Andreas van Hooven

Auditive Einflussgrößen bei der zeitlichen Handlungsplanung im Klavierspiel:

Analyse auditiv-sensomotorischer Kopplungen

Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Auditive Einflussgrößen bei der zeitlichen Handlungsplanung im Klavierspiel:

Analyse auditiv-sensomotorischer Kopplungen

Dissertation

zur Erlangung des
Doktorgrades der Philosophie (Dr. phil.)

vorgelegt

der Philosophischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg,
Fachbereich Musik-, Sport- und Sprechwissenschaft

von Herrn Andreas van Hooven

geb. am 14.04.1971 in Lingen (Ems)

Gutachter:
Prof. Dr. Wolfgang Auhagen
Prof. Dr. Herbert Bruhn
Tag der Verteidigung: 03.12.2009

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.
1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2009
Zugl.: Halle-Wittenberg, Univ. Diss., 2008

978-3-86955-222-4

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2009
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.
1. Auflage, 2009
Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-222-4

Auszug

Auditive Einflussgrößen bei der zeitlichen Handlungsplanung im Klavierspiel: Analyse auditiv-sensomotorischer Kopplungen

Die vorgelegte Arbeit geht der Frage einer Vereinbarkeit zweier Theorien über die musikalische Psychomotorik nach: der so genannten Rückkopplungsschleife zwischen Gehör und Motorik als regierende Einheit zeitlicher Handlungsplanung einerseits und dem Modell so genannter motorischer Programme in Verbindung mit einem Inneren Taktgeber. Das Experiment untersucht die sensomotorische Reaktion auf zeitlich verzögerte und stumm geschaltete Klänge beim Spiel einer einfachen Melodie am Klavier.

Einzige Aufgabe der Probanden war das konstante Spiel im selbst gewählten Tempo. Die Teilnehmer spielten dazu auf einem Digitalpiano vom Blatt 14 Durchläufe eines kurzen, einfachen Musikstücks. Ein Mess- und Störrechner wurde vor den Klanggenerator des Instrumentes geschaltet. Alle Anschläge wurden in digitalen Zeitreihen mitgeschnitten. Ausgewählte Tasten der Klaviatur erklingen in einigen Durchläufen erst um eine festgelegte Zeit nach ihrem Anschlag (Störstelle). Hierdurch wird die Erwartung eines unmittelbaren Zusammenhanges ursächlicher Motorik und auditiver Rückmeldung – und damit die Rückkopplungsschleife – gestört. Zudem wurde das Verhalten bei ausbleibender auditiver Rückmeldung nach einer Störstelle beobachtet.

Über das statistische Verfahren der Autokorrelation wurden Periodizitäten im Verhalten jedes Probanden ermittelt. Metrische Strukturen auf Basis des Vierteltaktes und das individuelle Grundtempo wurden durch ein neues methodisches Werkzeug – die Bestimmung periodischer Mittelwertsabweichungen – aus den Zeitreihen entfernt. Durch Blockvarianzanalysen konnte das Verhalten der Teilnehmer in zuvor verbundenen Stichproben anschließend unter verschiedenen Aspekten dennoch verteilungsfrei getestet werden. Die Ergebnisse dieser ebenso recht neuen Methode wurden durch belastbare Rangdatentests kontrolliert. Zudem lieferte die Untersuchung persönlicher Merkmale weitere Ansätze für eine Interpretation der Befunde.

Der Versuch bescheinigt den Probanden eine hohe auditive Aufmerksamkeit während des gesamten Versuchs. Störstellen lassen die Probanden anfänglich ihren Grundschlag um über 30ms verschleppen. Dieser Befund widerspricht einer statischen Inneren Uhr, die auditive Rückmeldungen ausschließt. Vielmehr scheint der oder scheinen die Inneren Taktgeber auf Basis der akustischen Informationen justierbar zu sein.

