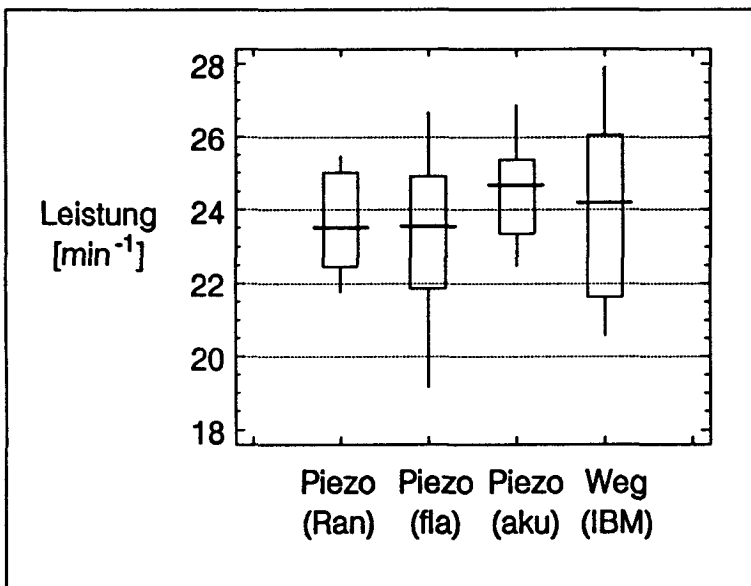
Die 12 Probanden waren Studenten der ETH-Zürich. Das Kollektiv setzte sich aus 12 Männern (Studenten der Elektrotechnik) im Alter zwischen 20 und 30 Jahren zusammen.

Wie in Experiment 1 musste jeder Proband an 3 verschiedenen Tagen alle Tastaturtypen je 3 Minuten bedienen. Dadurch konnte sie mit den 4 Tastaturtypen vertraut werden. Alle vier Tastaturen zeigen eine tendenzielle, aber nicht signifikante Steigerung der Leistung während der 3 Übungsphasen (F-Test,  $p > .05$ ). Ein ausgeprägter Lerneffekt war nicht zu erwarten, da die Probanden alle Studenten der Elektrotechnik waren und darum an Zahlentastaturen gewöhnt waren.

### 3.3.3 Resultate

#### 3.3.3.1 Leistung

Wie im Experiment 1 zeigt die Leistung, zusammengesetzt aus Eingabegeschwindigkeit und Fehlerrate, auch für dieses Experiment keine signifikanten Unterschiede (F-Test,  $p > .05$ ) zwischen den Tastaturen (Abb. 3.3.1). Die durchschnittliche Fehlerrate liegt für alle 4 Tastaturen zwischen 3,4 und 4,25 Fehlern, wobei die Piezotastatur mit Tastenrand und akustischem Signal mit 3,4 Fehlern am tiefsten und die Wegtastatur mit 4,25 Fehlern am höchsten liegt. Die durchschnittliche Anzahl eingegebener Zahlen während den 3-Minuten-Tests liegen zwischen 70 und 73 Zahlen, wobei die flache Piezotastatur mit 70 Eingaben am tiefsten und die Wegtastatur mit 73 Eingaben am höchsten liegt.



**Abb. 3.3.1:**  
Box and Whisker Plot der Leistungen im Experiment 1.  
Piezotastatur mit Tastenrand (Ran)  
Piezotastatur flach (fla)  
Piezotastatur mit Tastenrand und akustischem Signal (aku)  
Tastatur mit Weg (IBM)

### 3.3.3.2 Akzeptanz

Die Antworten auf die Frage "Wie war die Tastatur zu bedienen?" unterscheiden sich nicht signifikant (F-Test,  $p > .05$ ). Die Piezotastatur mit Tastenrand und akustischem Signal zeigt aber eine Tendenz zu mehr Bedienungskomfort im Vergleich mit den anderen drei Tastaturen (Abb. 3.3.2).

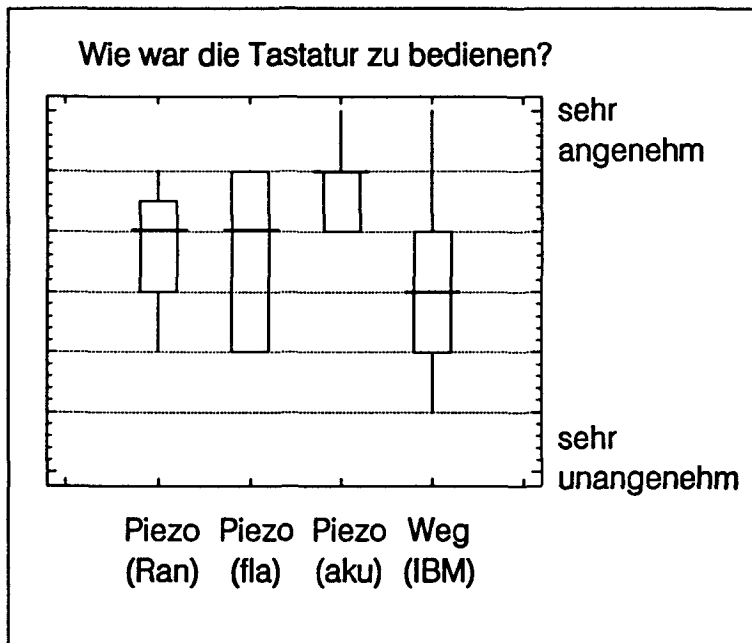


Abb. 3.3.2:

Box and Whisker Plot der Antworten auf die Frage "Wie war die Tastatur zu bedienen?"

Piezotastatur mit Tastenrand (Ran)

Piezotastatur flach (fla)

Piezotastatur mit Tastenrand und akustischem Signal (aku)

Tastatur mit Weg (IBM)

Wie schon in Experiment 1 zeigt der Härtevergleich der Tastaturen (Abb. 3.3.3) auch in diesem Experiment hoch signifikante Unterschiede (F-Test,  $p < .01$ ) zwischen den Tastaturen. Im Vergleich zwischen den Tastaturen unterscheidet sich vor allem die flache Piezotastatur von der Piezotastatur mit Tastenrand und akustischem Signal und der Wegtastatur signifikant (Scheffe;  $p < .05$ ). Vergleicht man den Median und die Verteilung der Härteeinstufungen, so fällt auf, dass mit zunehmender Rückkopplung (Oberflächenstruktur und akustisches Signal) das Härtegefühl der Piezotastaturen (gleiche Oberflächenhärte) abnimmt. Die Piezotastatur mit Tastenrand und akustischem Signal wird sogar als beinahe gleich weich empfunden wie die Wegtastatur.

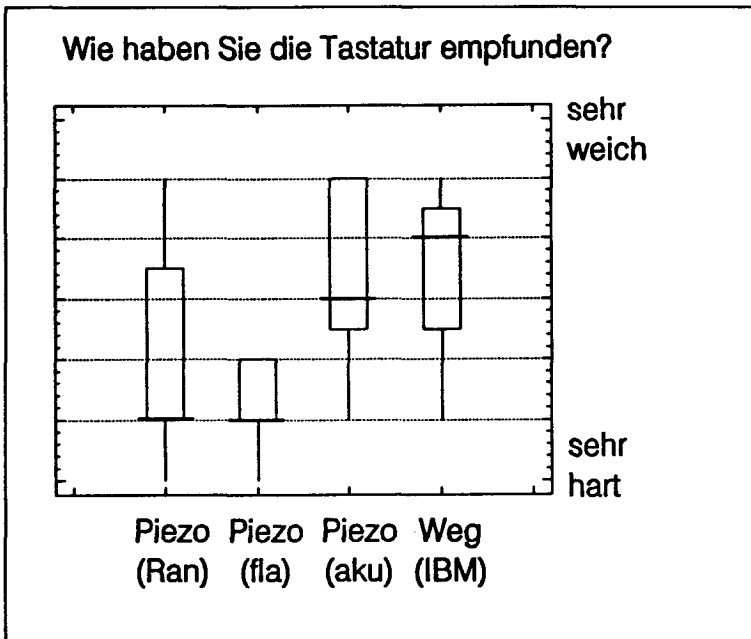


Abb. 3.3.3:

Box and Whisker Plot der Antworten auf die Frage "Wie haben Sie die Tastatur empfunden?"

Piezotastatur mit Tastenrand (Ran)

Piezotastatur flach (fla)

Piezotastatur mit Tastenrand und akustischem Signal (aku)

Tastatur mit Weg (IBM)

Als vertrauteste wird wie in Experiment 1 auch hier die Wegtastatur bezeichnet (siehe Abb.3.3.5). Sie zeigt aber nur einen signifikanten Unterschied zur flachen Piezotastatur (Scheffe,  $p > .05$ ); d.h., dass auch bei dieser Frage die zusätzliche Rückkopplung (Oberflächenstruktur und akustisches Signal) die Beurteilung der Tastaturen beeinflusst.

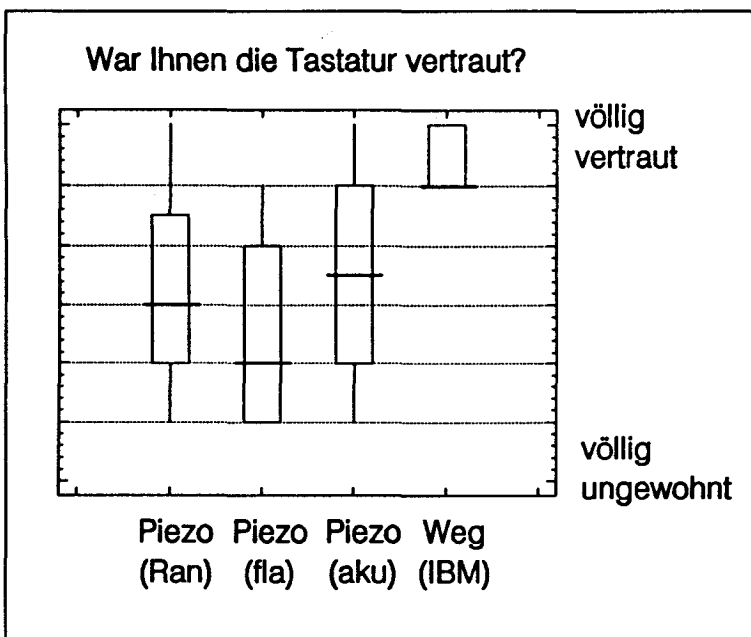


Abb. 3.3.4:

Box and Whisker Plot der Antworten auf die Frage "War Ihnen die Tastatur vertraut?"

Piezotastatur mit Tastenrand (Ran)

Piezotastatur flach (fla)

Piezotastatur mit Tastenrand und akustischem Signal (aku)

Tastatur mit Weg (IBM)



Der Vergleich der Reaktivität der verschiedenen Tastaturen ergibt zwar einen signifikanten Unterschied zwischen den Tastaturen (F-Test;  $p < .05$ ), im paarweisen Vergleich kann aber kein signifikanter Unterschied mehr festgestellt werden (Scheffe;  $p > .05$ ). Beim Vergleich der Verteilungen (Abb. 3.3.5) zeigt sich wie in Experiment 1 ein Unterschied zwischen der Wegtastatur und den Piezotastaturen, wobei die Reaktivität der Piezotastaturen als schneller beurteilt wird als die der Wegtastatur. In der Gruppe der Piezotastaturen kann kein Einfluss der Rückkopplungen auf die Beurteilung ausgemacht werden.

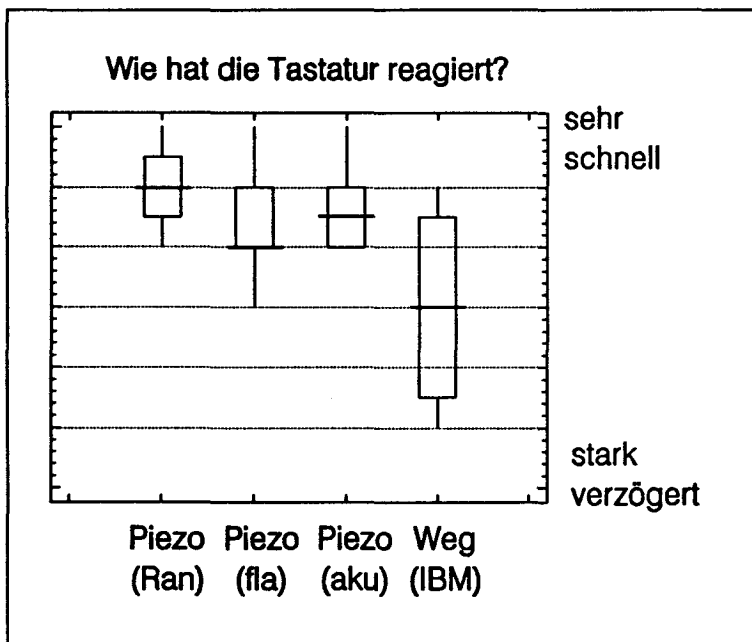


Abb. 3.3.5:

Box and Whisker Plot der Antworten auf die Frage "Wie hat die Tastatur reagiert?"

Piezotastatur mit Tastenrand (Ran)

Piezotastatur flach (fla)

Piezotastatur mit Tastenrand und akustischem Signal (aku)

Tastatur mit Weg (IBM)

Die Antworten auf die Frage "Wie hat Ihnen die Tastatur gefallen?" unterscheiden sich hoch signifikant (F-Test,  $p < .01$ ). Im paarweisen Vergleich zeigt die Piezotastatur mit Tastenrand und akustischem Signal die höchsten Werte, unterscheidet sich aber nur signifikant von der flachen Piezotastatur (Scheffe;  $p < .05$ ). Der Vergleich der Verteilungen (Abb. 3.3.6) zeigt auch bei dieser Frage einen deutlichen Einfluss der zusätzlichen Rückkopplungen (Oberflächenstruktur und akustisches Signal) auf die Beurteilung der Piezotastaturen. Interessant ist auch, dass die Probanden an der Piezotastatur mit Tastenrand und akustischem Signal mehr Gefallen finden als an der konventionellen Wegtastatur des Typs IBM.

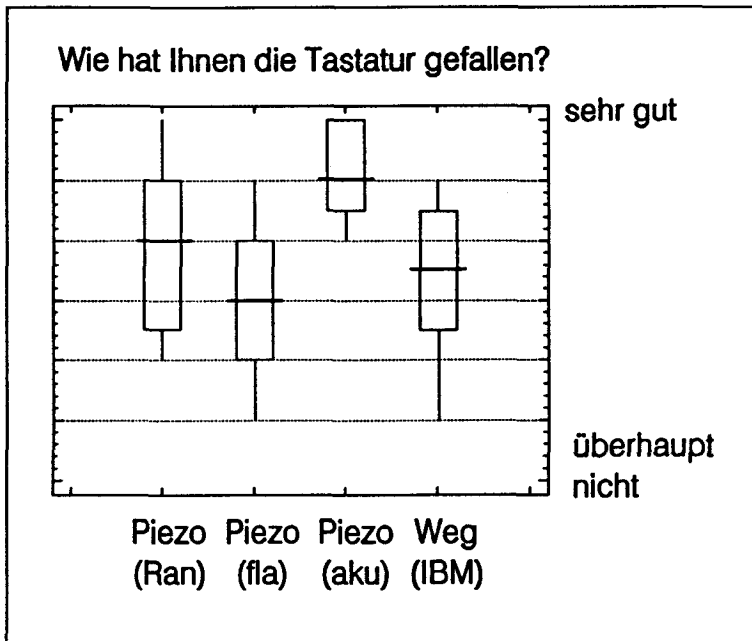


Abb. 3.3.6:

Box and Whisker Plot der Antworten auf die Frage "Wie hat Ihnen die Tastatur gefallen?"

Piezotastatur mit Tastenrand (Ran)

Piezotastatur flach (fla)

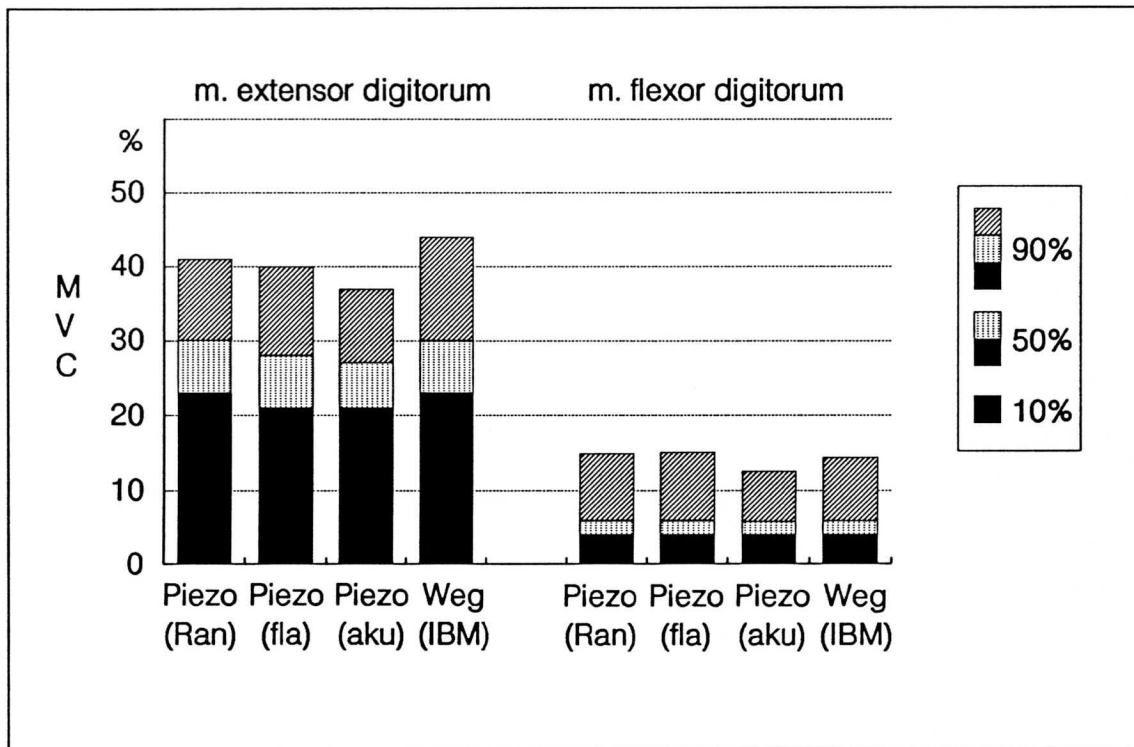
Piezotastatur mit Tastenrand und akustischem Signal (aku)

Tastatur mit Weg (IBM)

Wie in Experiment 1 hat eine Spearman-Rang-Korrelation ergeben, dass die Antworten zu den Fragen "Wie war die Tastatur zu bedienen?" und "Wie hat Ihnen die Tastatur gefallen?" ähnliche Antworten hervorrufen, wobei die Korrelation aber nur für die Wegtastatur signifikant ist (Wegtastatur,  $R = .81$ ,  $p < .01$ ; Piezotastatur mit Tastenrand,  $R = .53$ ,  $p = .08$ ; Piezotastatur flach,  $R = .53$ ,  $p = .08$ ). Die Piezotastatur mit Tastenrand und akustischem Signal zeigt keinen Zusammenhang zwischen den beiden oben erwähnten Fragen.

### 3.3.3.2 Bewegungsanalyse

Die Bewegungsabläufe sind auf allen vier Tastaturen sehr ähnlich. Wie schon in Experiment 1 zeigen die Piezotastaturen und die Wegtastatur gleichmässige Tippbewegungen mit einer Anschlagdauer zwischen 250 und 300 ms. Die gemittelte Frequenzanalyse der Tippbewegungen zeigt für alle vier Tastaturen den gleichen Frequenzverlauf mit einem ausgeprägten Gipfel bei 3,75 Hz (Abb. 3.1.6).



**Abb. 3.3.7:** Dargestellt ist die Aktivität des m. extensor und des m. flexor digitorum.  
Piezotastatur mit Tastenrand (Ran)  
Piezotastatur flach (fla)  
Piezotastatur mit Tastenrand und akustischem Signal (aku)  
Tastatur mit Weg (IBM)

Der Vergleich der einzelnen Anschlagfrequenzen zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Tastaturen. Die verschiedenen Tastaturen haben also keinen messbaren Einfluss auf den Bewegungsablauf des Zeigefingers beim Tippen der vorgegebenen Zahlen. Auch die Fingergeschwindigkeiten sowie die Aktivitäten des m. flexor digitorum und des m. extensor digitorum (Abb.3.3.7) unterscheiden sich nicht signifikant zwischen den

**Tastaturen.** Die Aktivität des m. flexor und des m. extensor bei der Bedienung der Piezo-tastatur mit Tastenrand und akustischem Signal neigt aber im dynamischen Bereich zu tieferen Werten.

Die Spearman-Rang-Korrelation zwischen den Resultaten der Beurteilung, der Leistung und der Bewegungsabläufe zeigt keine nennenswerten Zusammenhänge bei den vier Tastaturen.

### 3.3.4 Diskussion

Im Gegensatz zu den Resultaten in Experiment 1 zeigen die Resultate dieses Experiments klar, dass die vier getesteten Tastaturen den Bewegungsablauf nicht massgeblich beeinflussen. Das Motor-Programm für die Steuerung des Bewegungsablaufs einer Tippbewegung kann ungehindert ablaufen. Die zusätzlichen Rückkopplungen der getesteten Piezotastaturen sind also unwichtig für die Ausführung der Tippbewegung. Interessant ist aber, dass sich die Beurteilungskriterien mit zusätzlicher Rückkopplung ändern. Die Akzeptanz wird gehoben. Die Tastaturen werden trotz gleicher Oberflächenhärte als weicher empfunden. Die zusätzlichen Afferenzen, die von der Peripherie (Finger/Ohr) an das ZNS zurückfließen, helfen vermutlich ein klareres Bild über den Ausgang des Bewegungsablaufs zu schaffen. Die daraus resultierende Zunahme der Akzeptanz könnte die Folge einer Entlastung anderer Ueberwachungssysteme (propriozeptives oder visuelles System) sein. Dadurch werden diese Systeme für andere Aufgaben wie die Planung von neuen Bewegungsabläufen frei. Durch die sehr konkrete Information der zusätzlichen Rückkopplung in bezug auf den Ausgang des Bewegungsablaufs wird die Ueberwachung des Bewegungsablaufs stark erleichtert und somit Unsicherheiten auf der Ebene der Bewegungsorganisation ausgeräumt. In anderen Worten, während der Eingabe von Zahlen auf der Tastatur wird durch die zusätzliche Rückkopplung bestätigt, ob die eingetippte Zahl angenommen wurde (akustische Rückkopplung) und ob man den Finger beim Eingeben der Zahl gut plazierte hatte (taktile Rückkopplung). Somit hat man Gewähr, ob das, was man machen wollte, auch wirklich ausgeführt wurde.

### 3.4 Experiment 3: Vergleich von Piezotastaturen mit variablen Totzeiten

#### 3.4.1 Einleitung

Im folgenden Experiment wurden 4 Piezotastaturen mit Tastenrand und akustischem Signal (Anhang B), aber mit unterschiedlichen Bereichen von Totzeiten zwischen den eingegebenen Zahlen gegeneinander verglichen. Im Vordergrund stand die Fragestellung, ob ein Unsicherheitsfaktor beim Bedienen einer Tastatur die Muskelaktivität erhöht. Die Resultate des Experiments 1 weisen auf ein solches Verhalten hin (siehe Abschnitt 3.2.5).

Mittels eines Randomgenerators wurden verschiedene Totzeiten für eine bestimmte Bandbreite gerechnet und im Versuch eingesetzt. Somit variierte die Totzeit zwischen jeder Ziffer in einer definierten Bandbreite. Der Versuchstastatur 1 wurde eine konstante Totzeit von 70 ms zugeordnet; bei der Versuchstastatur 2 variierte die Totzeit in einer Bandbreite zwischen 20 ms und 70 ms; bei der Tastatur 3 variierte die Totzeit zwischen 70 ms und 200 ms; bei der Tastatur 4 variierte die Totzeit zwischen 70 ms und 400 ms. Die konstante Totzeit von 70 ms erwies sich als bester Kompromiss zwischen einer zu kurzen Totzeit, bei welcher ein Prellen der Taste auftreten könnte (eine Eingabe einer Ziffer erzeugt ungewollt mehrere Ziffern), und einer zu langen Totzeit, bei welcher der Bewegungsablauf behindert würde. Deshalb wurde auch in den ersten beiden Experimenten eine Totzeit von 70 ms eingesetzt. Wie aus verschiedenen Tracking-Experimenten bekannt ist (Knight<sup>1</sup>), kann sich ein Proband am besten an einer konstanten Grösse orientieren, findet es aber schwierig, eine sich stochastisch verändernde Grösse zu handhaben. Mit einer sich stochastisch ändernden Totzeit sollte es also möglich sein, Unsicherheit bei der Bedienung einer Tastatur zu schaffen. Zu berücksichtigen ist aber, dass sich der Mensch relativ schnell adaptiert. Geübte Schreibmaschinenschreiber zum Beispiel können sich relativ schnell auf zeitliche Unregelmässigkeiten des rückgekoppelten akustischen Signals beim Schreiben auf einer Tastatur einstellen (Long<sup>2</sup>). Wie die Resultate von Experiment 1 und 2 gezeigt haben, wird die Ebene der Bewegungsausführung durch zusätzliche Rückkopplungen unwesentlich beeinflusst. Bei einer Behinderung der Bewegungsausführung durch zu hohen Druckpunkt hingegen stellt sich ein anderes Bewegungsverhalten ein. Somit muss die im

---

<sup>1</sup> Knight, J.L., Manual Control and Tracking: Aus Salvendy, G., Handbook of Human Factors, John Wiley & Sons, 182-218 (1987)

<sup>2</sup> Long, J., Effects of Delayed Irregular Feedback on Unskilled and Skilled Keying Performance, Ergonomics, 19 (2), 183-202 (1976)

Test eingebaute Variabilität eine Behinderung im normalen Bewegungsablauf schaffen, um eine Reaktion messen zu können. Mit der Bandbreite 70 ms bis 400 ms Totzeit sollte eine Reaktion provoziert werden können, da die Kontinuität im Bewegungsablauf gestört wird. Das heisst, dass Tippbewegungen mit einer Anschlagdauer von weniger als 400 ms gestört werden. Mit der Bandbreite 70 ms bis 200 ms sollte hingegen nur eine geringe oder gar keine Reaktion auftreten, da der Bewegungsablauf durch die variierende Totzeit nicht wesentlich gestört wird. Die Bewegungsanalyse sowie die Analyse der Zwischen-Ziffer-Zeiten in Experiment 1 und 2 zeigen nämlich, dass die Anschlagzeit über 200 ms liegt. (Die durchschnittliche Zwischen-Ziffer-Zeit der Piezotastatur (fla) in Experiment 1 beträgt 368 ms mit einer Standard-Abweichung von 113 ms; vergleiche auch die Frequenzspektren der Fingerbewegungen in Abb. 3.1.6 und Abb. 3.2.11.) Mit den kurzen Totzeiten der Bandbreite 20 ms bis 70 ms sollte eine Reaktion im Bewegungsablauf (Erhöhung der Aktivität des m. extensor digitorum) erzeugt werden, die durch ein zu schnelles Reagieren der Taste provoziert wird. Beim normalen Tippen auf der Taste bleibt der Finger ca. 20 ms bis 40 ms auf der Taste stehen, bevor er wieder nach oben schnellt (siehe Abb. 3.1.9). Wenn die Totzeit der Taste kurz genug ist, könnte die Taste während dieser Zeit durch den Fingerdruck wieder ausgelöst werden. Bei dieser Bandbreite würde man also eine erhöhte Fehlerrate erwarten, die indirekt auch den Bewegungsablauf beeinflusst. Um diesem Problem entgegenzutreten, müsste der Proband die Aufenthaltsdauer des Fingers auf der Taste verringern, was eine Erhöhung der Aktivität der Streckermuskulatur zur Folge hätte. Die für dieses Experiment eingesetzte Untersuchungsmethodik ist in 3.1 beschrieben.

### 3.4.2 Probanden

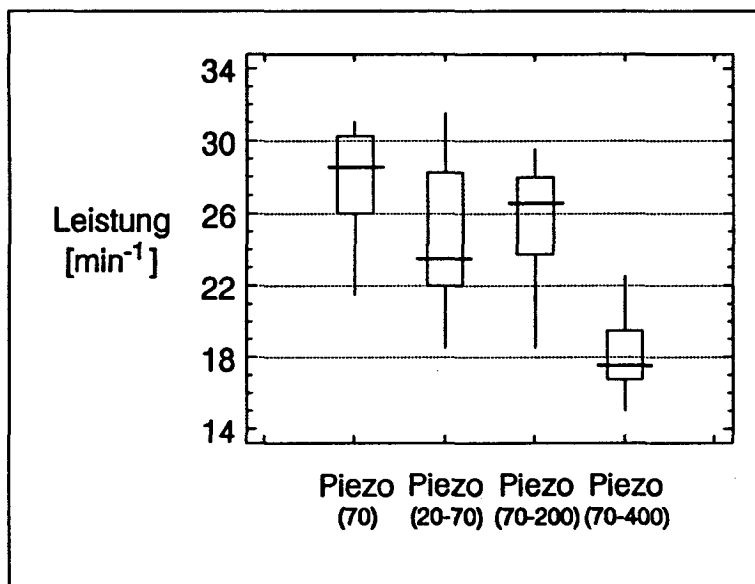
In diesem Versuch wurden 12 Probanden (Studenten und Mitarbeiter der ETH-Zürich) getestet. Das Kollektiv setzte sich aus 3 Frauen und 9 Männern zusammen, im Alter zwischen 20 und 30 Jahren. Jeder Proband musste an 3 verschiedenen Tagen je 2 mal die Piezotastatur mit einer konstanten Totzeit von 70 ms bedienen. Dadurch konnte Sie mit der Piezotastatur vertraut werden. Der Proband wurde während dieser Trainingsphase nicht über die Testbedingungen informiert, damit sie sich nicht auf die variablen Totzeiten einstellen konnte. Die Resultate zeigen eine tendenzielle, aber nicht signifikante Steigerung (F-Test,  $p > .05$ ) der Leistung während der Trainingsphase.

Der Testablauf war derselbe, wie er in Abschnitt 3.2.3 beschrieben ist.

### 3.4.3 Resultate

#### 3.4.3.1 Leistung

Die Leistung, zusammengesetzt aus Eingabegeschwindigkeit und Fehlerrate, zeigt hoch signifikante Unterschiede (F-Test,  $p < .01$ ) zwischen den Tastaturen. Aus der Abbildung 3.4.1 ist ersichtlich, dass auf der Piezotastatur mit einer Bandbreite zwischen 70 ms und 400 ms viel weniger Leistung erbracht wird als auf den anderen drei Tastaturen (Scheffe,  $p < .05$ ). Die Piezotastatur mit 70 ms zeigt die höchste Leistung, gefolgt von der Piezotastatur mit 70 ms bis 200 ms und der Piezotastatur mit 20 ms bis 70 ms. Die etwas tiefere Leistung der Piezotastatur mit 20 ms bis 70 ms ist wie erwartet auf die hohe Fehlerrate von durchschnittlich 9 Fehlern zurückzuführen. Eine hohe Fehlerrate (durchschnittlich 8 Fehler) ist auch bei der Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms zu verzeichnen, wobei nicht nur die Fehlerrate, sondern auch die Eingaberate zu der signifikant schlechteren Leistung beigetragen hat. Die Piezotastaturen mit 70 ms und mit 70 ms bis 200 ms zeigen beide eine Fehlerrate von durchschnittlich 4 Fehlern.



**Abb. 3.4.1:**  
Box and Whisker Plot der Leistungen im Experiment 3.  
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms  
Piezotastatur mit Totzeiten von 20 ms - 70 ms  
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 200 ms  
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 400 ms



### 3.4.3.2 Akzeptanz

Die Antworten auf die Frage "Wie war die Tastatur zu bedienen?" (Abb. 3.4.2) unterscheiden sich hoch signifikant (F-Test,  $p < .01$ ). Die Piezotastatur mit einer Bandbreite von 70 ms bis 400 ms wird am unangenehmsten und die Piezotastatur mit konstanter Totzeit von 70 ms am angenehmsten empfunden. Der Unterschied ist signifikant (Scheffe,  $p < .05$ ). Auch die Piezotastatur mit 20 ms bis 70 ms unterscheidet sich signifikant von der Piezotastatur mit 70 ms (Scheffe,  $p < .05$ ). Die Bedienung der Piezotastaturen mit den Bandbreiten von 70 ms bis 400 ms und von 20 ms bis 70 ms wird also als unangenehmer eingestuft als die Bedienung der Piezotastatur mit konstant 70 ms. Die Bedienung der Piezotastatur mit einer Bandbreite von 70 ms bis 200 ms zeigt keine Unterschiede zu der Piezotastatur mit konstant 70 ms. Sie wird also nicht als unangenehmer empfunden.

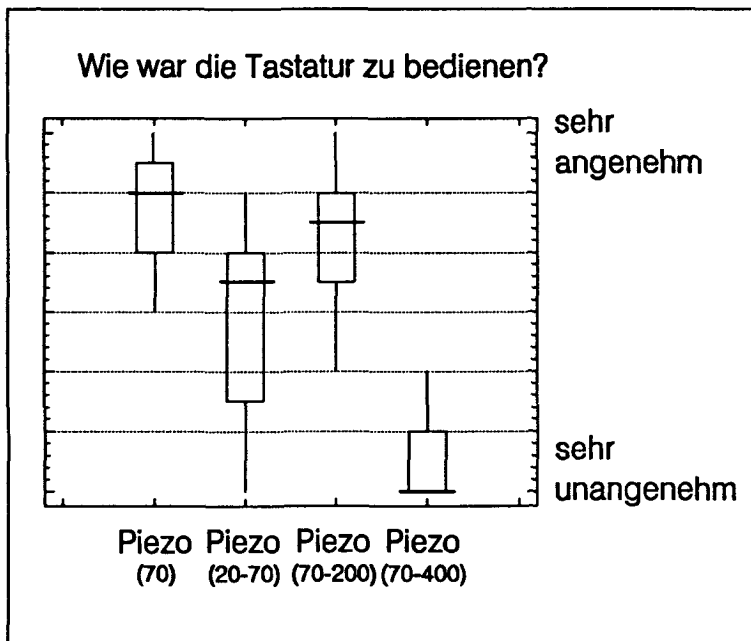


Abb. 3.4.2:

Box and Whisker Plot der Antworten auf die Frage "Wie war die Tastatur zu bedienen?"

Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms

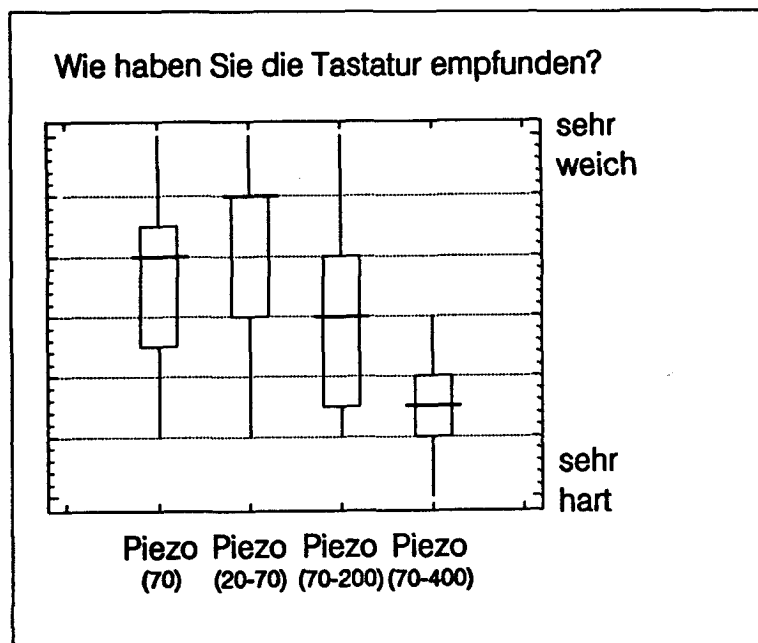
Piezotastatur mit Totzeiten von 20 ms - 70 ms

Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 200 ms

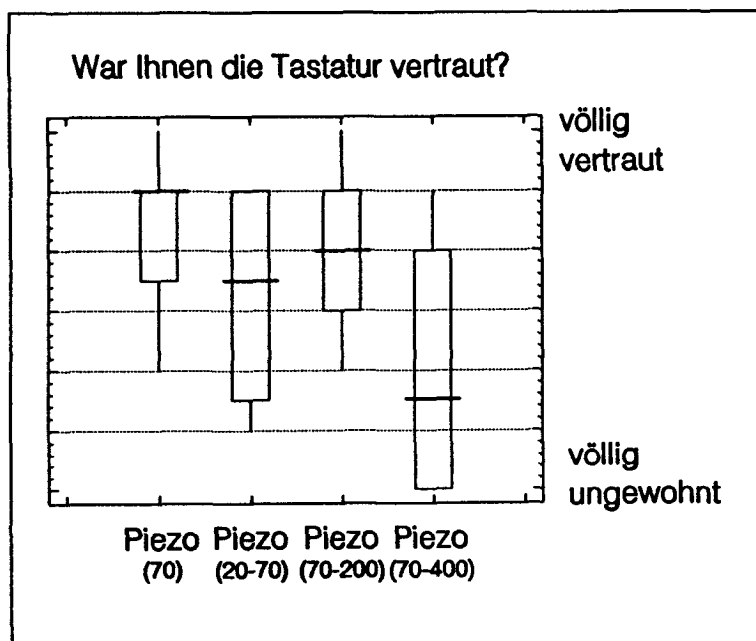
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 400 ms

Die Beurteilung der Härte der Tastaturen (Abb. 3.4.3) unterscheidet sich hoch signifikant (F-Test,  $p < .01$ ). Die Piezotastatur mit einer Bandbreite von 70 ms bis 400 ms wird als signifikant härter beurteilt (Scheffe,  $p < .05$ ) als die Piezotastatur mit 20 ms bis 70 ms, zeigt aber keine signifikanten Unterschiede zu den anderen beiden Piezotastaturen. Bei Betrachtung der Mediane (Abb. 3.4.3) und der Mittelwerte der verschiedenen Tastaturen zeigt sich eine klare Tendenz, die Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms als härter zu beurteilen als die anderen drei Piezotastaturen. Obwohl die Stellkraft nicht verändert wird und die

Oberflächenhärte für alle vier Tastaturen dieselbe ist, werden die vier Tastaturen als verschieden hart beurteilt.



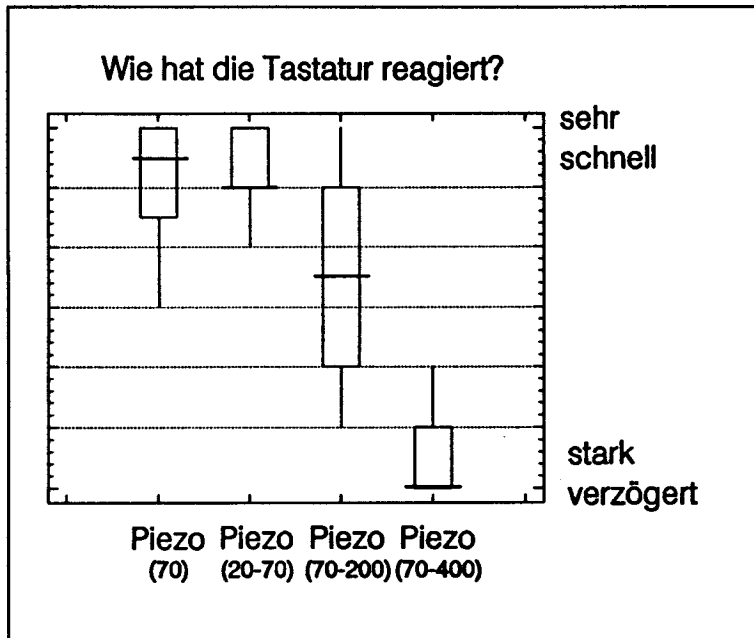
**Abb. 3.4.3:**  
Box and Whisker Plot der Antworten auf die Frage "Wie haben Sie die Tastatur empfunden?"  
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms  
Piezotastatur mit Totzeiten von 20 ms - 70 ms  
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 200 ms  
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 400 ms



**Abb. 3.4.4:**  
Box and Whisker Plot der Antworten auf die Frage "War Ihnen die Tastatur vertraut?"  
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms  
Piezotastatur mit Totzeiten von 20 ms - 70 ms  
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 200 ms  
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 400 ms

Auch die Frage "War Ihnen die Tastatur vertraut?" (Abb. 3.4.4) beantworten die Probanden mit hoch signifikanten Unterschieden (F-Test,  $p < .01$ ). Als vertrauteste der vier

Tastaturen wird die Piezotastatur mit konstant 70 ms bezeichnet. Sie unterscheidet sich signifikant von der Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms (Scheffe,  $p < .05$ ), zeigt aber keine nennenswerten Unterschiede zu den anderen beiden Tastaturen.



**Abb. 3.4.5:**

Box and Whisker Plot der Antworten auf die Frage "Wie hat die Tastatur reagiert?"

Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms

Piezotastatur mit Totzeiten von 20 ms - 70 ms

Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 200 ms

Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 400 ms

Die Antworten auf die Frage "Wie hat die Tastatur reagiert?" (Abb 3.4.5) zeigen hoch signifikante Unterschiede (F-Test,  $p < .01$ ). Die Reaktivität der Piezotastaturen mit konstant 70 ms und mit 20 ms bis 70 ms wird als signifikant schneller beurteilt als die Reaktivität der beiden anderen Piezotastaturen (Scheffe,  $p < .05$ ). Die Reaktivität der Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms wird am langsamsten beurteilt.

Die Antworten auf die Frage "Wie hat Ihnen die Tastatur gefallen?" (Abb. 3.4.6) unterscheiden sich wiederum hoch signifikant (F-Test,  $p < .01$ ). Die Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms wird signifikant schlechter bewertet als die anderen drei Piezotastaturen (Scheffe,  $p < .05$ ). Obwohl sich die Piezotastatur mit 20 ms bis 70 ms nicht signifikant von den Piezotastaturen mit 70 ms und 70 ms bis 200 ms unterscheidet, zeigt sie doch eine Tendenz zu einer schlechteren Bewertung.

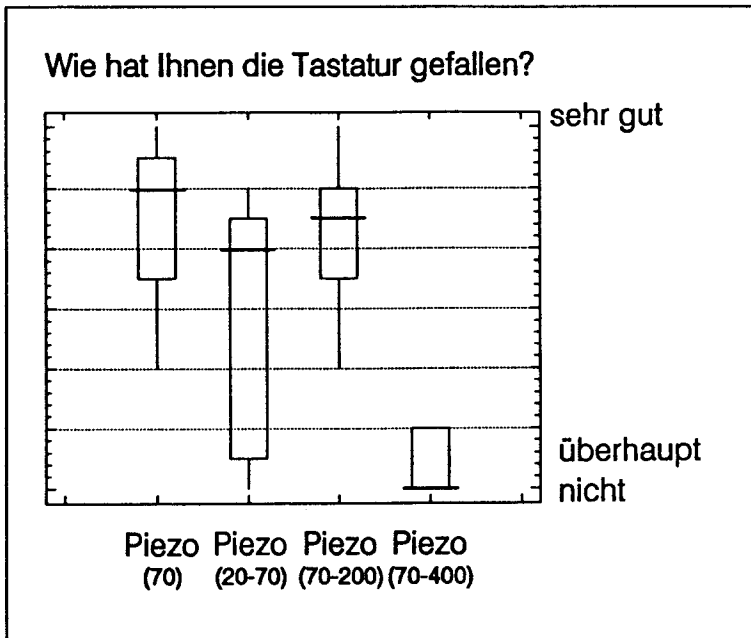


Abb. 3.4.6:

Box and Whisker Plot der Antworten auf die Frage "Wie hat Ihnen die Tastatur gefallen?"

Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms

Piezotastatur mit Totzeiten von 20 ms - 70 ms

Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 200 ms

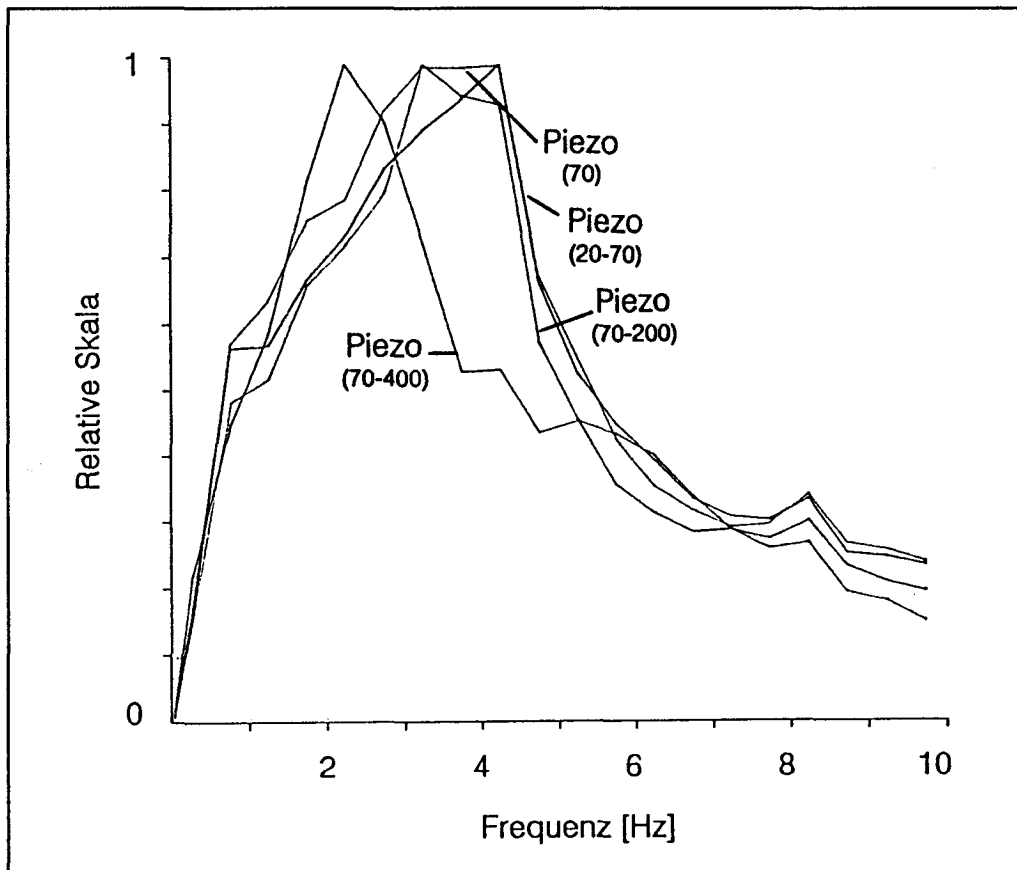
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 400 ms

Wie in Experiment 1 zeigt eine Spearman-Rang-Korrelation auch für dieses Experiment, dass die Antworten zu den Fragen "Wie war die Tastatur zu bedienen?" und "Wie hat Ihnen die Tastatur gefallen?" stark korrelieren ( $R > .75$ ,  $p < .05$ ). Somit wird auch hier bestätigt, dass diese beiden Fragen als Einheit betrachtet werden können und so als Mass der Akzeptanz gelten. Wie die Spearman-Rang-Korrelation weiter zeigt, beurteilen die Probanden die sehr kurzen Totzeiten der Piezotastatur mit 20 ms bis 70 ms als negativen Faktor. Je schneller die Reaktivität dieser Tastatur beurteilt wird, desto geringer sind die Akzeptanz ( $R < -.56$ ,  $p < .05$ ) und die Leistung ( $R = -.72$ ,  $p < .05$ ). Mit der Leistung nimmt auch die Akzeptanz zu ( $R = .66$ ,  $p < .05$ ). Die kurzen Totzeiten zwischen 20 ms und 70 ms stören einige der Benutzer, vermutlich weil sie dadurch nicht die volle Leistung erbringen können. Die Korrelationsanalyse ergibt sonst keine weiteren signifikanten Korrelationen zwischen den Fragen und der Leistung.

### 3.4.3.3 Bewegungsanalyse

#### 3.4.3.3.1 Frequenzanalyse der Fingerbewegungen und der Zwischen-Ziffer-Zeiten

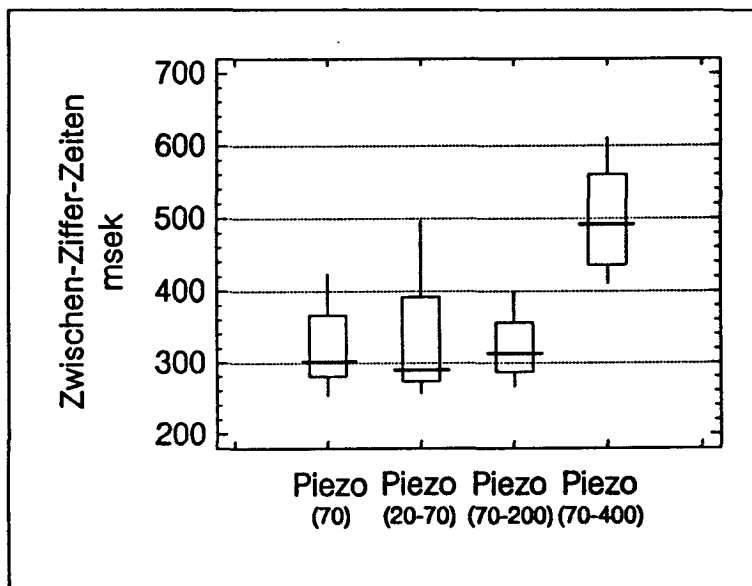
Wie in Experiment 1 und 2 zeigen auch in diesem Experiment die meisten Probanden bei der Bedienung der Piezotastatur mit konstanter Totzeit von 70 ms Fingerbewegungen mit Anschlagzeiten zwischen 200 ms und 300 ms (Abb. 3.4.9). Auch die beiden Piezotastaturen mit den Bandbreiten 20 ms bis 70 ms und 70 ms bis 200 ms zeigen Anschlagzeiten zwischen 200 ms und 300 ms. Die Piezotastatur mit einer Bandbreite von 70 ms bis 400 ms hingegen zeigt längere Anschlagzeiten (Abb. 3.4.10).



**Abb. 3.4.7:** Frequenzanalyse der Fingerbewegung in der Z-Achse  
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms  
Piezotastatur mit Totzeiten von 20 ms - 70 ms  
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 200 ms  
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 400 ms

Dies wird bestätigt durch die Frequenzanalyse, die für die Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms eine signifikant kleinere Anschlagfrequenz ergibt als für die anderen drei Tastaturen (Scheffe,  $p < .05$ ). Die mittlere Anschlagfrequenz für die Piezotastatur mit 70 ms und 400 ms liegt bei 2.25 Hz; für die anderen drei Tastaturen liegt sie zwischen 3.25 Hz und 4.25 Hz (Abb. 3.4.7).

Die Analyse der Zwischen-Ziffer-Zeiten ergibt wie bei der Frequenzanalyse signifikante Unterschiede zwischen den vier Tastaturen (F-Test,  $p < .05$ ). Bei den Einzelvergleichen zeigt die Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms signifikant längere Zwischen-Ziffer-Zeiten als für die anderen drei Tastaturen (Scheffe,  $p < .05$ ) (Abb. 3.4.8).



**Abb. 3.4.8:**

Box and Whisker Plot der durchschnittlichen Zwischen-Ziffer-Zeiten in Millisekunden der Probanden beim Bedienen der verschiedenen Versuchstastaturen für 3stellige Zahlen.

Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms

Piezotastatur mit Totzeiten von 20 ms - 70 ms

Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 200 ms

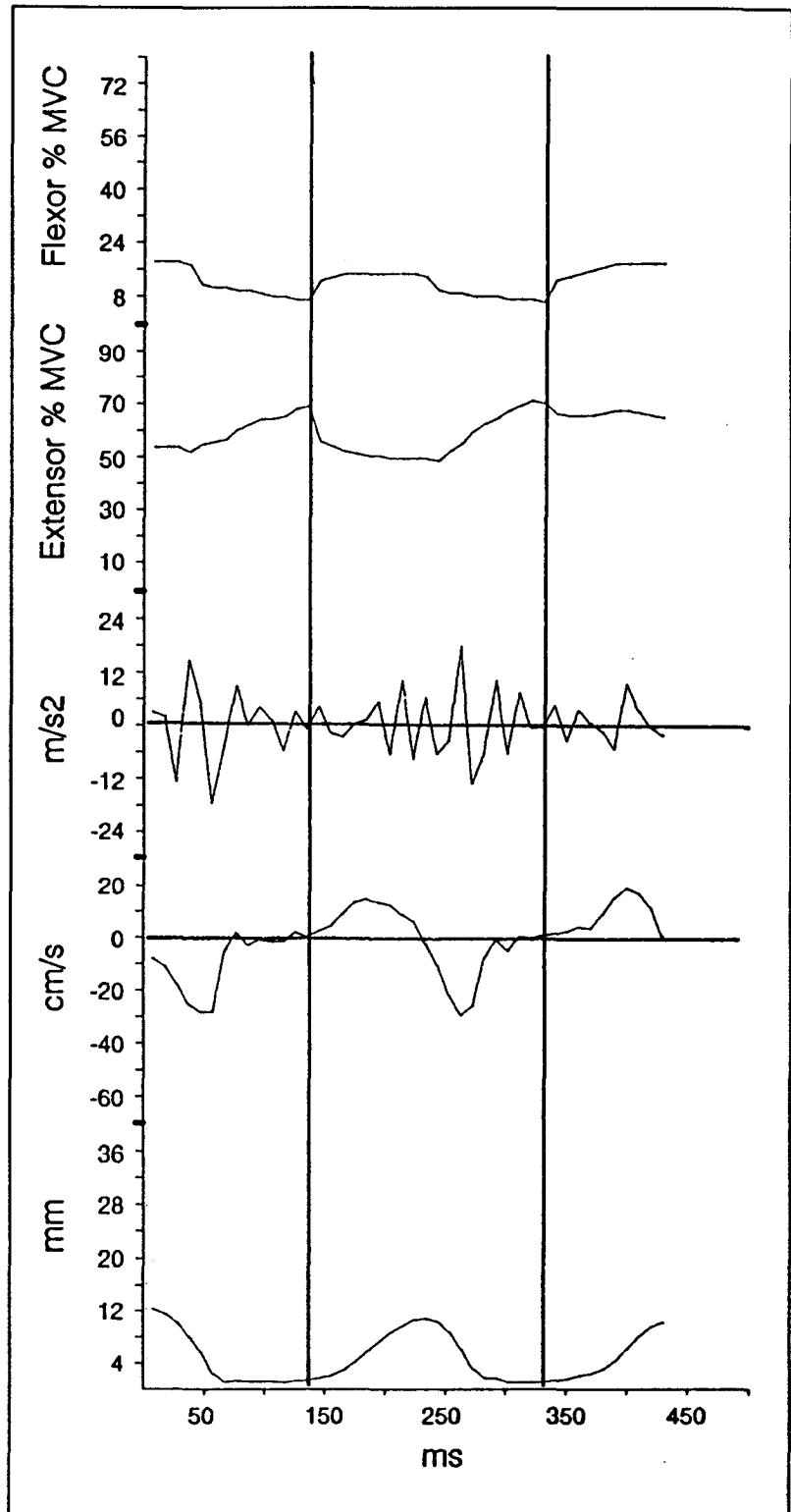
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 400 ms

Ausser für die Piezotastatur mit 20 ms bis 70 ms ergibt die Spearman-Rang-Korrelation eine hohe negative Korrelation zwischen den Resultaten der Frequenzanalyse und den Resultaten der Zwischen-Ziffer-Zeiten (70 ms,  $R = -.69$ ,  $p < .05$ ; 70 ms - 200 ms,  $R = -.65$ ,  $p < .05$ ; 70 ms - 400 ms,  $R = -.59$ ,  $p < .05$ ). Das bedeutet, dass mit einer Zunahme der Zwischen-Ziffer-Zeiten die Anschlagfrequenz abnimmt. Die Probanden stellen sich also auf die längeren Totzeiten ein, indem sie langsamer tippen. Interessanterweise zeigen sich aber zwischen den Tastaturen keine Unterschiede der Fingergeschwindigkeiten. Das heisst, dass nicht die gesamte Anschlagbewegung verlangsamt wird, sondern nur der Anteil, wo sich der Finger entweder auf der Taste befindet oder über der Tastatur beim Warten auf den nächsten Anschlag. Die beiden Abbildungen 3.4.9 und 3.4.10 veranschaulichen ein

solches Verhalten. Die Piezotastatur mit konstanten 70 ms Totzeit zeigt eine Anschlagzeit von 250 ms und eine Aufenthaltsdauer des Fingers auf der Taste von 80 ms. Bei der Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms beträgt die Anschlagzeit 350 ms, und die Aufenthaltsdauer des Fingers auf der Taste verlängerte sich auf 150 ms.

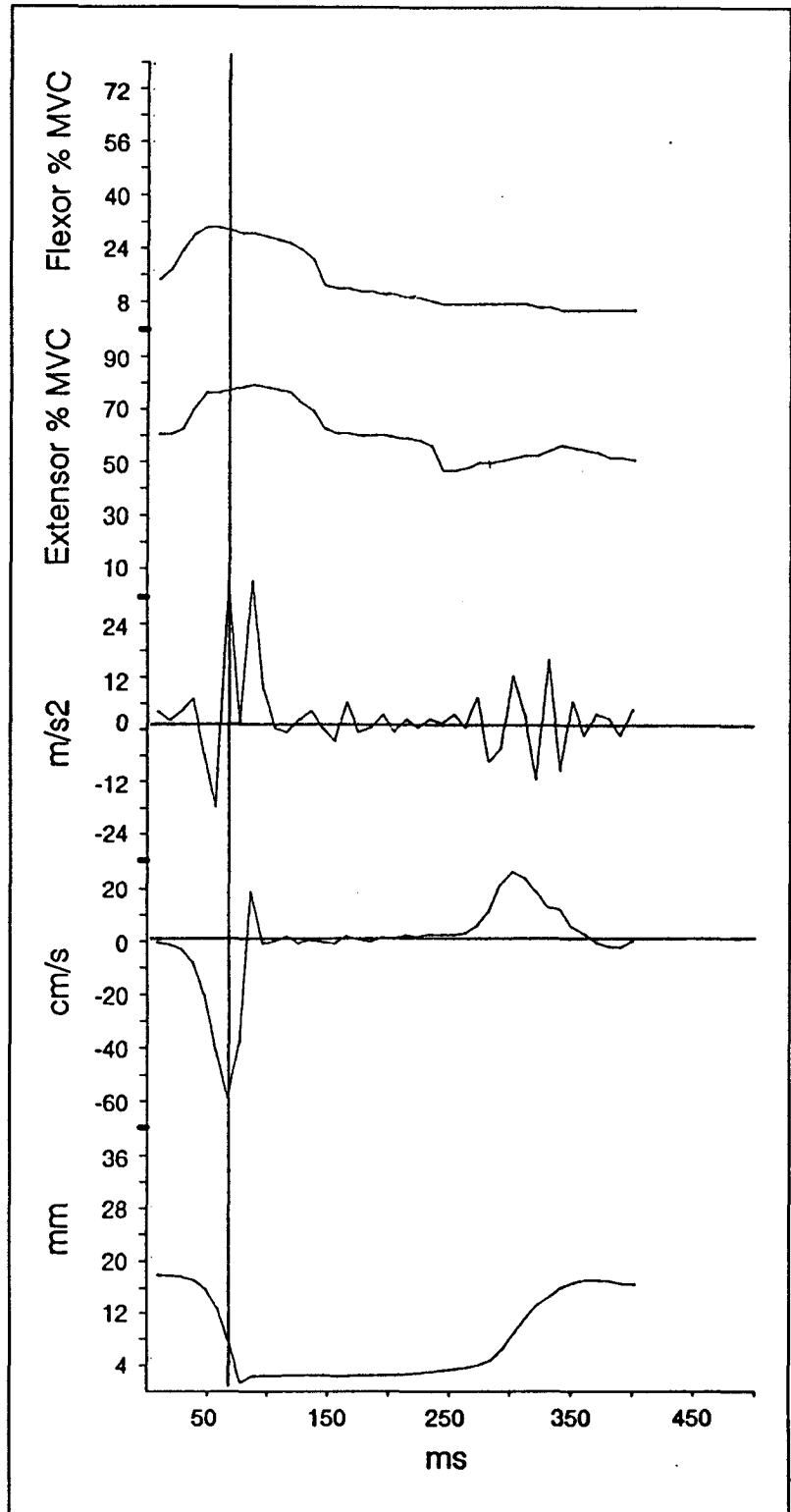
Wie schon oben erwähnt, zeigt die Korrelation nur einen schwachen Zusammenhang zwischen den Zwischen-Ziffer-Zeiten und den Anschlagfrequenzen beim Bedienen der Piezotastatur mit 20 ms bis 70 ms. Die durchschnittlichen Zwischen-Ziffer-Zeiten (Abb. 3.4.8) dieser Tastatur sind im Vergleich mit den anderen drei Piezotastaturen schiefer verteilt. Der Median liegt bei 290 ms, das untere Quartil bei 273 ms und das obere Quartil bei 392 ms. Das heisst, dass die meisten Benutzer der Piezotastatur mit 20 ms bis 70 ms kurze Zwischen-Ziffer-Zeiten aufweisen, aber für einige der Benutzer die Zwischen-Ziffer-Zeiten länger sind. Inwieweit dies auf die zufällig auftretenden kurzen Totzeiten zurückzuführen ist, geht aus den Resultaten nicht hervor. Die Tendenz einiger Probanden zu längeren Zwischen-Ziffer-Zeiten, die unabhängig von einer entsprechenden Anpassung der Anschlagdauer sind, könnte aber ein Hinweis darauf sein, dass die zufällig auftretenden Totzeiten diese Probanden verunsichern und dadurch die zeitliche Organisation der Eingaben beeinflusst wird. Die hohe negative Korrelation zwischen Leistung und Zwischen-Ziffer-Zeit, die gefunden wurde, stützt diese Ueberlegung ( $R = -.62, p < .05$ ). Das heisst, dass einige Probanden, die langsamer schreiben, auch weniger Leistung erbringen. Der Leistungsabfall könnte somit der Grund für die Verunsicherung sein, die dann eine Verlangsamung der Zwischen-Ziffer-Zeiten (organisatorische Ebene des Bewegungsablaufs) bewirkt. Diktirt durch die kurzen Totzeiten, bleibt die Anschlagzeit (motorische Ebene des Bewegungsablaufs) aber durchwegs kurz.

**Abb. 3.4.9:**  
Darstellung einer typischen  
Fingerbewegung in der Z-Achse,  
dessen Geschwindigkeit,  
Beschleunigung und Muskel-  
aktivität der Muskeln extensor  
und flexor digitorum bei der  
Bedienung der Piezotastatur mit  
konstanter Totzeit von 70 ms





**Abb. 3.4.10:**  
Darstellung einer typischen  
Fingerbewegung in der Z-Achse,  
dessen Geschwindigkeit,  
Beschleunigung und Muskel-  
aktivität der Muskeln extensor  
und flexor digitorum bei der  
Bedienung der Piezotastatur mit  
einer Bandbreite von Totzeiten  
zwischen 70 ms und 400 ms.



### 3.4.3.3.2 Muskelaktivität (EMG)

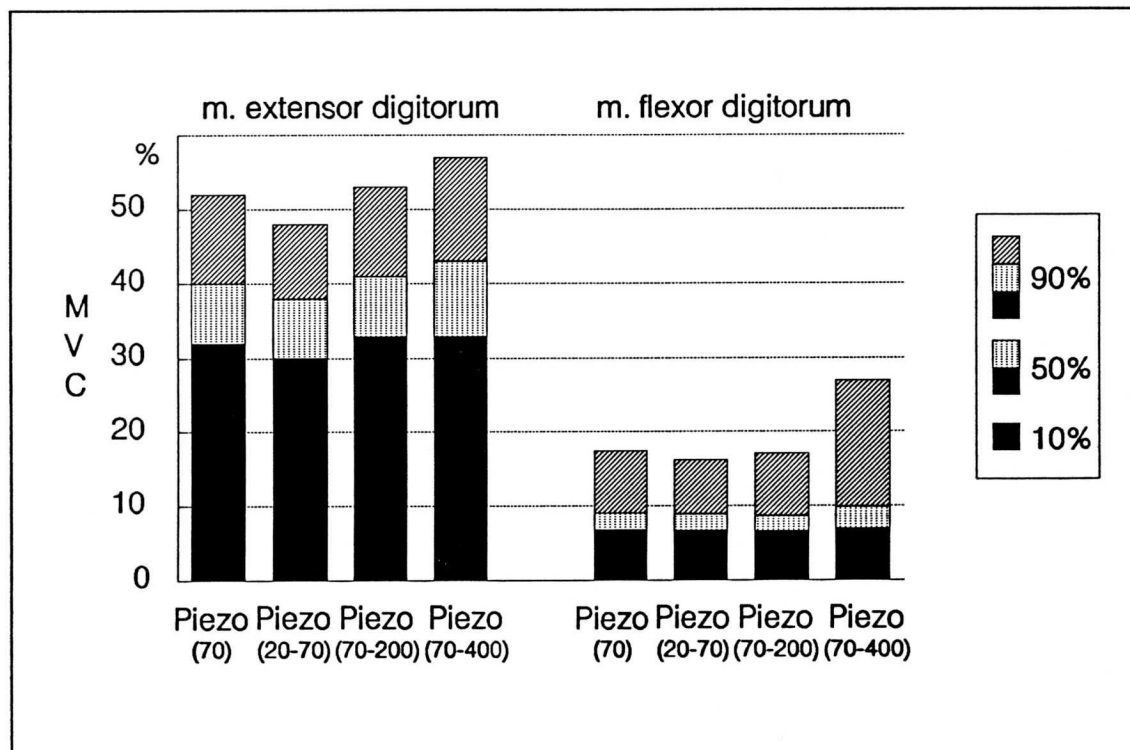
Im Gegensatz zu der Piezotastatur mit 70 ms, wo die beiden Muskeln flexor digitorum und extensor digitorum ein typisches antagonistisches Verhalten zur Steuerung der Fingerbewegung aufweisen (Abb. 3.4.9), zeigen die beiden Muskeln bei der Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms eine Kokontraktion (Abb. 3.4.10). Das heisst, dass beide Muskeln bei der Bewegung des Fingers auf die Taste zugleich kontrahieren. Eine Kreuzkorrelationsanalyse \* zwischen den beiden Muskeln flexor und extensor digitorum zeigt aber nur für 7 der 12 Probanden eine Tendenz zu Kokontraktionen beim Bedienen der Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms. Im Gegensatz dazu zeigen dieselben 7 Probanden beim Bedienen der anderen drei Tastaturen zeitliche Verschiebungen der kontrahierenden Muskeln, also keine Kokontraktionen. Eine der 12 Probanden zeigt Kokontraktionen beim Bedienen aller vier Tastaturen. Eine der 12 Probanden zeigt nur beim Bedienen der Piezotastatur mit 20 ms bis 70 ms Kokontraktionen, und beim Bedienen der anderen 3 Tastaturen kontrahieren die Muskeln zeitlich verschoben. Die restlichen 3 Probanden zeigen beim Bedienen aller 4 Tastaturen zeitliche Verschiebungen der kontrahierenden Muskeln. Aus diesen Resultaten geht hervor, dass die Piezotastatur mit langen Totzeiten (70 ms bis 400 ms) zwar bei mehr als der Hälfte der Probanden zu Kokontraktionen führt, aber auch ein antagonistisches Verhalten der beiden Muskeln flexor und extensor digitorum durchaus möglich ist.