Der verschleppte Grundschlag geht maßgeblich auf die zweite, aber auch die dritte Folgezählzeit nach Störstellen zurück – indes nicht bei 80er Störstellen. Damit kann ein Schwellenwert bei 80ms auditiv-sensomotorischer Entkopplung behauptet werden: Indes verhalten sich die Probanden – für einen Schwellenwert untypisch – zu dessen Seiten identisch. Mehrere Befunde der neurowissenschaftlichen Literatur legen als Grund nahe, dass den Probanden 80er Entkopplungen genauer auffielen als andere Störstellen.

Im Lauf des Versuchs beginnen die Pianisten die Zählzeit der Störstelle zu kürzen und kompensieren damit die relativ stabil auftretende Dehnung der zweiten Folgezählzeit. So behalten sie zunehmend den Grundschlag bei (Lerneffekt). Dies wiederum legt nahe, dass nicht allein eine auditiv-sensomotorische Rückkopplungsschleife wirkt, sondern diese den Inneren Taktgebern qualitative Informationen liefert, zum Beispiel in binärer Form: gestört ja/nein.

Der Lerneffekt verschwindet signifikant in dem Moment, wenn die Pianisten zum ersten Mal mit stumm geschalteten Folgenoten konfrontiert werden. Auffällig betrifft dies tendenziell beidhändig Veranlagte. Reine Rechtshänder hingegen korrigieren unverändert auf erlerntem Niveau. Die Störstellen betrafen in jenem zwölften Durchgang einzig die rechte Hand. Die auditiv-sensomotorische Rückkopplungsschleife beeinflusst Innere Taktgeber also obendrein hemisphärisch. Zudem reduziert Vorwissen allgemein die Temposchwankungen.

Insgesamt können die Ergebnisse nicht mit dem Modell einer auditiven Rückkopplungsschleife samt erinnertem Referenzintervall oder einem einzelnen oder auch wenigen Inneren Taktgebern allein erklärt werden. Vielmehr konnte die zentrale Frage dieser Arbeit, ob sowohl eine auditive Rückkopplungsschleife als auch Innere Taktgeber beim Solovortrag im Klavierspiel grundsätzlich vorkommen und einander situativ ergänzen, im Sinn einer Theorie multimodal koaktivierbarer, adaptiver neuronaler Netze ohne zentralen Taktgeber mit relativer Wahrscheinlichkeit bejaht werden.

Vorwort

Mir war die Studie von Dahl und Bresin (2001) bis zu der Zeit unbekannt, in der ich bereits die Diskussion zu dieser Arbeit schrieb. Hätte ich von diesen Ergebnissen Ende 2004 beim technischen Aufbau des Versuchs gewusst, betrüge die kleinste Störstelle sicherlich weniger als 40ms. So aber habe ich mich an mir bekannten Werten der Literatur orientiert.

Da ich diese Dissertation auch als das zeitliche Abbild eines Wissenszuwachses betrachte, schied es für mich aus, die verspätete Kenntnis der Dahl'schen Ergebnisse an einer anderen als einer späten Stelle in die Dissertation einzuführen. Kein Zweifel besteht für mich, dass die Hypothesen unverändert so lauten müssen, wie vor dem ersten Tastenanschlag.

Inhaltsverzeichnis

AUSZUG 1
VORWORT 2

INHALTSVERZEICHNIS 3

1. EINLEITUNG 5

1.1. FRAGESTELLUNG 6
1.2. MOTORIK: PLANUNG KOMPLEXER BEWEGUNGSABLÄUFE 9
1.2.1. DAS KONZEPT DES MOTORISCHEN PROGRAMMS 9
1.2.1.1. SENSORISCHE RÜCKMELDUNGEN ALS INTEGRALER BESTANDTEIL DER BEWEGUNG 10
1.2.2. KORTIKALE SCHNITTSTELLEN ZWISCHEN MOTORIK UND GEHÖR 11
1.3. GRENZEN VON GEHÖR UND MOTORIK 13
1.3.1. AUDITIVE DISKRIMINATION 13
1.3.2. MECHANOZEPTISCHE DISKRIMINATION 15
1.3.3. GRÖßE VERWENDETER ENTKOPPLUNGEN 16
1.4. HYPOTHESEN 17
1.4.1. KOGNITIONSMODELLE ÜBER DIE STEUERUNG MUSIKALISCH MOTORISCHER PROZESSE 19
1.4.2. ERWEITERUNG DER FRAGESTELLUNG 20