Der Vergleich der Muskelaktivitäten der beiden Muskeln flexor und extensor digitorum beim Bedienen der vier verschiedenen Tastaturen ergibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Tastaturen (F-Test,  $p > .05$ ). Anhand der Abbildung 3.4.11 ist ersichtlich, dass die Aktivität des m. flexor im dynamischen Bereich (50. und 90. Perzentil) bei der Bedienung der Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms zu höheren Werten tendiert. Auch der m. extensor zeigt eine Tendenz zu höheren Werten. Die Muskelaktivität zwischen den verschiedenen Probanden streut trotz Eichung in MVC stark. Das heisst, dass der Vergleich mittels der Varianzanalyse sehr von dieser Streuung geprägt wird und signifikante Unterschiede nicht mehr aufgezeigt werden können. Teilt man die Muskelaktivitäten der einzelnen Probanden in Ränge ein (Rang 1 für die Tastatur mit der kleinsten Muskelaktivität, Rang 2 und 3 für die Tastaturen mit den mittleren Muskelaktivitäten und Rang 4 für die Tastatur mit der grössten Muskelaktivität), so ergibt die Varianzanalyse für den dynamischen Bereich beider Muskeln extensor und flexor ein hoch signifikantes Resultat

---

\* Kreuzkorrelationsanalyse: Ein Fenster von einer Sekunde der registrierten Muskelaktivitäten (m. flexor und m. extensor digitorum) wurde mittels einer Faltung kreuzkorreliert. Dieses Verfahren wurde für jede weitere Sekunde wiederholt, und bei 60 Wiederholungen wurden die Resultate der 60 Kreuzkorrelationen gemittelt.

(m. extensor und m. flexor 90%, F-Test,  $p < .01$ ). Im Einzelvergleich unterscheidet sich die Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms signifikant von den restlichen drei Tastaturen (m. extensor und m. flexor 90%, Scheffe,  $p < .05$ ). Bei 10 von 12 Probanden kann der höchste Rang (Rang 4) der Muskelaktivität des extensor und des flexor (90. Perzentil) der Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms zugeteilt werden.



**Abb. 3.4.11:** Dargestellt ist die Aktivität des m. extensor und des m. flexor digitorum. Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms  
Piezotastatur mit Totzeiten von 20 ms - 70 ms  
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 200 ms  
Piezotastatur mit Totzeiten von 70 ms - 400 ms

Bei der leistungsabhängigen Bewertung der Muskelaktivitäten (MVC / Leistung) ergibt die Varianzanalyse wiederum signifikante Unterschiede im dynamischen Bereich (m. extensor und m. flexor 90%, F-Test,  $p < .05$ ). Die leistungsbewertete Aktivität des m. flexor bei der Bedienung der Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms unterscheidet sich signifikant von den anderen drei Tastaturen (m. flexor 90%, Scheffe,  $p < .05$ ). Die Aktivität des m. extensor bei der Bedienung der Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms unterscheidet sich nur signifikant

von der Piezotastatur mit 70 ms (m. extensor 90%, Scheffe,  $p < .05$ ). Im 50. und im 10. Perzentil zeigen die Aktivitäten des m. extensor und des m. flexor auch bei einer Rängeinteilung oder einer leistungsabhängigen Beurteilung keine signifikanten Unterschiede.

Die Spearman-Rang-Korrelation zeigt für die beiden Piezotastaturen 20 ms bis 70 ms und 70 ms bis 200 ms einen hohen negativen Korrelationskoeffizienten zwischen der Aktivität des m. extensor und der Anschlagfrequenz (m. extensor 90 % (20 ms - 70 ms,  $R = -.64$ ,  $p < .05$ ; 70 ms - 200 ms,  $R = -.70$ ,  $p < .05$ ); m. extensor 10 % (20 ms - 70 ms,  $R = -.62$ ,  $p < .05$ ; 70 ms - 200 ms,  $R = -.73$ ,  $p < .05$ ). Das heisst, dass mit einer Abnahme der Anschlagfrequenz die Aktivität des m. extensor im dynamischen (90%) wie im statischen (10%) Bereich zunimmt. Ansonsten ergibt die Korrelationsanalyse keine nennenswerten Zusammenhänge.

### 3.4.4 Diskussion

In Experiment 2 wird gezeigt, dass die Piezotastatur mit Tastenrand und akustischem Signal im Vergleich mit der Wegtastatur (IBM) am besten abschneidet. Die Totzeit zwischen den Tasten wird auf konstant 70 ms gehalten, was sich für die Einfingerbedienung der Tastatur als optimal erweist. In Experiment 4 wird darum die gleiche Piezotastatur mit konstanten 70 ms Totzeit eingesetzt und zum Vergleich zu den Piezotastaturen mit variabler Totzeit herangezogen. Wie erwartet, zeigt die Piezotastatur mit 70 ms bis 200 ms keine nennenswerten Unterschiede zur Piezotastatur mit 70 ms. Die Probanden haben keine Mühe, sich mit den variablen Totzeiten und der entsprechenden variablen Rückkopplung (akustisch und visuell) zwischen 70 ms und 200 ms zurechtzufinden. Der Einfluss einer variablen Rückkopplung (akustisch und visuell) zwischen 70 ms und 200 ms ist demnach unbedeutend für die effiziente Bedienung einer numerischen Tastatur im Einfingerbetrieb. Aus den Resultaten der Fragebogenerhebung ist aber ersichtlich, dass die Probanden einen Unterschied zwischen den beiden Tastaturen 70 ms und 70 ms bis 200 ms bemerken. Die Information aus der Peripherie (akustische und visuelle Rückkopplung) beeinflusst also die Beurteilungsebene. Interessanterweise zeigt sich auch ein Zusammenhang zwischen erhöhter Aktivität des m. extensor und langsamerer Schreibweise einzelner Probanden, was bei der Piezotastatur mit konstanten 70 ms nicht festgestellt werden kann. Somit kann man annehmen, dass die Information aus der Peripherie auch die motorische Ebene beeinflusst hat. Das motorische System hat sich also bedingt durch die periphere Information eine spezifische Strategie für die Bedienung der Piezotastatur mit 70 ms bis 200 ms angeeignet, was sich in der etwas langsameren Schreibweise zeigt, aber da die Zielsetzung, Zahlen einzugeben, nicht wesentlich gestört wird, bleibt die Anpassung marginal.

Aehnlich verhält es sich auch mit der Bedienung der Piezotastatur mit 20 ms bis 70 ms. Ganz im Gegensatz zu der in Abschnitt 3.4.1 formulierten Hypothese, dass der Effekt eines Tastenprellens durch zu kurze Totzeiten den Bewegungsablauf messbar stören würde, zeigt die Bewegungsanalyse eine Anpassung der Anschlagbewegung an die kurzen Totzeiten. Die Probanden verkürzen ihre Anschlagdauer, was sich auch in der hohen durchschnittlichen Anschlagfrequenz von 4,25 Hz widerspiegelt (siehe Abb. 3.4.7). Auch die durchschnittliche Aktivität des m. flexor und m. extensor digitorum zeigt für die Piezotastatur mit 20 ms bis 70 ms tendenziell die tiefsten Werte, verglichen mit den anderen drei Piezotastaturen. Die Beurteilung der Piezotastatur mit 20 ms bis 70 ms und die von der sehr hohen Fehlerrate geprägten Leistung zeigen aber deutliche Abweichungen von den

Resultaten der Piezotastatur mit 70 ms. Die deutlichen Zusammenhänge zwischen Leistung und Beurteilung lassen vermuten, dass für die Beurteilung vor allem die Leistung herangezogen wird. Die Resultate weisen auch darauf hin, dass nur einige wenige der Probanden wirklich durch die kurzen Totzeiten beeinflusst werden und die anderen sich ohne weiteres den neuen Bedingungen anpassen. Bei einer Bandbreite mit noch kürzeren Totzeiten würde vermutlich dann der Anteil gestörter Benutzer noch zunehmen. Inwieweit der Bewegungsablauf dadurch verändert würde, ist offen. Die kurzen Anschlagzeiten und die tiefen Muskelaktivitäten, die bei der Bedienung der Piezotastatur mit 20 ms bis 70 ms gemessen werden, lassen vermuten, dass durch dieses Verhalten die Kraft, um die Taste auszulösen, klein ist. Somit wäre nicht nur die Totzeit ein massgeblicher Faktor, der die Anpassungsfähigkeit des motorischen Systems begrenzt, sondern auch die Stellkraft. Bleibt die Stellkraft tief, kann sich das motorische System auch mit sehr kurzen Totzeiten noch zurechtfinden. Steigt die Stellkraft an, sinkt die Fähigkeit des motorischen Systems, sich an kurze Totzeiten anpassen zu können.

Die resultierende Leistung und Akzeptanz bei der Bedienung der Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms liegt signifikant tiefer als für die anderen drei Tastaturen. Das heisst, dass die bis zu 400 ms langen, zufällig auftretenden Totzeiten die Probanden stark gestört haben. Ganz im Gegensatz zu den anderen drei Piezotastaturen zeigt die Bewegungsanalyse bei der Bedienung der Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms Veränderungen der Bewegungsausführung. Die Anschlagfrequenz und die Zwischen-Ziffer-Zeiten liegen signifikant tiefer als bei den anderen drei Piezotastaturen. Auch die Muskelaktivität vor allem des m. flexor wird signifikant mehr beansprucht (leistungsabhängige Bewertung) als bei den anderen drei Piezotastaturen. Somit haben die variablen Totzeiten nicht nur die Beurteilungsebene stark beeinflusst, sondern auch das motorische System zu grossen Änderungen im Bewegungsablauf gezwungen. Die tiefen Werte in Leistung und Akzeptanz sowie die grossen Abweichungen des Bewegungsablaufs, verglichen mit der Piezotastatur mit konstanten 70 ms, sind auf Unsicherheiten bei der Bedienung der Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms zurückzuführen. Die durchschnittlichen Anschlagzeiten von 250 ms bis 300 ms, die bei der Bedienung der Piezotastatur mit 70 ms gemessen werden, können bei Totzeiten über 250 ms nicht mehr realisiert werden. Fehler sind somit vorprogrammiert. Interessanterweise passt sich das motorische System diesen Gegebenheiten an. Die Anschlagfrequenz wird reduziert, und die Zwischen-Ziffer-Zeiten werden verlängert. Die stark erhöhte Muskelaktivität sowie die häufiger auftretenden Kokontraktionen der Antagonisten (m. flexor und m. extensor) lassen aber vermuten, dass die Zwischen-Ziffer-Zeiten und die Anschlagfrequenz nicht bewusst über eine neue motorische Strategie an die längeren

Totzeiten angepasst werden, sondern als Konsequenz der erhöhten Muskelkraft betrachtet werden können. Bedingt durch die Unsicherheit beim Bedienen der Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms, reagieren die Probanden, indem sie die Taste harter anschlagen, was auch automatisch längere Anschlagzeiten ergibt. Aus Turveys, Fitchs und Tullers<sup>3</sup> Ausführungen, "die Bernstein-Perspektive"<sup>4</sup>, geht hervor, dass Unklarheiten in der Durchführung einer motorischen Handlung mit einer Einschränkung der zu steuernden Freiheitsgrade einhergeht. Newell<sup>5</sup> zeigte in einer Arbeit, dass die einzelnen Gelenke des Hand/Arm-Systems (Hand-, Ellenbogen und Schultergelenk) beim Schreiben der Unterschrift mit der dominanten (rechten) Hand in Bewegungsrichtung nicht korrelieren. Bei derselben Handlung, aber nun mit der nicht dominanten (linken) Hand geschrieben, korrelieren die Bewegungsrichtungen der einzelnen Gelenke des Hand/Arm-Systems stark. Aus Gründen der limitierten Verarbeitungskapazität des motorischen Systems werden beim Unterschreiben mit der nicht dominanten Hand (ungeschickliche Handlung) die Freiheitsgrade eingeschränkt. Die häufiger auftretenden Kokontraktionen könnten, bedingt durch die Unsicherheit beim Bedienen der Piezotastatur mit 70 ms bis 400 ms, das Resultat einer Einschränkung der zu steuernden Freiheitsgrade im Hand/Arm-System sein.

Von den vier getesteten Piezotastaturen zeigt also nur die Piezotastatur mit den längsten Totzeiten eine signifikante Verschlechterung der Leistung und der Akzeptanz sowie klar messbare Veränderungen im Bewegungsablauf. Die Reaktionen auf zufällig auftretende Totzeiten zwischen 20 ms und 200 ms beim Bedienen einer Piezotastatur mit konstanter Stellkraft von 0.5 Newton sind demnach unbedeutend. Bei zufällig auftretenden Totzeiten über 200 ms treten Probleme auf. Die Annahme, dass mit zufällig auftretenden langen Totzeiten eine negative Reaktion provoziert werden kann, hat sich somit bestätigt.

---

<sup>3</sup> Turvey, M.T., Fitch, H.L., Tuller, B., The Bernstein Perspective: The Problem of Degrees of Freedom and Context-Conditioned Variability: Aus Kelso, J.A.S., Human Motor Behaviour, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 239-252 (1982)

<sup>4</sup> Bernstein, N., (1896-1966), Seine Werke sind zusammengefasst und übersetzt in die englische Sprache in: The Coordination and Regulation of Movement, Oxford: Pergamon Press (1967)

<sup>5</sup> Newell, K.M., Van Emmerik, R.E.A., The Aquisition of Coordination: Preliminary Analysis of Learning to Write, Human Movement Science, 8, 17-32 (1989)

### **3.5 Experiment 4: Untersuchung der Muskelaktivität bei verschiedenen "Tapping"-Frequenzen**

#### **3.5.1 Einleitung**

Im folgenden Experiment wurden 10 vorgegebene Frequenzen, die die Probanden mit dem Finger schlagen mussten (Tapping), mittels Fragebogen und Bewegungsanalyse gegeneinander verglichen. Die Resultate der Experimente 1, 2 und 3 zeigen deutlich, dass bei der Bedienung einer numerischen Tastatur mit einem Finger Anschlagfrequenzen zwischen 3 und 4 Hertz bevorzugt werden. Nehmen wir an, das Finger-Hand-Arm-System wäre mit einem Feder-Masse-System vergleichbar, wobei die Muskeln als Federn wirken. Dann hätte das Finger-Hand-Arm-System auch eine Eigenfrequenz. Bei der Durchführung einer Bewegung (z.B. das Anschlagen von Tasten mit dem Finger) wird nun durch Muskelkontraktion das System in eine Schwingung versetzt (erzwungene Frequenz). Je näher die erzwungene Frequenz an die Eigenfrequenz des Systems herankommt, desto grösser wird die Amplitude der erzwungenen Schwingung. Dies wird als Resonanz zwischen der Störkraft (Muskelkontraktion) und der Eigenfrequenz des Systems bezeichnet. Wenn die erzwungene Frequenz nahe bei der Eigenfrequenz eines Systems liegt, kann mit wenig Kraft eine grosse Bewegungsamplitude erreicht werden. Bewegungsabläufe, die sich an der Eigenfrequenz des Systems orientieren, verbrauchen deshalb am wenigsten Energie. Wenn das System so gedämpft ist, dass keine Veränderung der Freiheitsgrade eintritt, wird bei gleicher Amplitude somit auch die interne Belastung des Systems z.B. der Gelenke und der Sehnen minimiert. Der Energieumsatz könnte also eine wichtige Rolle im Optimierungsprozess eines Bewegungsablaufs spielen. Hoyt und Taylor<sup>1</sup> zeigten, dass bei den am häufigsten auftretenden Fortbewegungsgeschwindigkeiten beim Gehen, Trotten und Galoppieren von Pferden auch am wenigsten Energie (gemessen in  $O_2$ -Verbrauch) verbraucht wurde. Inwieweit die Resonanzstelle des bewegenden Körpers die bevorzugten Fortbewegungsgeschwindigkeiten bestimmt, wurde nicht untersucht. Der Energieverbrauch war für jede Gangart (Gehen, Trotten und Galoppieren) trotz der unterschiedlichen Fortbewegungsgeschwindigkeiten etwa gleich hoch. Melvill-Jones und Watt<sup>2</sup> sowie Kugler und Turvey<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hoyt, D.F., Taylor, C.R., Gait and the Energetics of Locomotion in Horses, *Nature*, 292, 239-240 (1981)

<sup>2</sup> Melvill-Jones, G., Watt, D.G.D., Observations on the Control of Stepping and Hopping Movements in man, *Journal of Physiology*, 219, 353-359 (1971)

<sup>3</sup> Kugler, P.N., Turvey, M.T., *Information, Natural Law, and the Self-assembly of Rhythmic Movement*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey (1987)



zeigten in ihren Studien, dass der Mensch beim Hüpfen wie bei Bewegungen im Hand-Arm-Bereich bestimmte Bewegungsfrequenzen bevorzugt. Wie die Bewegungsanalyse der Experimente 1, 2 und 3 zeigt, ist eine Abweichung von der bevorzugten Anschlagfrequenz durchaus möglich und auch üblich. Dies ist aber nach Hoyt und Taylor mit einem Mehraufwand an Energie verbunden. Im folgenden Experiment soll nun untersucht werden, ob bestimmte Frequenzen, die mit dem Finger geschlagen werden, bevorzugt werden und ob Abweichungen von der bevorzugten Schlagfrequenz die Muskeln mehr beanspruchen.

### **3.5.2 Probanden**

In diesem Versuch wurden 11 Probanden untersucht. Die Probanden waren alle Studenten und Mitarbeiter der ETH-Zürich. Das Kollektiv setzte sich aus 3 Frauen und 8 Männern zusammen, alle im Alter zwischen 20 und 30 Jahren.

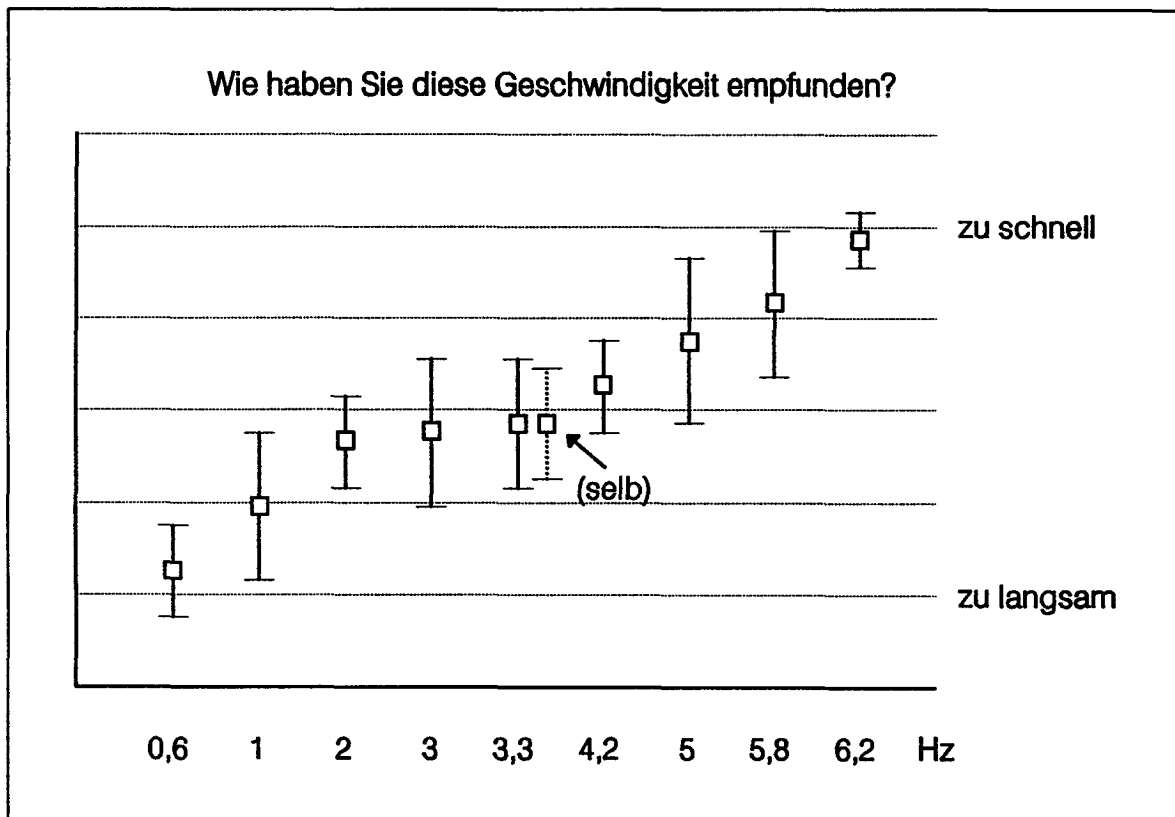
### **3.5.3. Testablauf**

Die Probanden mussten mit dem Zeigefinger während 1 Minute einen von einem Metronom vorgegebenen isochronen Rhythmus auf einem Tisch schlagen. Dies wurde für 10 vom Metronom vorgegebene Frequenzen wiederholt (0,6 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 3,3 Hz, 4,2 Hz, 5 Hz, 5,8 Hz, 6,2 Hz, 6,7 Hz). Zusätzlich mussten die Probanden ohne Vorgabe des Metronoms ihren bevorzugten Rhythmus mit dem Zeigefinger schlagen. Die Sequenz der Tests (einzelne Frequenzen) wurde nach der Methode des Lateinquadrates verteilt, so dass jeder Proband eine andere Sequenz schlagen musste. Nach jedem Test mussten die Probanden zwei Fragen auf einer 5-Punkte-Skala beantworten. (Frage 1: Wie haben Sie diese Geschwindigkeit empfunden? zu langsam - zu schnell; Frage 2: Mussten Sie sich konzentrieren? gar nicht - sehr viel.) Während des Schlagens wurden die Fingerbewegung sowie die Aktivitäten der Muskeln flexor und extensor digitorum gemessen. Für eine genaue Beschreibung der Bewegungsmessung siehe Abschnitt 3.1.3. Zusätzlich wurde mit einem Videosystem der Testablauf festgehalten.

### 3.5.4 Resultate

#### 3.5.4.1 Beurteilung der Rhythmen

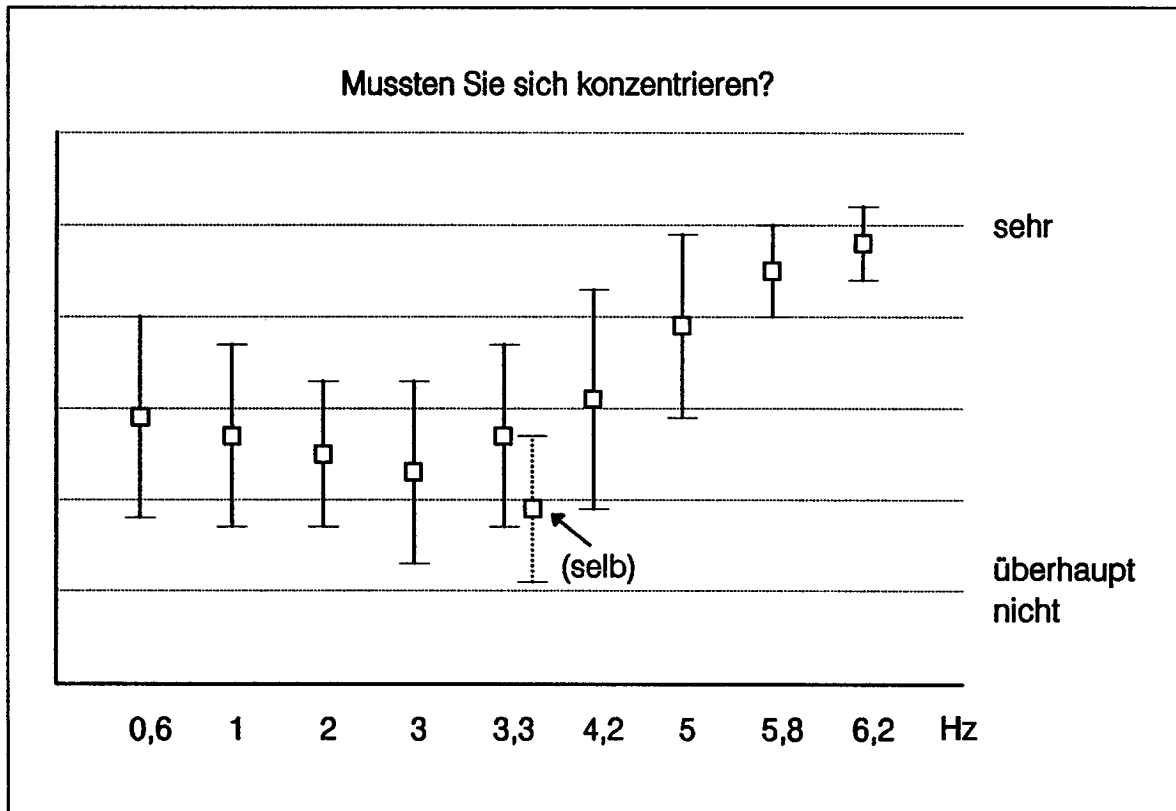
Die Antworten auf die Frage "Wie haben Sie diese Geschwindigkeit empfunden?" unterscheiden sich hoch signifikant (F-Test,  $p < .01$ ) (die Schlagfrequenz von 6,7 Hz war für alle Probanden zu schnell und wurde darum nicht ausgewertet).



**Abb.3.5.1:** Darstellung der Mittelwerte und der Standardabweichungen der Antworten auf die Frage "Wie haben Sie diese Geschwindigkeit empfunden?"  
Dargestellt sind die selbst ausgewählte Schlagfrequenz (selb) und die Schlagfrequenzen zwischen 0,6 Hz und 6,2 Hz. Der Durchschnitt der selbst ausgewählten Schlagfrequenzen liegt bei 3,5 Hz mit einer Verteilung zwischen 2,2 Hz und 5,6 Hz.

Der paarweise Vergleich ergibt signifikante Unterschiede zwischen den langsamen Schlagfrequenzen und den schnellen Schlagfrequenzen (Scheffe,  $p < .05$ ). Die langsamen Schlagfrequenzen (0,6 Hz und 1 Hz) werden als zu langsam und die schnellen (5 Hz, 5,8 Hz und 6,2 Hz) als zu schnell beurteilt. Wie aus Abbildung 3.5.1 ersichtlich ist, liegt eine Gruppe

von Schlagfrequenzen (2 Hz - 4,2 Hz) in der Mitte der beiden Beurteilungspole zu langsam und zu schnell. Diese Gruppe unterscheidet sich aber nur von den äussersten Schlagfrequenzen (0,6 Hz und 6,2 Hz) signifikant (Scheffe,  $p < .05$ ). Die Schlagfrequenzen zwischen 2 Hz und 4,2 Hz wurden somit bevorzugt.



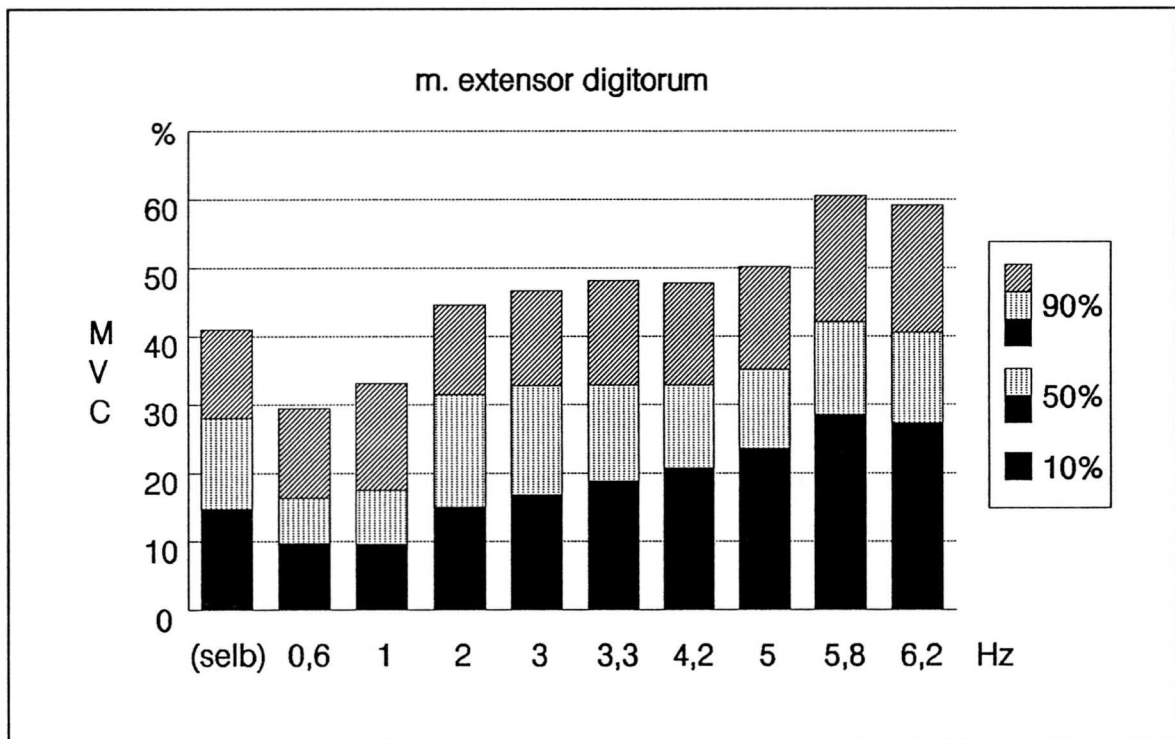
**Abb.3.5.2:** Darstellung der Mittelwerte und der Standardabweichungen der Antworten auf die Frage "Mussten Sie sich konzentrieren?"  
Dargestellt sind die selbst ausgewählte Schlagfrequenz (selb) und die Schlagfrequenzen zwischen 0,6 Hz und 6,2 Hz. Der Durchschnitt der selbst ausgewählten Schlagfrequenzen liegt bei 3,5 Hz mit einer Verteilung zwischen 2,2 Hz und 5,6 Hz.

Die Antworten auf die Frage "Mussten Sie sich konzentrieren?" unterscheiden sich wie bei der ersten Frage hoch signifikant (F-Test,  $p < .01$ ). Im paarweisen Vergleich unterscheiden sich zwei Gruppen signifikant, eine mit tiefen bis mittleren Schlagfrequenzen (0,6 Hz - 3,3 Hz) und eine mit hohen Schlagfrequenzen (5,8 Hz - 6,2 Hz) (Scheffe,  $p < .05$ ). Das heisst, dass sich die Probanden bei den tiefen bis mittleren Schlagfrequenzen weniger konzentrieren müssen als bei den hohen Schlagfrequenzen. Aus der Abbildung 3.5.2 ist

ersichtlich, dass eine Tendenz zu einer U-Form der Verteilung der Mittelwerte besteht. Der Wert, wo sich die Probanden am wenigsten konzentrieren müssen, liegt bei 3 Hz.

### 3.5.4.2 Muskelaktivität (EMG)

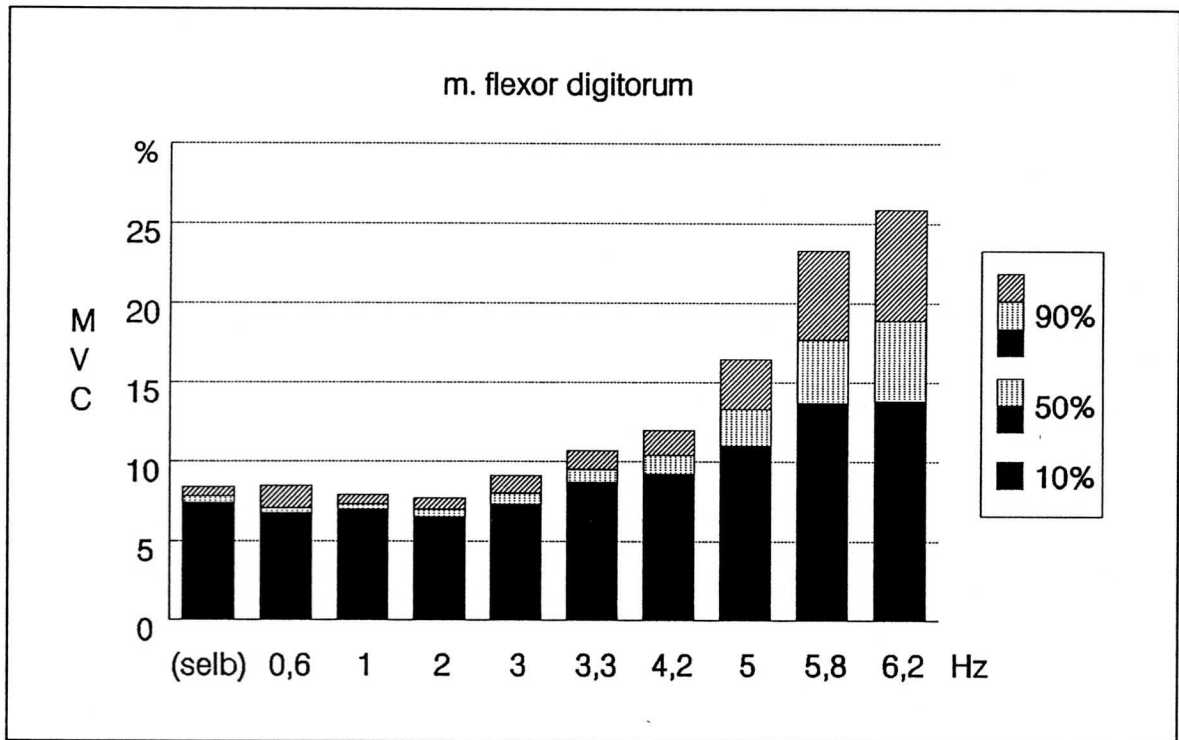
Die Varianzanalyse ergibt für die Aktivität des m. extensor digitorum im dynamischen (90% und 50%) sowie im statischen (10%) Bereich signifikante Resultate (F-Test,  $p < .05$ ). Der paarweise Vergleich zeigt nur für das 50. Perzentil und das 10. Perzentil signifikante Unterschiede, wobei sich jeweils die Muskelaktivität der tiefsten (0,6 Hz und 1 Hz) und der höchsten (5,8 Hz und 6,2 Hz) Schlagfrequenzen unterscheiden (Scheffe,  $p < .05$ ).



**Abb.3.5.3:** Dargestellt ist die Aktivität des m. extensor digitorum beim Schlagen mit dem Finger von 9 verschiedenen vorgegebenen Frequenzen zwischen 0,6 Hz und 6,2 Hz und selbst ausgewählter Frequenzen (selb). Der Durchschnitt der selbst ausgewählten Schlagfrequenzen liegt bei 3,5 Hz mit einer Verteilung zwischen 2,2 Hz und 5,6 Hz.

Wie aus der Abbildung 3.5.3 ersichtlich ist, steigt die statische Beanspruchung des m. extensor mit einer Erhöhung der Schlagfrequenz kontinuierlich an. Im dynamischen

Bereich bildete sich aber eine mittlere Gruppe von Schlagfrequenzen (2 Hz - 5 Hz) mit gleicher Aktivität des m. extensor.



**Abb.3.5.4:** Dargestellt ist die Aktivität des m. flexor digitorum beim Schlagen mit dem Finger von 9 verschiedenen vorgegebenen Frequenzen zwischen 0,6 Hz und 6,2 Hz und selbst ausgewählter Frequenzen (selb). Der Durchschnitt der selbst ausgewählten Schlagfrequenzen liegt bei 3,5 Hz mit einer Verteilung zwischen 2,2 Hz und 5,6 Hz.

Die Varianzanalyse ergibt nur im dynamischen Bereich der Aktivität des m. flexor signifikante Werte (F-Test,  $p < .05$ ). Beim paarweisen Vergleich zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Schlagfrequenzen (Scheffe,  $p > .05$ ). Da der Scheffe-Test relativ konservativ mit der Schätzung von signifikanten Werten umgeht und der F-Test im dynamischen Bereich signifikante Werte errechnet hat, kann man annehmen, dass wenigstens zwischen der kleinsten und der grössten durchschnittlichen Muskelaktivität ein klarer Unterschied besteht. Aus der Abbildung 3.5.4 ist ersichtlich, dass bei den tiefen bis mittleren Schlagfrequenzen (0,6 Hz - 4,2 Hz) der dynamische Anteil der Aktivität des m. flexor sehr klein war. Im Bereich der hohen Schlagfrequenzen ( $> 5$  Hz) steigt der dynamische Anteil dann aber plötzlich steil an. Der m. flexor tritt also bis zu einer Schlagfrequenz von 4,2 Hz kaum in Aktion, nimmt dann aber im Bereich über 5 Hz

Schlagfrequenz aktiv an der Steuerung der Fingerbewegung teil. Beim Durchsehen der aufgezeichneten m.-flexor-Aktivitäten zeigt sich, dass nur bei einer der 11 Probanden der m. flexor bei jeder der 9 Schlagfrequenzen aktiv ist. Bei den anderen 10 Probanden wird der m. flexor erst bei einer Schlagfrequenz über 4,2 Hz aktiv. Bis zu einer Schlagfrequenz von 4,2 Hz wird also der m. extensor für die Steuerung des Fingers herangezogen, was als Extension (Finger gegen den Handrücken ziehen) bezeichnet werden kann. Die Flexion ist somit eine passive Handlung, welche vermutlich durch die während der Extension gespeicherte elastische Energie im gestreckten Flexor zustande kommt. Aus mechanischen Gründen muss der m. flexor bei den höheren Schlagfrequenzen aktiv am Bewegungsablauf teilnehmen. Vermutlich reicht die Muskelelastizität nicht aus, um den Finger genügend zu beschleunigen, damit die kurzen Schlagbewegungen (<200 ms) eingehalten werden können.

Die Spearman-Rang-Korrelation ergibt zwischen den Muskelaktivitäten und der Beurteilung der einzelnen Schlagfrequenzen keine Zusammenhänge. Beim Vergleich der Muskelaktivitäten und der Beurteilung der Schlagfrequenzen jeder einzelnen Person zeigen 8 Probanden hohe Korrelationskoeffizienten zwischen der Aktivität des m. flexor digitorum (90., 50. und 10. Perzentil) und des Beurteilungskriteriums, wie schnell die Schlagfrequenz empfunden wird ( $.71 < R < .95$ ,  $p < .05$ ). Zwischen dem m. extensor und der Beurteilung der Geschwindigkeit der Schlagfrequenz finden sich nur bei 4 Probanden signifikante Zusammenhänge. Diese Resultate weisen darauf hin, dass die Probanden verschiedene Kriterien zur Beurteilung einer Schlagfrequenz herangezogen haben. Die hohe Korrelation zwischen der Aktivität des m. flexor und der Beurteilung der Schlaggeschwindigkeit lässt aber vermuten, dass die Aktivität des m. flexor massgeblich die Beurteilung der Schlaggeschwindigkeit beeinflusst.

#### **3.5.4.3 Selbst ausgewählte Schlagfrequenz**

Der Durchschnitt der selbst ausgewählten Schlagfrequenzen liegt bei 3,5 Hz. Sie verteilen sich zwischen 2,2 Hz und 5,6 Hz, wobei nur 2 Probanden mit mehr als 5 Hz schlagen und sich die anderen 8 Probanden auf einem Bereich von 2,2 Hz und 4 Hz beschränken. (Die selbst ausgewählte Schlagfrequenz wird nur bei 10 Probanden ausgewertet.) 7 der 10 Probanden beurteilen ihre selbst ausgewählte Schlagfrequenz als nicht zu schnell und nicht zu langsam. Die restlichen 3 Probanden entschieden sich, dass ihre selbst ausgewählte Schlagfrequenz etwas zu langsam sei. 7 der 10 Probanden beurteilen die gleiche vorgegebene Schlagfrequenz gleich wie die selbst ausgewählte Schlagfrequenz. 2 der restlichen 3 Pro-

banden beurteilen dieselbe Schlagfrequenz wie die selbst ausgewählte als zu schnell, und bei einem Probanden ist die Zuordnung nicht klar. 2 der Probanden schlagen also mit einer selbst ausgewählten Frequenz (5,6 Hz bzw. 3,7 Hz), die sie nach der Beurteilung der vorgegebenen Schlagfrequenzen nicht als optimal bezeichnen. Die Frequenz, die man ohne Vorgabe schlägt, also bevorzugt, ist nicht immer die, die man bei einem Vergleich mit anderen Schlagfrequenzen als optimal bezeichnen würde. Persönlichkeitsstruktur sowie Zielsetzung der Person bestimmen vermutlich die Frequenz, die sie ohne Vorgabe schlägt.

### 3.5.5 Diskussion

Wie die Analyse der Muskelaktivitäten ergibt, ist vor allem der m. extensor digitorum bei tieferen Schlagfrequenzen als 4,2 Hz aktiv. Der Bewegungsablauf des Fingers kann also als eine Extension beschrieben werden, ohne dass der Antagonist in den Bewegungsablauf einbezogen wird. Die Untersuchungen von Meinck<sup>4</sup> et al. zeigen ein ähnliches Verhalten bei diskreten Bewegungen des Zeigefingers. Wenn der Zeigefinger von seiner Ruheposition 30° (gemessen im Fingergrundgelenk) nach oben (Extension) oder nach unten (Flexion) bewegt wird, bleibt der Antagonist inaktiv. Bei einer Bewegungsdistanz von 60°, was eine höhere Bewegungsgeschwindigkeit des Fingers ergibt, oder mit einem zusätzlichen Gewicht auf dem Finger (50 g) wird der Antagonist aktiv. Wenn die Kraft des Agonisten, um eine Bewegung durchzuführen, nicht größer als die im Antagonisten entwickelte passive elastische Spannung ist, wird der Antagonist nicht aktiv. In diesem Fall wird der sich bewegende Finger durch die im Antagonisten entwickelte elastische Spannung passiv abgebremst (Lestienne<sup>5</sup>, Meinck et al.<sup>4</sup>). Beim kontinuierlichen Schlagen mit dem Zeigefinger machen somit die meisten Probanden Gebrauch von der durch die Extension entwickelten Spannung im Antagonisten, um den Finger wieder in die Ausgangsposition zu bringen. Um eine Bewegung durchzuführen, orientiert sich das motorische System an den mechanischen Eigenschaften des Finger-Hand-Arm-Systems. Anhand dieser Orientierung kann das motorische System Bewegungen mit kleinstmöglichem Kraftaufwand durchführen. Bei welcher Schlagfrequenz die mechanischen Eigenschaften am optimalsten sind, geht aus der Bewegungsanalyse nicht klar hervor. Nach der Beurteilung der Schlagfrequenzen sollte aber diese Frequenz irgendwo zwischen 2 und 4,2 Hz liegen. Bei Schlagfrequenzen über 4,2 Hz wird der m. flexor zusätzlich zum m. extensor aktiv in den Bewegungsablauf eingebunden. Bei diesen hohen Schlagfrequenzen reicht vermutlich die durch die Extension erzeugte elastische Spannung nicht mehr aus, um den Finger bei der Flexion genügend zu beschleunigen. Somit wird das motorische System gezwungen, den Flexor zusätzlich in den Bewegungsablauf einzubinden. Eine Durchführung dieser hohen Schlagfrequenz wäre sonst nicht möglich. Schlagfrequenzen über 4,2 Hz werden auch als zu schnell eingestuft. Diese Resultate stützen die Hypothese, dass hohe Schlagfrequenzen (>4,2 Hz) das Finger-Hand-Arm-System mehr beanspruchen und auch die Beurteilung

---

<sup>4</sup> Meink, H. M., Benecke, R., Meyer, W., Hohne, J., Conrad, B., Human Ballistic Finger Flexion: Uncoupling of Three-Burst Pattern, *Experimental Brain Research*, 55, 127-133 (1984)

<sup>5</sup> Lestienne, F., Effects of Inertial Load and Velocity on the Braking Process of voluntary Limb movements, *Experimental Brain Research*, 35, 407-418 (1979)



negativ beeinflussen. Inwieweit diese beiden Aussagen miteinander verknüpft sind, bleibt unklar. Die hohe Korrelation zwischen der Aktivität des m. flexor digitorum und der Beurteilung der Schnelle der Schlagfrequenzen lässt aber vermuten, dass die Muskelaktivität und konsequenterweise die mechanischen Eigenschaften des Finger-Hand-Arm-Systems sowie die Beurteilung der Schlagfrequenz eng miteinander verknüpft sind. Kleinere Schlagfrequenzen als 1 Hz werden als zu langsam beurteilt, obwohl die Aktivität des m. flexor digitorum nicht ansteigt. Das heisst, dass für die Beurteilung der Schlagfrequenz auch andere Kriterien als nur die Muskelaktivität herangezogen werden. Die selbst ausgewählte Schlagfrequenz wird auch deutlich von anderen, nicht auf die Mechanik des Finger-Hand-Arm-Systems abgestimmten Kriterien geprägt. Einige der Probanden wählen Schlagfrequenzen über 4,2 Hz, obwohl sie diese bei vorgegebener Schlagfrequenz negativ beurteilen und dabei auch ihre Muskulatur mehr beanspruchen. Selbst ausgewählte Kriterien entscheiden also über die Schlagfrequenz, wobei auch eine hohe Beanspruchung der Muskulatur in Kauf genommen wird.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Schlagfrequenzen zwischen 2 und 4,2 Hz bevorzugt werden und auch am wenigsten beanspruchen. Je nach persönlichem Ermessen wird aber eine Frequenz geschlagen, die nicht unbedingt im Bereich zwischen 2 und 4,2 Hz liegt.