2. VERSUCHSAUFBAU UND METHODEN 21

2.1. GRUNDLAGEN 21
2.2. VERSUCHSAUFBAU 22
2.2.1. VERSUCHSPERSONEN 22
2.2.2. VERSUCHSABLAUF 22
2.2.3. NOTENMATERIAL 23
2.2.4. POSITIONIERUNG DER STÖRSTELLEN 25
2.2.5. VERSUCHSDURCHLÄUFE 27
2.2.6. VERSUCHSINSTRUMENT 29
2.2.7. MESSRECHNER 31
2.2.8. SOFTWARE 32
2.3. METHODEN 33
2.3.1. PRÜFUNG DER MESSAPPARATUR 33
2.3.1.1. SUMMIERENDE LATENZEN IN LOGIC 34
2.3.1.2. EICHUNG DER DELAYS 37
2.3.2. MESSDATENAKQUISE 37
2.3.2.1. PROBLEMATIK DER MESSWERTDIFFERENZEN 38
2.3.2.2. PROBLEME MIT SIMULTANEN ANSCHLÄGEN BENACHBARTER NOTEN 39
2.4. STATISTISCHE GRUNDLAGEN 41
2.4.1. ZUSAMMENSETZUNG DER STICHPROBE 42
2.4.2. SKALENNIVEAU 44
2.5. HERLEITUNG DES STATISTISCHEN VERFAHRENS 46
2.5.1. BESCHREIBENDE STATISTIK 46
2.5.1.1. AUTOKORRELATION 46
2.5.1.2. PARTIELLE AUTOKORRELATION 49
2.5.1.3. KREUZKORRELATION 49
2.5.1.4. EXKURS: HÄUFIGKEITSVERTEILUNGEN 50
2.5.2. SCHLIEßENDE STATISTIK 52
2.5.2.1. VERTEILUNGEN UND VERFAHREN – PARAMETRISCHE VS. NICHTPARAMETRISCHE TESTS 52
2.5.2.2. VERTEILUNGSFREIE TESTS FÜR K ABHÄNGIGE STICHPROBEN 53
2.5.2.3. VARIANZANALYTISCHE METHODEN 54
2.5.2.4. BLOCKVARIANZANALYSE 57
2.5.2.5. ABSOLUTE ABWEICHUNGEN VOM PERIODISCHEN MITTELWERT 59
2.5.2.6. DAS PROBLEM DER RANDOMISIERUNG 61
2.5.2.7. NICHTPARAMETRISCHER TEST ZUR KONTROLLE DER BLOCKVARIANZANALYSE 62
2.5.2.8. TESTS ZUR UNTERSUCHUNG PERSÖNLICHER MERKMALE 63