## **4. Schlussdiskussion**

#### **4.1 Diskrete oder kontinuierliche Handlung als Untersuchungsmethode zur Beurteilung einer Tastatur**

Bei der ergonomischen Beurteilung einer Tastatur spielen Rückkopplungen nach wie vor eine wichtige Rolle. Verschiedene Normen<sup>1 2</sup> schreiben bei ergonomisch guten Tasten einen Weg und einen spürbaren Druckpunkt vor. Eine Reihe von Untersuchungen zeigt aber, dass eine Person die Eingabesequenz auf einer Tastatur plant (Long<sup>3</sup>, Rabbit<sup>4</sup>, Gentner<sup>5</sup>). Auch die vorliegende Arbeit zeigt, dass Eingabesequenzen auf einer Tastatur über Motor-Programme ablaufen, also geplant werden. Solange das Motor-Programm sich ungehindert entfalten kann, sind zusätzliche taktile Rückkopplungen (Tastenweg, Druckpunkt) unwichtig. Ganz im Gegensatz zu diesem "Open-Loop-Verhalten" wird der Mensch in den ergonomischen Wissenschaften oft als "Closed-Loop-System" betrachtet. Dementsprechend werden auch die Untersuchungen gestaltet. Diskrete Ereignisse sind in einer Untersuchung besser fassbar als kontinuierliche, sich überlappende Ereignisse. In einem "Closed-Loop-Verhalten" sind diskrete Ereignisse aussagekräftig. Deshalb werden auch oft Reaktionszeiten als Mass zur Beurteilung von Bewegungsabläufen eingesetzt (Rosenbaum<sup>6</sup>). Sternberg et al.<sup>7</sup> zeigten in ihrer Untersuchung, dass eine Buchstabensequenz in einem Motor-Programm-Speicher abgelegt wird. Ueber spezifische Unterprogramme für jeden Buchstaben werden die Bewegungsabläufe zur Eingabe jedes Buchstabens gesteuert. Den Probanden wird eine Buchstabenkombination vorgegeben, die sie dann in einer einzigen Sequenz eingeben müssen. Die Reaktionszeit von der Aufforderung, eine bestimmte Buchstabensequenz einzutippen, bis zur Ausführung entspricht der mittleren Suchzeit, die gebraucht wird, um die Unterprogramme für die Sequenz zusammenzustellen. Somit ist die Reaktionszeit abhängig von der Länge der einzugebenden

---

<sup>1</sup> DIN 33401, Stellteile (Juli 1977)

<sup>2</sup> ISO/DIS 9241-4 (Draft Standard), Ergonomic Requirements for Office Work with Visual Display Terminals (VDTs), Part4: Keyboard Requirements (1992)

<sup>3</sup> Long, J., Effects of Delayed Irregular Feedback on Unskilled and Skilled Keying Performance, *Ergonomics*, 19 (2), 183-202 (1976)

<sup>4</sup> Rabbitt, P., Detection of Errors by Skilled Typists, *Ergonomics*, 21 (11), 945-958 (1978)

<sup>5</sup> Gentner, D.R., The Acquisition of Typewriting Skill, *Acta Psychologica*, 54, 233-248 (1983)

<sup>6</sup> Rosenbaum, D.A., *Human Motor Control*, Academic Press, Inc., 253-295 (1991)

<sup>7</sup> Sternberg, S., Monsell, S., Knoll, R., Wright, C., The Latency and Duration of Rapid Movement Sequences: Comparison of Speech and Typewriting: In Stelmach G.E., *Information Processing in Information Control and Learning*, Academic Press, New York, 117-152 (1978)

Buchstabensequenz. Die Methode, die Sternberg et al. einsetzen, untersucht eine diskrete Handlung. Entsprechend müssen auch ihre Resultate interpretiert werden. Bei kontinuierlicher Eingabe von Text (Salthouse<sup>8</sup>) oder von Zahlenkombinationen, wie es in der vorliegenden Arbeit untersucht wird, korreliert die Vorbereitungszeit für eine Sequenz (Reaktionszeit) nicht mit der Länge der Sequenz. In einer kontinuierlichen Handlung benutzen die Probanden offensichtlich andere Strategien als in einer diskreten Handlung. Für die Beurteilung von Tastaturen ist es darum fragwürdig, ob Untersuchungen, die sich an diskreten Handlungen orientieren, auch aussagekräftig sind. Um der Wirklichkeit zu entsprechen, müssen für die Beurteilung von Tastaturen Untersuchungsmethoden mit kontinuierlicher Handlung eingesetzt werden. Rückkopplungen werden somit als Bestandteil eines Ganzen untersucht und nicht als bestimmender Faktor. Unter diesen Untersuchungsbedingungen haben auch "weglose" Flachtastaturen eine reelle Chance, ergonomische Kriterien zu erfüllen.

#### 4.2 Das Optimum der Bewegung und die Leistungsspitze

Zur Beurteilung einer Tastatur werden mehrheitlich Leistungstests eingesetzt (ISO<sup>9</sup>). Zusätzlich wird mittels eines Fragebogens auch die Akzeptanz erfasst. Bedingt durch die Aufgabestellung, viel Leistung zu erbringen, widerspiegelt die Akzeptanz nichts anderes als die Beurteilung der Tastatur unter maximalem Leistungsdruck. Die Kosten/Nutzen-Rechnung einer Tastatur ist aber nicht unbedingt mit Leistung gleichzusetzen. Bedenkt man, dass mit einer sehr hohen Eingaberate auch die muskuloskeletalen Probleme zunehmen (Lundervolt<sup>10</sup>, Duncan und Ferguson<sup>11</sup>), so sieht die Bilanz der Kosten/Nutzen-Rechnung anders aus. Der Beurteilungstest einer Tastatur sollte darum auf ein Optimum der Bedienung und nicht auf ein Maximum an Leistung ausgerichtet sein.

Aus den Resultaten der vorliegenden Arbeit geht hervor, dass die Probanden, bedingt durch die Mechanik des Finger-Hand-Arm-Systems, eine Schlagfrequenz zwischen 3 Hz

---

<sup>8</sup> Salthouse, T.A., The Skill of Typing, Scientific American, 250 (2), 94-100 (1984)

<sup>9</sup> ISO/DIS 9241-4 (Draft Standard), Ergonomic Requirements for Office Work with Visual Display Terminals (VDTs), Part4: Keyboard Requirements (1992)

<sup>10</sup> Lundervolt, A., Electromyographic Investigation During Typewriting, Ergonomics, 1 (3), 226-233 (1958)

<sup>11</sup> Duncan, J., Ferguson, D., Keyboard Operating Posture and Symptoms in Operating, Ergonomics, 17 (5), 651-662 (1974)

und 4 Hz bevorzugen. Die Resultate zeigen auch deutlich, dass konstante Abweichungen von dieser Schlagfrequenz auf Probleme bei der Bedienung der Versuchstastatur zurückzuführen sind oder dass der Leistungsdruck hohe Schlagfrequenzen diktiert. In beiden Fällen verursachte die Abweichung eine erhöhte Muskelaktivität der Unterarmmuskeln und eine negative Beurteilung der Testbedingungen. Das motorische System orientiert sich an einer "optimalen" Schlagfrequenz, die wenn immer möglich eingehalten wird. Welche Kriterien das motorische System zur Bewegungsoptimierung heranzieht, ist nicht klar. Im Rahmen des Experiments 4 wurde der kleinstmögliche Energieverbrauch während eines Bewegungsablaufs als Optimierungskriterium diskutiert (Hoyt & Taylor<sup>12</sup>). Cruse<sup>13</sup> und Rosenbaum<sup>14</sup> diskutieren ein Optimierungsprozess, der sich an der Endposition des Körpers nach einer Bewegung (keine extremen Gelenkwinkel am Ende der Bewegung) orientiert. Hogan & Flash<sup>15</sup> schlagen den durchschnittlichen quadrierten Stoss einer Bewegung als Optimierungskriterium vor. Wenn der Stoss in einer Bewegung klein ist, bleibt auch der Energieverbrauch klein. Uno et al.<sup>16</sup> glauben, dass das Drehmoment des Muskels während einer Bewegung zur Optimierung herangezogen wird. Obwohl nicht klar ist, welche Faktoren für die Bewegungsoptimierung benutzt werden, weisen die verschiedenen Ansätze immer in Richtung minimalen Energieverbrauch und nicht in Richtung maximaler Leistung.

Wie Hoyt & Taylor<sup>12</sup> schrieben, ist es dem Pferd durchaus möglich, Geh-, Trott- und Galoppgeschwindigkeiten einzunehmen, die nicht dem Optimum (kleinster Energieverbrauch) entsprechen. Auch der Mensch zeigt Abweichungen von seinem Bewegungsoptimum. Ein Leistungstest zur Beurteilung einer Tastatur könnte die Probanden zwingen, von einer optimalen Schlagfrequenz, nur um der Leistung Willen, abzuweichen. Abweichungen vom Bewegungsoptimum führen zu einer Erhöhung der Muskelaktivität (siehe Experimente 1, 3, 4). Die Leistung sollte deshalb nicht als Bedingung für einen Test vorgegeben werden. Vielmehr sollten die Probanden über längere Zeit auf den zu testenden

---

<sup>12</sup> Hoyt, D.F., Taylor, C.R., Gait and the Energetics of Locomotion in Horses, *Nature*, 292, 239-240 (1981)

<sup>13</sup> Cruse, H., Constraints for Joint Angle Control of the Human Arm, *Biological Cybernetics*, 54, 125-132 (1986)

<sup>14</sup> Rosenbaum, D.A., *Human Motor Control*, Academic Press, Inc., 7-12 (1991)

<sup>15</sup> Hogan, N., Flash, T., Moving Gracefully: Quantitative Theories of Motor Coordination, *Trends in Neurosciences*, 10 (4), 170-174 (1987)

<sup>16</sup> Uno, Y., Kawato, M., Suzuki, R., Formation and Control of Optimal Trajectory in Human Multijoint Arm Movement: Minimum Torque-Change Model, *Biological Cybernetics*, 61, 89-101 (1989)

Tastaturen üben können, damit sich ihr Bewegungsablauf im Rahmen der durch die Tastaturen gesetzten Bedingungen optimieren kann. Für die Beurteilung der Tastaturen sollte neben einem Akzeptanztest auch die Bewegung der Finger (Bewegungsmessung und EMG) gemessen werden. Abweichungen vom Bewegungsoptimum können dadurch quantitativ erfasst werden. Ein Vergleich der Tastaturen im Bereich des Bewegungsoptimums ergibt klarere Unterschiede in Bedienungsqualität als ein Vergleich der Tastaturen bei maximaler Leistung.

### 4.3 Geübte und ungeübte Tastaturbenutzer

Bei der Bedienung von Tastaturen muss zwischen geübten und ungeübten Benutzern unterschieden werden (Long<sup>17</sup>, Gentner<sup>18</sup>). Bei ungeübten Maschinenschreibern neigt der Ablauf der Einzelprozesse des Bewegungsablaufs eher zu serieller als zu paralleler Verarbeitung. Long<sup>17</sup> unterscheidet zwischen einem "Closed-Loop-Verhalten" für ungeübte Tastaturbenutzer und einem "Open-Loop-Verhalten" für geübte Tastaturbenutzer. Rückkopplungen werden zum Erlernen des Maschinenschreibens herangezogen (Adams<sup>19</sup>). Alden<sup>20</sup> berichtet, dass vor allem visuelle und akustische Rückkopplungen in der Lernphase eine wichtige Rolle spielen. Der ungeübte Maschinenschreiber benutzt die visuelle Rückkopplung zum Auffinden der Tasten und die akustische sowie auch die visuelle zur Bestätigung der Eingabe. Mit Übung wird das visuelle System mehr und mehr für die Planung von Bewegungsabläufen eingesetzt und nicht mehr nur zum Auffinden und Bestätigen einer Eingabe (Kelso<sup>21</sup>, von Holst<sup>22</sup>). Long<sup>23</sup> und Rabbitt<sup>24</sup> folgern, dass mit dem Grad der

<sup>17</sup> Long, J., Effects of Delayed Irregular Feedback on Unskilled and Skilled Keying Performance, *Ergonomics*, 19 (2), 183-202 (1976)

<sup>18</sup> Gentner, D.R., The Acquisition of Typewriting Skill, *Acta Psychologica*, 54, 233-248 (1983)

<sup>19</sup> Adams, J.A., A Closed-Loop Theory of Motor Learning, *Journal of Motor Behaviour*, 3, 111-150 (1971)

<sup>20</sup> Alden, D.G., Daniels, R., Kanarick, A., Keyboard Design and Operation: A Review of the Major Issues, *Human Factors*, 14 (4), 275-293 (1972)

<sup>21</sup> Kelso, J.A., *Human Motor Behaviour*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale New Jersey, 21-58 (1982)

<sup>22</sup> von Holst, E. und Mittelstädt, H., Das Reafferenzprinzip: Wechselwirkungen zwischen Zentralnervensystem und Peripherie, *die Naturwissenschaften*, 37, 464-476 (1950)

<sup>23</sup> Long, J., Visual Feedback and Skilled Keying: Differential Effects of Masking the Printed Copy and the Keyboard, *Ergonomics*, 19 (1), 93-110 (1976)

<sup>24</sup> Rabbitt, P., Detection of Errors by Skilled Typists, *Ergonomics*, 21 (11), 945-958 (1978)

Uebung die kinästhetische Information vermehrt zur Ueberwachung von Bewegungen herangezogen wird. Mit dem Grad der Uebung wechselt das motorische System vom "Closed-Loop-Verhalten" (direkte Bestätigung der Eingabe) zum "Open-Loop-Verhalten" (Motor-Programm). Zugleich wird die visuelle und die akustische Rückkopplung vom kinästhetischen System abgelöst, welches die Ueberwachung des Bewegungsablaufs übernimmt. Inwieweit diese eher allgemeine Beschreibung dem komplexen Vorgang beim Erlernen einer Bewegungssequenz gerecht wird, ist fraglich. Theorien und Modelle von Schmidt<sup>25</sup>, Keele<sup>26</sup>, Jordan<sup>27</sup> und anderen weisen auf ein modulares System hin. Eine Bewegung wird durch verschiedene, spezialisierte Module gesteuert. Durch Uebung werden einzelne Module ausgebildet, die unabhängig von der organisatorischen Ebene Einzelprozesse in einem Bewegungsablauf steuern. Die Steuerung eines Bewegungsablaufs wird mit Uebung mehr und mehr dezentralisiert. Die organisatorische Ebene des motorischen Systems wird somit entlastet und erhält freie Kapazität für die Planung von Bewegungsabläufen. Ein "Closed-Loop-Verhalten" umschreibt ein System, welches keine freie Kapazität für die Planung von Bewegungsabläufen hat. Umgekehrt umschreibt ein "Open-Loop-Verhalten" ein System, welches Bewegungsabläufe plant.

Interessant ist, dass beide Verhaltensweisen verschiedene Strategien benutzen, um sich an Veränderungen anzupassen. Ungeübte Tastaturbenutzer reagierten auf zeitlich variierende akustische Rückkopplungen, indem sie andere Rückkopplungsmechanismen (visuell) heranziehen ("substitution hypothesis", Long<sup>28</sup>). Geübte Tastaturbenutzer hingegen passen sich schnell an die neuen Bedingungen an, indem sie die zeitlich variierenden akustischen Signale ignorieren ("adaption hypothesis", Long<sup>28</sup>). Verglichen mit einer konventionellen Tastatur mit Tastenweg, zeigen geübte Benutzer bei Gebrauch einer "weglosen" Folientastatur grosse Einbrüche in Leistung (Cohen Loeb<sup>29</sup>). Aber schon nach kurzer Zeit

---

<sup>25</sup> Schmidt, R.A., A Schema Theory of Discrete Motor Skill Learning, *Psychological Review*, 82 (4), 225-260 (1975)

<sup>26</sup> Keele, S.W., Cohen, A., Ivry, R., Motor Programs: Concepts and Issues: In Jeannerod, M., *Attention and Performance*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale New Jersey, 77-110 (1990)

<sup>27</sup> Jordan, M., Motor Learning and the Degrees of Freedom Problem: In Jeannerod, M., *Attention and Performance XIII*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 796-836 (1990)

<sup>28</sup> Long, J., Effects of Delayed Irregular Feedback on Unskilled and Skilled Keying Performance, *Ergonomics*, 19 (2), 183-202 (1976)

<sup>29</sup> Cohen Loeb, K.M., Membrane Keyboards and Human Performance, *The Bell System Technical Journal*, 62 (6), 1733-1749 (1983)

(3 Std.) passen die Benutzer ihren Bewegungsablauf an die neuen Bedingungen an, und die erbrachte Leistung beim Bedienen der Folientastatur unterscheidet sich nicht mehr wesentlich von derjenigen der konventionellen Tastatur. Ungeübte Benutzer hingegen zeigen keine Unterschiede in Leistung zwischen den beiden Tastaturtypen. Auch im Vergleich einer alphanumerischen "weglosen" Piezotastatur mit einer konventionellen Tastatur (IBM) zeigen die geübten Benutzer grössere Einbussen in Leistung beim Bedienen der "weglosen" Piezotastatur als die ungeübten Benutzer (Barrett<sup>30</sup>). Probleme bei der elektronischen Schnittstelle zwischen der Tastatur und dem Computer verhinderten aber eine Adaptation des Bewegungsablaufs. Somit blieb auch nach fünfmaligem Training immer noch ein signifikanter Unterschied der Leistung zwischen den beiden Tastaturtypen bestehen.

In Anbetracht der Tatsache, dass ungeübte und geübte Tastaturbenutzer verschiedene Rückkopplungsmechanismen und Anpassungsstrategien benutzen, sollte dies auch in einer ergonomischen Prüfung einer Tastatur berücksichtigt werden. Wenn Tastaturen mit geübten Probanden ergonomisch geprüft werden, beziehen sich die Resultate nur auf geübte Tastaturbenutzer, nicht aber auf ungeübte. Dies gilt auch im umgekehrten Sinn. In der ergonomischen Prüfung einer Apparatur wird oft nur einer der beiden Übungszustände berücksichtigt. Ist die Untersuchungsstrategie auf den ungeübten Benutzer abgestimmt, so kann sie dem geübten Benutzer hinderlich sein. Die Softwarebedienung einer CNC-Maschine zum Beispiel läuft Schritt für Schritt ab. Dadurch wird der Benutzer sicher zum Ziel geführt. Nach einiger Zeit der Uebung weiss der Benutzer, wie er in einem Schritt zum Ziel kommen kann. Das Schritt-für-Schritt-Vorgehen hindert ihn aber, in einem Schritt zum Ziel zu gelangen. Ein anpassungsfähiges System könnte dem Abhilfe schaffen. Apparate sollten deshalb immer für beide Zielgruppen, geübt und ungeübt, ergonomisch geprüft werden.

---

<sup>30</sup> Barrett, J., Guggenbühl, U., Krueger, H., Alphanumeric Keyboards: An Ergonomic Evaluation, Final Report, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie der ETH Zürich (1991)



## **Anhang**

**Anhang A: Fragebogen**

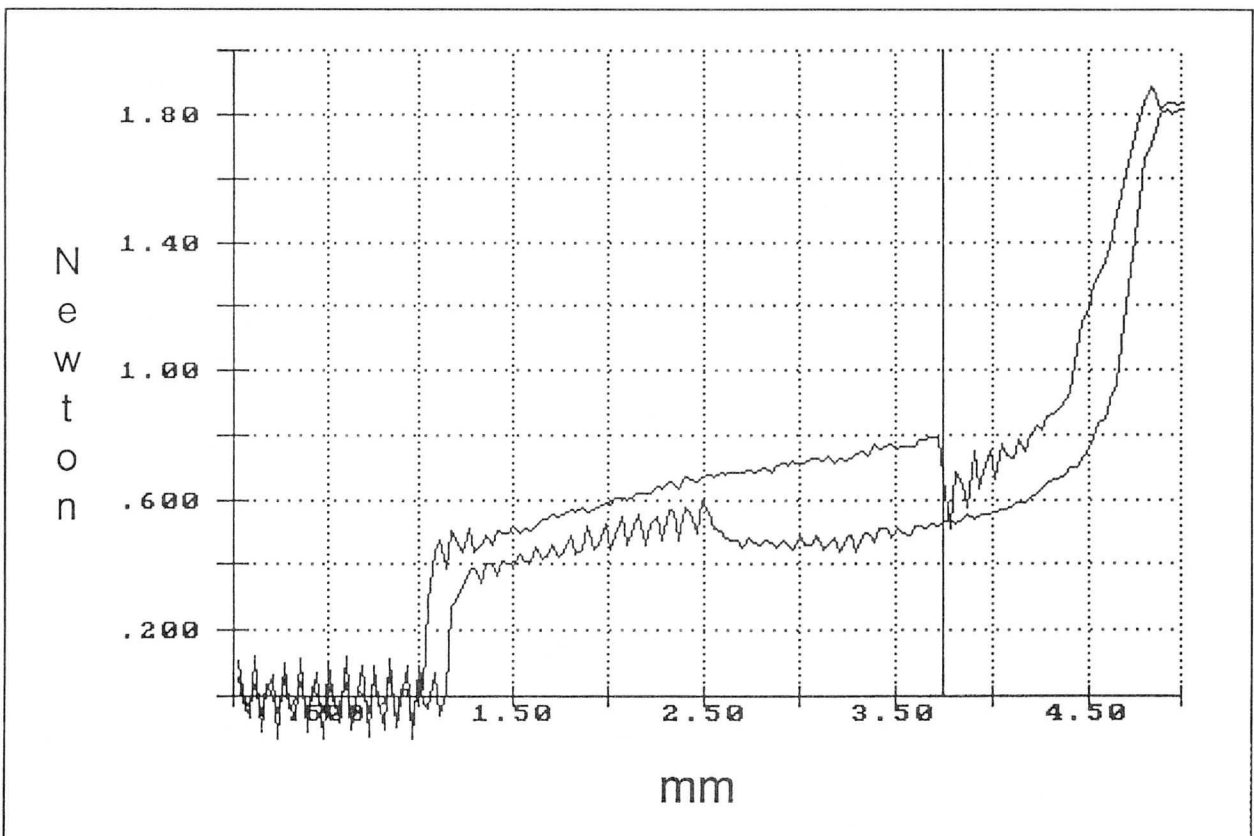
Fragebogen		
	Wie war die Tastatur zu bedienen?	
sehr unangenehm	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	sehr angenehm
	Wie haben Sie die Tastatur empfunden?	
sehr hart	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	sehr weich
	War Ihnen die Tastatur vertraut?	
völlig vertraut	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	völlig ungewohnt
	Wie hat die Tastatur reagiert?	
stark verzögert	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	sehr schnell
	Wie hat Ihnen die Tastatur gefallen?	
überhaupt nicht	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	sehr gut

Fragebogen zur Bestimmung der Akzeptanz. Dieser Fragebogen wurde in allen 4 Experimenten eingesetzt.

## Anhang B: Tastaturen



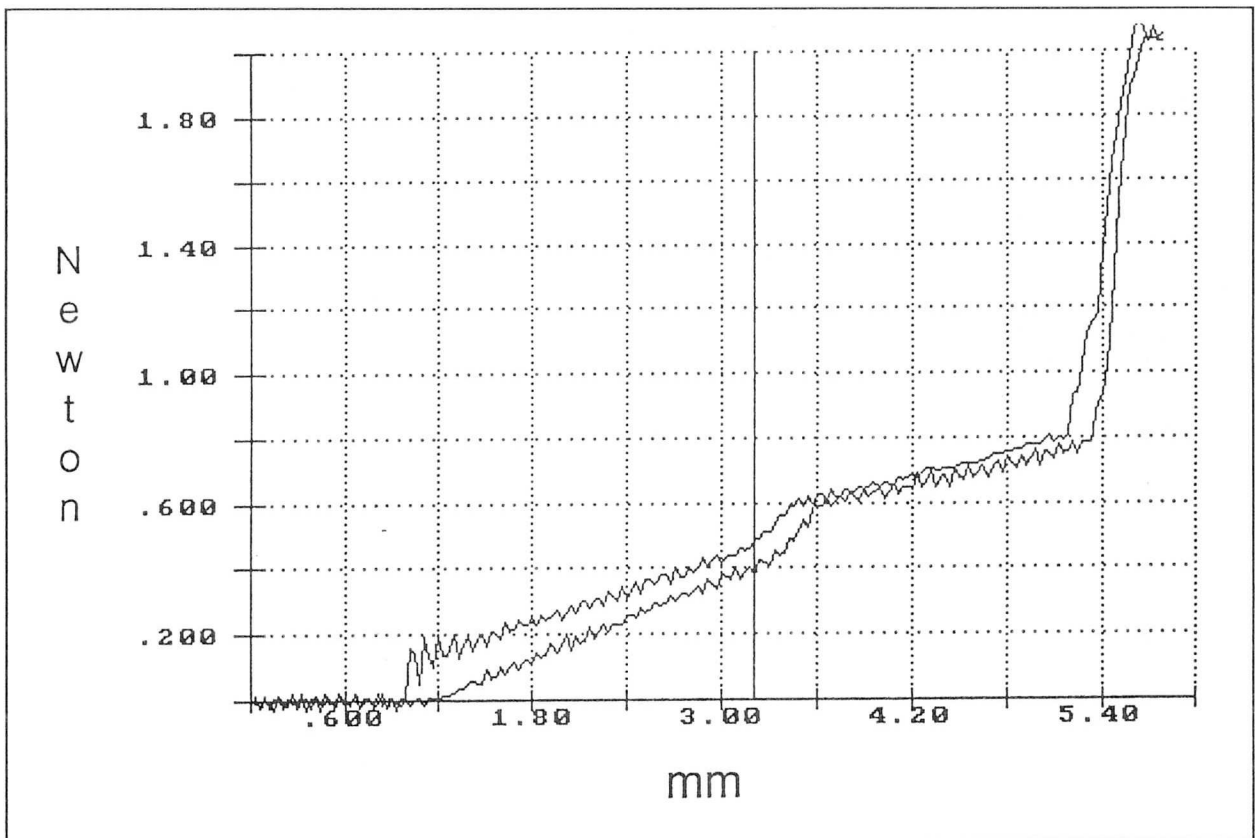
Tastatur mit Tastenhub und Druckpunkt (IBM)



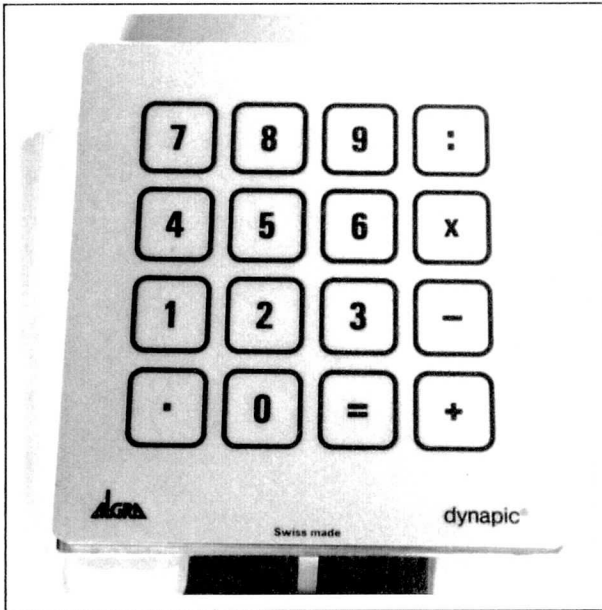
Druck-Weg-Verlauf der Tastatur mit Tastenhub und Druckpunkt. Die vordere, ansteigende Kurve zeigt den Druck-Weg-Verlauf beim Drücken der Taste. Die hintere, absinkende Kurve zeigt den Druck-Weg-Verlauf beim Loslassen der Taste. Der Schnittpunkt zwischen der vertikal verlaufenden Linie und der vorderen, ansteigenden Kurve ist der Punkt, wo die Taste elektronisch auslöst (Stellkraft).



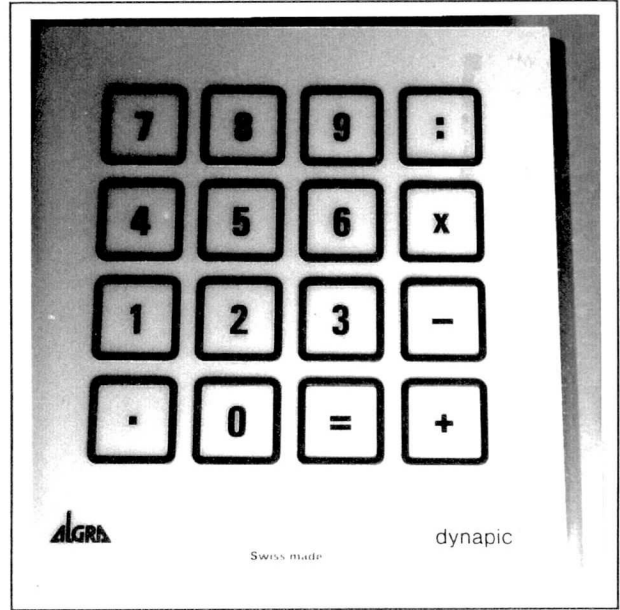
Tastatur mit Tastenhub ohne Druckpunkt (lin)



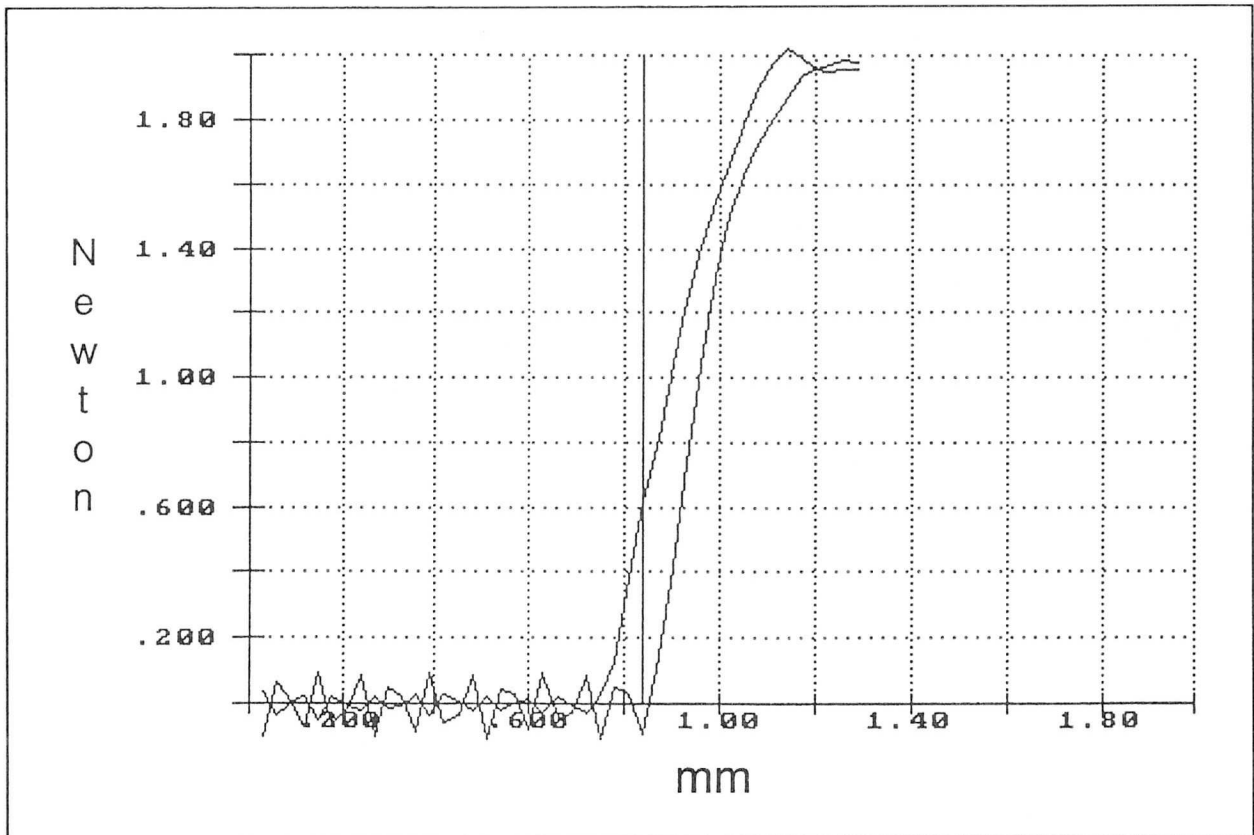
Druck-Weg-Verlauf der Tastatur mit Tastenhub ohne Druckpunkt. Die vordere, ansteigende Kurve zeigt den Druck-Weg-Verlauf beim Drücken der Taste. Die hintere, absinkende Kurve zeigt den Druck-Weg-Verlauf beim Loslassen der Taste. Der Schnittpunkt zwischen der vertikal verlaufenden Linie und der vorderen, ansteigenden Kurve ist der Punkt, wo die Taste elektronisch auslöst (Stellkraft).



Piezotastatur ganz flach mit Metalloberfläche (fla)



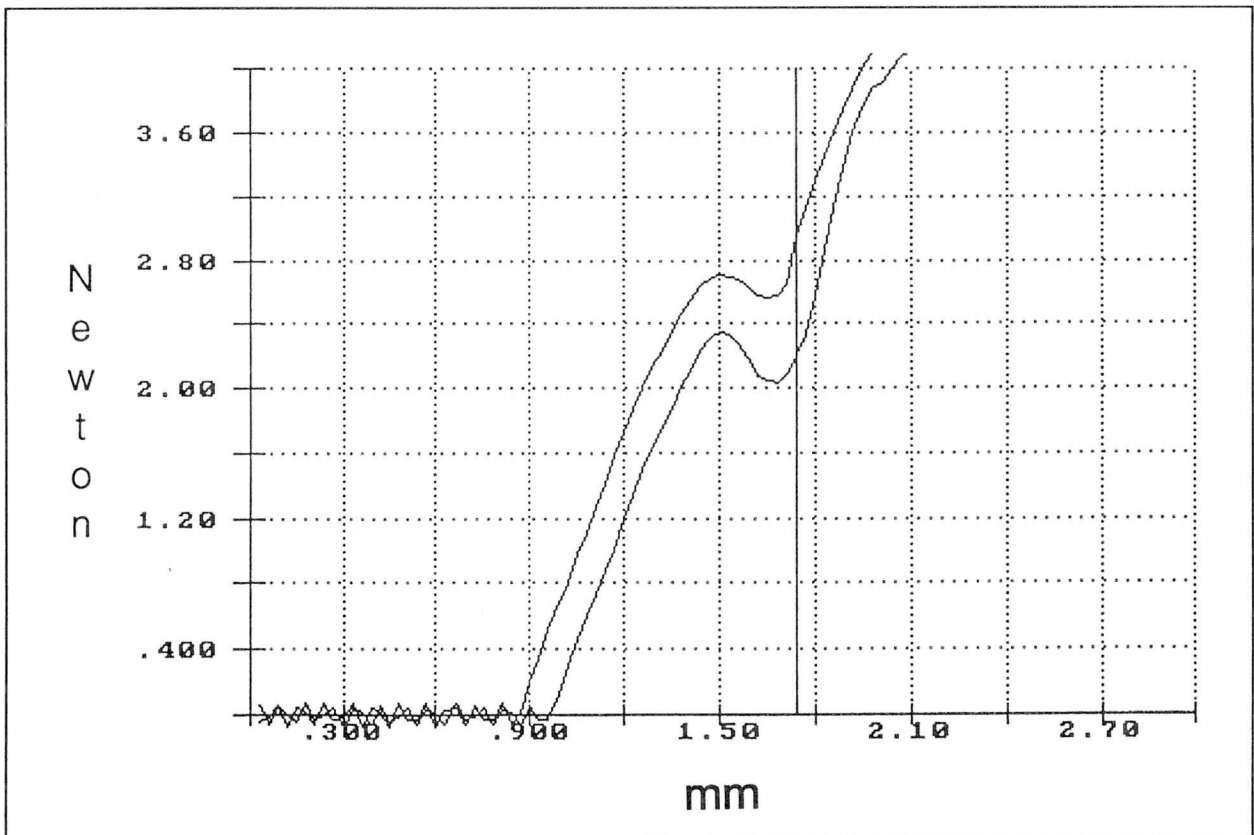
Piezotastatur mit Tastenrand und Polycarbonatoberfläche (Ran); Piezotastatur wie oben aber mit akustischem Signal (aku)



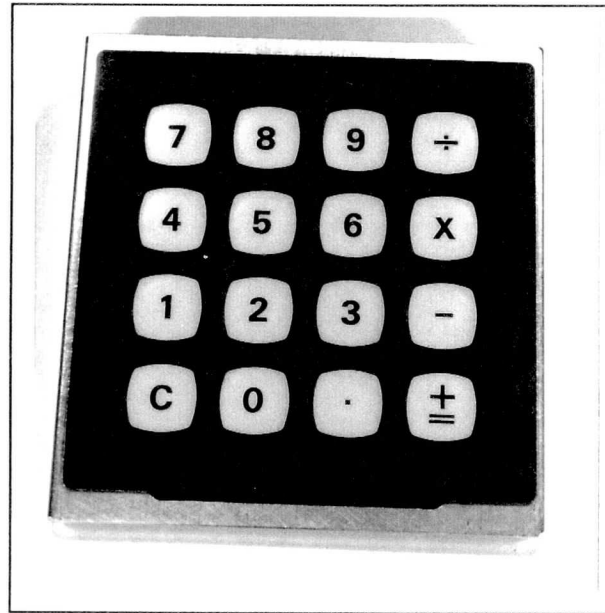
Druck-Weg-Verlauf der Piezotastaturen. Die vordere, ansteigende Kurve zeigt den Druck-Weg-Verlauf beim Drücken der Taste. Die hintere, absinkende Kurve zeigt den Druck-Weg-Verlauf beim Loslassen der Taste. Der Schnittpunkt zwischen der vertikal verlaufenden Linie und der vorderen, ansteigenden Kurve ist der Punkt, wo die Taste elektronisch auslöst (Stellkraft).



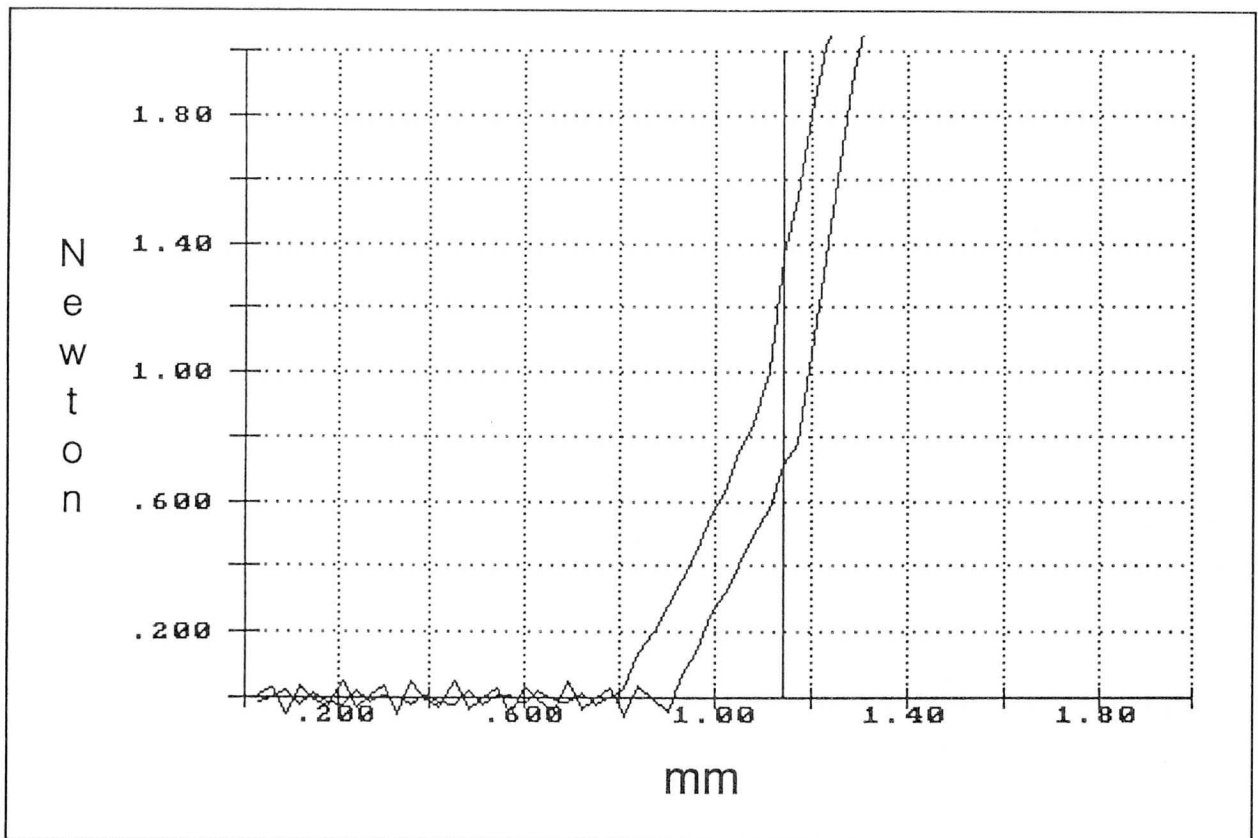
Folientastatur mit Druckpunkt (Dru)



Druck-Weg-Verlauf der Folientastatur mit Druckpunkt. Die vordere, ansteigende Kurve zeigt den Druck-Weg-Verlauf beim Drücken der Taste. Die hintere, absinkende Kurve zeigt den Druck-Weg-Verlauf beim Loslassen der Taste. Der Schnittpunkt zwischen der vertikal verlaufenden Linie und der vorderen, ansteigenden Kurve ist der Punkt, wo die Taste elektronisch auslöst (Stellkraft).



Folientastatur ohne Druckpunkt (fla)



Druck-Weg-Verlauf der Folientastatur ohne Druckpunkt. Die vordere, ansteigende Kurve zeigt den Druck-Weg-Verlauf beim Drücken der Taste. Die hintere, absinkende Kurve zeigt den Druck-Weg-Verlauf beim Loslassen der Taste. Der Schnittpunkt zwischen der vertikal verlaufenden Linie und der vorderen, ansteigenden Kurve ist der Punkt, wo die Taste elektronisch auslöst (Stellkraft).

## **Anhang C: Definitionen**

<b>Stellkraft</b>	<b>Die notwendige Kraft, um eine Taste auszulösen</b>
<b>Tastenweg</b>	<b>Der Weg, den eine Taste beim vollen Durchdrücken macht</b>
<b>Druckpunkt</b>	<b>Der Punkt, wo beim Durchdrücken einer Taste der Widerstand der Taste plötzlich abnimmt</b>
<b>Systemzeit</b>	<b>Zeit vom Berühren der Taste bis zum Auslösen der Taste</b>
<b>Totzeit</b>	<b>Zeit vom Berühren der Taste, bis die nächste Taste für eine neue Eingabe vom System freigegeben wird (Zeit der programmierten Verzögerungsschleife + Systemzeit)</b>
<b>Zwischen-Ziffer-Zeit</b>	<b>Zeit zwischen den eingegebenen Ziffern einer Zahl</b>



## Literaturverzeichnis

---

- Abbs, J.H., Gracco, V., Cole, K., Control of multi-joint movement coordination: Sensorimotor mechanisms in speech motor programming, *Journal of Motor Behavior*, 16, 195-231 (1984)
- Adams, J.A., A Closed-Loop Theory of Motor Learning, *Journal of Motor Behaviour*, 3, 111-150 (1971)
- Adams, J.A., Historical Review and Appraisal of Research on the Learning, Retention and Transfer of Human Skills, *Psychological Bulletin*, 101 (1), 41-74 (1987)
- Alden, D.G., Daniels, R., Kanarick, A., Keyboard Design and Operation: A Review of the Major Issues, *Human Factors*, 14 (4), 275-293 (1972)
- Anderson, V.P., *Cumulative Trauma Disorders*, Taylor & Francis (1988)
- Arbib, M.A., Perceptual Structures and Distributed Motor Control: In Brooks V.D., *Handbook of Physiology-The Nervous System II. Motor Control*, Bethesda, MD: American Physiological Society, 1449-1480 (1981)
- Arbib, M.A., Programs, Schemas, and Neural Networks for Control of Hand Movements: Beyond the RS Framework: In Jeannerod, M., *Attention and Performance XIII*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 111-138 (1990)
- Astrand, P-O, *Textbook of Workphysiology*, McGraw-Hill, Kap. 2 u. 3 (1986)
- Atha, J., Current Techniques for Measuring Motion, *Applied Ergonomics*, 15 (4), 245-257 (1984)
- Barrett, J., Guggenbühl, U., Krueger, H., *Alphanumeric Keyboards: An Ergonomic Evaluation, Final Report*, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie der ETH Zürich (1991)
- Basmajian, J., DeLuca C.J., *Muscle Alive: Their Functions Revealed by Electromyography*, 5th Edition, Williams & Wilkins (1985)
- Baum, E., *Motographie I*, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung Dortmund, Bericht Nr.226, Wirtschaftsverlag N.W., Bremerhaven (1980)
- Baum, E., *Motographie II*, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung Dortmund, Bericht Nr.324, Wirtschaftsverlag N.W., Bremerhaven (1983)

- Baum, E., Motographie III, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung  
Dortmund, Bericht Nr.468, Wirtschaftsverlag N.W., Bremerhaven (1986)
- Benninghoff, Anatomie Band 1, Urban & Schwarzenberg (1985)
- Bernstein, N., (1896-1966), Seine Werke sind zusammengefasst und übersetzt in die  
englische Sprache in: The Coordination and Regulation of Movement, Oxford:  
Pergamon Press (1967)
- Bernstein, N.A., Analyse der Körperbewegungen und Stellungen im Raum mittels Spiegel-  
Stereoaufnahmen, Arbeitsphysiologie, 3 (3), (1930)
- Bernstein, N.A., Die kymocyclographische Methode der Bewegungsuntersuchung, Hbt. d.  
bio. Arbeitsmethoden, 5 (5a), Abderhalden (1927)
- Bortz, J., Statistik für Sozialwissenschaftler, Springer Verlag (1989)
- Braune, W., Fischer, O., Ueber den Schwerpunkt des menschlichen Körpers, mit Rücksicht  
auf die Ausrüstung des deutschen Infanteristen, Abh. der math.-phys. Klasse der k.  
sachs. Gesellschaft der Wissenschaften, 26, 561-672 (1889)
- Brunner, H., Richardson, R., Effects of Keyboard Design and Typing Skill on User  
Keyboard Preference and Throughput Performance, Proceedings of the Human Factors  
Society, 28<sup>th</sup> Annual Meeting, (1984)
- Carlsöö, S., Schreiben mit mechanischer und elektrischer Schreibmaschine, International  
Congress on Ergonomics Dortmund, Taylor and Francis, London, 361-365 (1964)
- CODA-3, Movement Techniques Ltd, Loughborough, UK
- Cohen Loeb, K.M., Membrane Keyboards and Human Performance, The Bell System  
Technical Journal, 62 (6), 1733-1749 (1983)
- Collard, R. and Povel D.J., Theory of Serial Pattern Production: Tree Traversals,  
Psychological Review 89, 6, 693-707 (1982)
- Cruse, H., Constraints for Joint Angle Control of the Human Arm, Biological Cybernetics,  
54, 125-132 (1986)
- Cruse, H., Dean, J., Heuer, H., Schmidt R.A., Information for Motor Control: In Neumann,  
O., & Prinz, W. (Ed), Relations between Perception and Action: Current approaches,  
Berlin, Springer Verlag (Im Druck)
- Deininger, R.L., Human Factors Engineering Studies of the Design and Use of Pushbutton  
Telephone Sets, Bell Systems Technical Journal, 39, 995-1012 (1960)

DIN 33401, Stellteile (1977)

Drill, R., Chronocyclographische Arbeitsstudien - Nagel einschlagen, ,  
Psychophysiologische Arbeit, Riga (1930)

Duncan, J., Ferguson D., Keyboard Operating Posture and Symptoms in Operating,  
Ergonomics, 17 (5), 651-662 (1974)

Dvorak, A., Merrick, N., Dealey, W., Ford, G., Typewriting Behaviour. Psychology Applied  
to Teaching Typewriting, New York. American Book Co (1936)

ELITE, Elaboratore di immagini televisive, BTS Milano, Italien

Ergonomic Principles in Office Automation, Ericson Information Systems AB, Sweden  
(1983)

Evarts, E.V., Feedback and Corollary Discharge: A Merging of the Concepts, Neuroscience  
Research Program Bulletin, 9 , 86-112 (1971)

EXPERTVISION, Motion Analysis Corporation, Santa Rosa CA, USA

Fleischer, A.G., Lange, W., Analysis of Hand Movements During the Performance of  
Positioning Tasks, Ergonomics, 26 (6), 555-564, (1983)

Fukuda, Studies on Human Dynamic Postures from the Viewpoint of Postural Reflexes,  
Acta Oto-Laryngologica, 161, 1-52 (1961)

Furnée, E.H., Hybrid Instrumentation in Prosthetics Research, Proceedings 7th  
International Conference on Medical & Biological Engineering, Stockholm, 446 (1967)

Furnée, E.H., TV/Computer Motion Analysis Systems: The First Two Decades,  
Dissertation: Delft University of Technology, Faculty of Applied Physics (1989)

Gentner, D.R., The Acquisition of Typewriting Skill, Acta Psychologica 54, 233-248 (1983)

Gibson, J.J., The Senses Considered as Perceptual Systems, Greenwood Press, Publishers  
(1966)

Goldmann, J., Nadler, G., Electronics for Measuring Human Motions, Science, 124, 07-810  
(1956)

Gordon, J. and Ghez, C., Trajectory Control in Target Force Impulses, Experimental Brain  
Research, 67, 253-269 (1987)

- Graf, M., Guggenbühl, U., Krueger, H., Movement Dynamics of Sitting Behaviour during Different Activities, Designing for Everyone, Proceedings of the Elevens Congress of the International Ergonomics Association, Taylor & Francis, 15-17 (1991)
- Guggenbühl, U., An Investigation into the Subjective Effects of Short Duration Noise Interfering with Speech, Mastersarbeit, London University (1984)
- Guggenbühl, U., Krüger, H., Bewegungsanalyse an verschiedenen industriellen Arbeitsplätzen, Sozial- und Präventivmedizin, 32, 266-268 (1987)
- Hagberg, M., On Evaluation of Local Muscular Load and Fatigue by Electromyographie, National Board of Occupational Safety and Health, Arbete Och Hälsa, 24 (1981)
- Hellebradt, F.A., Tonic Neck Reflexes in Exercises of Stress in Man, American Journal of Physical Medicine, 35, 144-159 (1956)
- Hening, W., Favilla, M., Ghez, C., Trajectory Control in Target Force Impulses, Experimental Brain Research, 71, 116-128 (1988)
- Hogan, N., Flash, T., Moving Gracefully: Quantitative Theories of Motor Coordination, Trends in Neurosciences, 10 (4), 170-174 (1987)
- Holtzhausen, K., Beitrag zur ergonomischen Arbeitsplatzanalyse durch rechnergestützte Bewegungsstudien, Fortschritt Berichte VDI, Reihe 17: Biotechnik, 26, VDI Verlag, Düsseldorf (1985)
- Hoyt, D.F., Taylor, C.R., Gait and the Energetics of Locomotion in Horses, Nature, 292, 239-240 (1981)
- IBM, Bildschirmgeräte am Arbeitsplatz - Benutzerakzeptanz (1982)
- ISO/DIS 9241-4 (Draft Standard), Ergonomic Requirements for Office Work with Visual Display Terminals (VDTs), Part4: Keyboard Requirements (1992)
- Ivry, R.B., Keele, S.W., Diener, H., Dissociation of the lateral and Medial Cerebellum in Movement Timing and Movement Execution, Experimental Brain Research, 73, 167-180 (1988)
- Ivry, R.B., Keele, S.W., Timing Functions of the Cerebellum, Journal of Cognitive Neuroscience, 1 (2), 136-152 (1989)
- Jarrett, M.O., A TV/Computersystem for Human Locomotion Analysis, Dissertation: University of Strathclyde, Glasgow (1976)

- Jonsson B., Quantitative Electromyographic Evaluation of Muscular Load during Work, *Scand. J. Rehab. Med.* 6, 69-74 (1978)
- Jordan, M., Motor Learning and the Degrees of Freedom Problem: In Jeannerod, M., *Attention and Performance XIII*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 796-836 (1990)
- Keele, S.W., Cohen, A., Ivry, R., Motor Programs: Concepts and Issues: In Jeannerod, M., *Attention and Performance*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale New Jersey, 77-110 (1990)
- Keele, S.W., Ivry, R.B., Pokorny, R., Force Control and its Relation to Timing, *Journal of Motor Behavior*, 19, 96-114 (1987)
- Keele, S.W., Movement Control in Skilled Motor Performance, *Psychological Bulletin*, 70, 387-403 (1968)
- Keele, S.W., Parkarny, R.A., Corcos, D., Ivry, R., Do Perception and Production Share Common Timing Mechanisms: A Correlational Analysis, *Acta Psychologica*, 60, 173-191 (1985)
- Kelso, J.A., *Human Motor Behaviour*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale New Jersey, 21-58 (1982)
- Kinkead, R.D., Gonzalez B.K., *Human Factors Design Recommendations for Touch Operated Keyboards*, Final Report (12091), Honeywell Inc (1969)
- Kleine Geschichte vom Schreiben und Verfielfältigen*, Wegra Verlagsgesellschaft Stuttgart (1970)
- Klockenberg, E., *Rationalisierung der Schreibmaschine und ihrer Bedienung*, Springer Verlag Berlin (1926)
- Knight, J.L., *Manual Control and Tracking*: Aus Salvendy, G., *Handbook of Human Factors*, John Wiley & Sons, 182-218 (1987)
- Konishi, M., The Role of Auditory Feedback in the Control of Vocalization in the White Crowned Sparrow, *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 22, 770-783 (1965)
- Kornbrot, D.E., Organization of Keying Skills: The Effect of Motor Complexity and Number of Units, *Acta Psychologica*, 70, 19-41 (1989)
- Kroemer, K.H.E., Ueber den Einfluss der räumlichen Lage von Tastenfeldern auf die Leistung an Schreibmaschinen, *Int. Z. angew. Physiol.*, 20, 240-251 (1964)

- Kugler, P.N., Turvey, M.T., *Information, Natural Law, and the Self-assembly of Rhythmic Movement*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey (1987)
- Lashley, K.S., *The Accuracy of Movement in the Absence of Excitation from the Moving Organ*, *American Journal of Physiology*, 43, 169-194 (1917)
- Lestienne, F., *Effects of Inertial Load and Velocity on the Braking Process of voluntary Limb movements*, *Experimental Brain Research*, 35, 407-418 (1979)
- Long, J., *Effects of Delayed Irregular Feedback on Unskilled and Skilled Keying Performance*, *Ergonomics*, 19 (2), 183-202 (1976)
- Long, J., *Visual Feedback and Skilled Keying: Differential Effects of Masking the Printed Copy and the Keyboard*, *Ergonomics*, 19 (1), 93-110 (1976)
- Lundervold, A., *Electromyographic Investigation During Typewriting*, *Ergonomics*, 1 (3), 226-233 (1958)
- Macellari, V., *CoSEL, a Computer Peripheral Remote Sensing Device for Tree-Dimensional Monitoring of Human Motion*, *J. Med & Bio. Eng. & Comp.*, 21 (3) 311-318 (1983)
- MacKay, D.G., *The Problem of Flexibility and Fluency in Skilled Behavior*, *Psychological Review*, 89, 483-506 (1982)
- MacKay, D.G., *The Problem of Rehearsal or Mental Practice*, *Journal of Motor Behavior*, 13 (4), 274-285 (1981)
- Maeda, K., Harigudi, S., Hoskova, M., *History of the Studies on Occupational Cervicobrachial Disorder in Japan and Remaining Problems*, *Journal of Human Ergology*, 11, 17-29 (1982)
- Malt, L.G., *Keyboard Design in the Electronic Era*, Malt Applied Systems GB, Conference Paper No. 6 (1977)
- Marey, E-J., *Le Movement*, Masson, Paris (1894)
- Margolin, D.J., *The Neurophysiology of Writing and Spelling: Semantic, Phonological, Motor and Perceptual Processes*, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 36A, 459-489 (1984)
- Martin, E., *Die Schreibmaschine und ihre Entwicklungsgeschichte*, Verlag Payer Basten, Aachen (1949)

- Meink, H. M., Benecke, R., Meyer, W., Hohne, J., Conrad, B., Human Ballistic Finger Flexion: Uncoupling of Three-Burst Pattern, *Experimental Brain Research*, 55, 127-133 (1984)
- Melvill-Jones, G., Watt, D.G.D., Observations on the Control of Stepping and Hopping Movements in man, *Journal of Physiology*, 219, 353-359 (1971)
- Miller, A.G., Galanter, E., Pribram, H., Plans and the Structure of Behaviour, New York: Holt, Rinehart and Winston (1960)
- Monty, R.W., Snyder H.L., Keyboard Design: An Investigation of User Preference and Performance, *Proceedings of the Human Factors Society*, 27<sup>th</sup> Annual Meeting (1983)
- Moritz, W.E., Shreve P.L., A system for Locating Points Lines and Planes in Space, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IM-26 (1) (1977)
- Muybridge, E., Animal Locomotion, An Electrophotographic Investigation of Consecutive Phases of Animal Movements, 12 vol. Philadelphia.(1887), Nachdruck (in Auswahl) Dover, New York (1955)
- Nakaseko, M., Grandjean, E., Studies on Ergonomically Designed Alphanumeric Keyboards, *Human Factors*, 27 (2), 175-187 (1985)
- Newell, K.M., Van Emmerik, R.E.A., The Aquisition of Coordination: Preliminary Analysis of Learning to Write, *Human Movement Science*, 8, 17-32 (1989)
- Norman, D.A., Fischer, D., Why Alphabetic Keyboards are not Easy to Use: Keyboard Layout Doesn't Much Matter, *Human Factors*, 24(5), 509-519, (1982)
- Nottebohm, F., Ontogeny of Bird Song, *Science*, 167, 950-956 (1970)
- Optotrack, Produktemappe, Northern Digital Inc. Waterloo, Kanada (1986)
- Parblanc, V., Pellison, D., Gaze Saccade Orienting and Hand Pointing are Locked to their Goal by Quick Internal Loops: In Jeannerod, M., *Attention and Performance XIII*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 653-676 (1990)
- Pearson, K., The Control of Walking, *Scientific American*, 235, 72-87 (1976)
- Pollard, D., The Effect of Feedback on Keying Performance, *App. Ergonomics*, 10 (4), 194-200 (1979)
- Rabbitt, P., Detection of Errors by Skilled Typists, *Ergonomics*, 21 (11), 945-958 (1978)

- Raibert, M.H., Motor Control and Learning by the State Space Model, Doctoral Dissertation, MIT (1977): Uebernommen aus Kelso, J.A.S., Human Motor Behavior, Lawrence Earlbaum Associates, Seite 173 (1982)
- Robinson, E., Cases of Telegraphists Cramp, British Medical Journal, 4 (1982)
- Roe, C.J., Muto, W., Feedback and Key Discrimination on Membrane Keypads, Proceedings of the Human Factors Society, 28<sup>th</sup> Annual Meeting, (1984)
- Rohmert, W., Forschungsbericht zur ergonomischen Gestaltung von Schreibmaschinentastaturen, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bericht DV 82-003, Deutschland (1982)
- Rose, M.J., Keyboard Operating Posture and Actuation Force: Implications for Muscle Over-Use, Applied Ergonomics, 22 (3), 198-203 (1991)
- Rosenbaum, A.D., van Hindorff, Munoro, M., Scheduling and Programming of Rapid Finger Sequences: Tests and Elaborations of the Hierarchical Editor Model, Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 13, 2, 193-203 (1987)
- Rosenbaum, D.A., Human Motor Control, Academic Press, Inc., 253-295 (1991)
- Rosenbaum, D.A., Keny, S. and Derr, M.A., Hierarchical Control of Rapid Movement Sequences, Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 9, 86-102 (1983)
- Rothwell, J.C., Traub, M., Day, B., Obeso, J., Thomas, B., Marsden C., Manual Motor Performance in Deafferented Man, Brain, 105, 515-542 (1982)
- Salthouse, T.A., The Skill of Typing, Scientific American, 250 (2), 94-100 (1984)
- Samuelson, B., Wagenheim, M., Wos, H., A Device for Three-Dimensional Registration of Human Movement, Ergonomics, 30 (12), 1655-1670 (1987)
- Schmidt, R.A., A Schema Theory of Discrete Motor Skill Learning, Psychological Review, 82 (4), 225-260 (1975)
- SELSPOT AB, Mölndal, Schweden
- Shaffer, H., Timing in Musical Performance: In Gibbon, J., (Ed.), Timing and Time Perception, Annals of the NY Academy of Sciences, 420-428 (1984)
- Shaffer, L.H., Rhythm and Timing in Skill, Psychological Review, 89 (2), 109-122 (1982)
- Shumpe, G., Hansen, G., Syndicus, G., Rössler, H., Ganguntersuchungen und funktionelle Wirbelsäulenvermessungen mittels eines neu entwickelten Echtzeit-Stereo-Ultraschall-



- Topometers (ESUT). Funktionelle Diagnostik in der Orthopädie, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 69-72 (1979)
- Stammbach, M., Giesinger, T., Optoelektronisches Bewegungsmessgerät, Diplomarbeit, betreut durch U.Guggenbühl, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, ETH-Zürich, (1991)
- Sternberg, S., Monsell, S., Knoll, R., Wright, C., the Latency and Duration of Rapid Movement Sequences: Comparison of Speech and Typewriting; in Stelmach G.E., Information Processing in Motor Control and Learning, Academic Press, New York, 117-152 (1978)
- Stoffert, G., Analyse und Einstufung von Körperhaltungen bei der Arbeit nach der OWAS-Methode, Zeitschrift für Arbeitswissenschaften, 39, 31-38, (1985)
- Summers, J.J., The Role of Timing in Motor Program Representation, Journal of Motor Behavior, 7, 229-241 (1975)
- Taub, E., Bermann, A.J., Movement and Learning in the Absence of Sensory Feedback: In Freeman S.J., the Neurophysiology of Spatially Oriented Behaviour, Homewood; Dorsey, 173-192 (1968)
- Taylor, R.M., Berman, J., Ergonomics Aspects of Aircraft Keyboard Design: The Effects of Gloves and Sensory Feedback on Keying Performance, Ergonomics 25 (11), 1109-1123 (1982)
- Terzuolo, C.A, Vivani, P., Determinants and Characteristics of Motor Patterns used for Typing, Neuroscience, 5, 1085-1103 (1980)
- Turvey, M.T., Fitch, H.L., Tuller, B., The Bernstein Perspective: The Problem of Degrees of Freedom and Context-Conditioned Variability: Aus Kelso, J.A.S., Human Motor Behaviour, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 239-252 (1982)
- Turvey, M.T., Preliminaries to a Theory of Action with Reference to Vision: In R.Shaw et al., Perceiving, Action and Knowing: Toward an Ecological Psychology, Hillsdale, NJ; Erlbaum, 211-265 (1977)
- Uno, Y., Kawato, M., Suzuki, R., Formation and Control of Optimal Trajectory in Human Multijoint Arm Movement: Minimum Torque-Change Model, Biological Cybernetics, 61, 89-101 (1989)
- VICON-System Produktemappe, Oxford Medical Systems, Oxford Medical Computers, Oxford Metrics, UK (1981 und später)

von Holst, E. und Mittelstädt, H., Das Reafferenzprinzip: Wechselwirkungen zwischen Zentralnervensystem und Peripherie, *die Naturwissenschaften*, 37, 464-476 (1950)

Vorberg, D., Hambuch, R., On the Temporal Control of Rhythmic Performance: In Requin, J., (Ed.), *Attention and Performance VII*, Erlbaum, Hillsdale, NJ, 535-555 (1978)

Vorberg, D., Hambuch, R., Timing of Two-Handed Rhythmic Performance: In Gibbon, J., (Ed.), *Timing and Time Perception*, *Annals of the NY Academy of Sciences*, 390-406 (1984)

Wallace M., Buckle P., *Ergonomic Aspects of Neck and Upper Limb Disorders*. *International Reviews of Ergonomics*, Edited by Osborne D.J., 1, Taylor and Francis, (1987)

Weber, W., Weber, E., *Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge* (1836), Berlin, (1894)

Wilson, D.M., The Central Nervous Control of Flight in a Locust, *Journal of Experimental Biology*, 38, 471-490 (1961)

Wing, A.M., Kristofferson, A.B., Response Delays and the Timing of Discrete Motor Responses, *Perception and Psychophysics*, 14, 5-12 (1973)

Wing, A.M., the Long and Short of Timing in Response Sequences: In Stelmach, G.E. et al., *Tutorials in Motor Behavior*, North Holland, 469-486 (1980)

Wright, C.E., Generalized Motor Programs: Reexamining Claims of Effector Independence in Writing: In Jeannerod, M., *Attention and Performance XIII*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 294-320 (1990)

Zebris Medizintechnik GmbH, Grabenstrasse 17, D-7972 Isny im Allgäu

Zipp, P., Recommendations for the Standardization of Lead Positions in Surface Electromyography, *Eur. J. Appl. Physiol*, 50, 41-54 (1982)

## **Publikationen und Teilnahme mit Beitrag an wissenschaftlichen Konferenzen**

---

- Guggenbühl, U., Krueger, H., Dreidimensionale Bewegungsanalyse 26. Jahrestagung der deutschen Gesellschaft für Arbeitsmed., Hamburg, 605-606 (1986)
- Guggenbühl, U., Krueger, H., Bewegungsanalyse an verschiedenen industriellen Arbeitsplätzen, Sozial und Präventivmedizin, 32, 266-268 (1987)
- Guggenbühl, U., Krueger, H., Bewegungsanalyse an verschiedenen industriellen Arbeitsplätzen, 27. Jahrestagung der deutschen Gesellschaft für Arbeitsmed., Essen, 275-279 (1987)
- Guggenbühl, U., Krueger, H., Ergonomische Eigenschaften von Flach Tastaturen, 34. Arbeitswissenschaftlicher Kongress, RWTH Aachen, (1988)
- Guggenbühl, U., Krueger, H., Ergonomische Optimierung einer "weglosen" Flach Tastatur, Schlussbericht, Zürich 1989
- Guggenbühl, U., Brunner, W., Krueger, H., Dreidimensionale Bewegungsanalyse, 35. Arbeitswissenschaftlicher Kongress, Stuttgart-Hohenheim, (1989)
- Guggenbühl, U., Krueger, H., Ergonomische Eigenschaften von Flach Tastaturen, 35. Arbeitswissenschaftlicher Kongress, Stuttgart-Hohenheim, (1989)
- Guggenbühl, U., Krueger, H., Musculoskeletal Strain Resulting from Keyboard Use, Work with Display Units 89, Berlinguet, L., Berthelette, D., (Editors) Elsevier Science Publisher, North Holland, 121-128 (1990)
- Guggenbühl, U., Krueger, H., Ergonomic Characteristics of Flat Keyboards, Designing for Everyone, Proceedings of the 11th Congress of the International Ergonomics Association, Vol. 1, Paris, 730-732 (1991)
- Guggenbühl, U., Krueger, H., Is Feedback Necessary when Using a Keyboard?, Human Aspects in Computing: Design and Use of Interactive Systems and Work with Terminals, Bullinger, H.-J. (Editor), Elsevier Science Publishers B.V., 113-117 (1991)

## **Lebenslauf**

---

Ich wurde am 5. September 1955 in Liestal geboren. In Leeds, England, besuchte ich das Kitson College of Technology und schloss mit Advanced Levels in Physik, Biologie und Chemie ab. Ich studierte dann am Polytechnikum in Leeds, England, Environmental Health und schloss im Juli 1982 mit einem Bachelor of Science (BSc hons) ab. Während und nach dem Studium in Leeds arbeitete ich 2 Jahre an der Abteilung für Lärmbekämpfung der EMPA Dübendorf. Danach studierte ich an der Universität von London Applied Acoustics und schloss im Oktober 1984 mit einem Masters of Science (MSc) ab. Seit 1985 arbeite ich als Assistent am Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie der ETH Zürich und befasse mich mit Forschungs- und Beratungsaufgaben im Bereich der Ergonomie. Im Rahmen der Zulassungsbestimmungen für das Doktorat an der ETH Zürich bestand ich im Dezember 1987 mit Erfolg eine Aufnahmeprüfung in den Fächern Physiologie, Ergonomie, Arbeitsphysiologie und Umwelthygiene.

Neben Beratung und Forschung umfasst meine Tätigkeit am Institut die Betreuung der Arbeitsgruppe Motorik. Die Arbeitsgruppe befasst sich im wesentlichen mit Forschung in den Bereichen Sitzqualität, Rückenbelastung und der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine, insbesondere mit der Manipulation von Maschinen. Seit 1991 halte ich im Rahmen eines Lehrauftrags an der Abt.III E Vorlesungen in Ergonomie.