3. ERGEBNISSE 64

3.1. ALLGEMEINE BEOBACHTUNGEN 64
3.1.1. SUBJEKTIVE ÄUßERUNGEN DER PROBANDEN 65
3.2 BESCHREIBENDE STATISTIK 68
3.2.1. FEHLER IN DEN TONHÖHEN 68
3.2.1.1. LAGE DER TONHÖHENFEHLER IM NOTENBILD 70
3.2.1.2. LAGE DER TONHÖHENFEHLER NACH STÖRSTELLEN 71
3.2.1.3. TONHÖHENFEHLER NACH HÄNDEN BETRACHTET 71
3.2.2. ALLGEMEINE STABILITÄT DER TEMPOGESTALTUNG 74
3.2.3. AUTOKORRELATIONEN UND PARTIELLE AUTOKORRELATIONEN 77
3.2.4. TEST DER GESAMTHEIT AUF NORMALVERTEILUNG 85
3.2.4.1. TEST EINZELNER STREUUNGEN AUF NORMALVERTEILUNG 87
3.2.5. TEMPOSCHWANKUNGEN ALLGEMEIN 88
3.2.6. GRUPPENVERHALTEN (PAARWEISE) 92
3.2.6.1. KREUZKORRELATIONEN 92
3.2.6.2. TYPISIERUNG DER ZÄHLZEITEN 95
3.2.6.3. EXKURS: NICHTLINEARE TEMPOFUNKTION 97
3.2.6.4. UNTERSCHIEDE IN DEN ZÄHLZEITTYPEN 98
3.2.7. ZUSAMMENFASSUNG 101
3.3. SCHLIEßENDE STATISTIK 102
3.3.1. UNTERSCHIEDE BEI ZÄHLZEITTYPEN 104
3.3.2. UNTERSCHIEDE NACH GRÖßE DER STÖRSTELLEN 106
3.3.3. FOLGEVERHALTEN IN ABHÄNGIGKEIT DER STÖRGRÖßE 108
3.3.4. UNTERSUCHUNG EINZELNER ZÄHLZEITEN 111
3.3.5. AUSWIRKUNGEN VON UNTERDRÜCKUNGEN 112
3.4. ZUSAMMENHÄNGE MIT PERSÖNLICHEN MERKMALEN 116
3.4.1. TEMPOSCHWANKUNGEN UND HÄNDIGKEIT 116
3.4.2. TEMPOSCHWANKUNGEN UND VORWISSEN 120
3.4.3. TEMPOSCHWANKUNGEN UND ORGELSPIEL 123
3.5. ZUSAMMENFASSUNG 125
3.5.1. SCHLUSSFOLGERUNG 131

4. DISKUSSION 133

4.1. THEORIEN DER INNEREN UHR 133
4.2. EXKURS: MODELLE ZEITLICHER GEDÄCHTNISSTRUKTUREN 138
4.2.1. SENSORISCHE SPEICHER 138
4.3. TIME SHRINKING: PHÄNOMEN ZEITLICHER ERWARTUNGSHALTUNGEN? 142
4.4. ERSCHÖPFENDE SUCHPROZESSE 143
4.5. DER BEFUND DER NEGATIVEN ASYNCHRONIE 147
4.6. DIE AUDITIV-SENSOMOTORISCHE INTEGRATION 153
4.6.1. KORTIKALE UND SUBKORTIKALE ZEITVERARBEITUNG 159
4.7. NEURONALE NETZWERKE 161
4.7.1. SCHLUSSFOLGERUNG 167

5. FAZIT 168

6. ANHANG 172

6.1. ANALYSE DES NOTENBILDES ZUR AUSWAHL DER STÖRSTELLEN 172
6.2. LOGIC-VERDRAHTUNG 173
6.3. VERKÜRZTER HÄNDIGKEITSTEST NACH OLDFIELD 174
6.4. FRAGEBOGEN FÜR DIE PROBANDEN 175
6.5. LITERATURVERZEICHNIS 176
6.6. GLOSSAR 181
DANK 183
ERKLÄRUNG 184

1. Einleitung

Eine in den letzten Jahren zunehmend durch die Forschung zur musikalischen Psychomotorik diskutierte Frage widmet sich der Koordination von Gehörsinn und Motorik bei der sensomotorischen[1] Produktion von Zeitstrukturen, etwa dem Instrumentalspiel. Im Wesentlichen beherrschen zwei unterschiedliche Annahmen die Forschungsliteratur[2]: Einerseits wird zum Beispiel in Tapping-Versuchen geprüft, ob eine Rückkopplungsschleife (Kristofferson 1977) zwischen Motorik und auditiver[3] Wahrnehmung die Grundlage für die zeitliche Präzision von musikalischen Handlungen sein kann oder nicht. Viele Versuche stellen dazu motorische Synchronisationsaufgaben anhand akustisch vorgegebener Klicksignale (Vos 1992, Prinz 1997, Aschersleben 2000a, Fischer 2004). Übertragen auf den musikalischen Prozess fände diese Versuchssituation eine Analogie in Trockenübungen des Klavierspiels zu einem Metronomschlag.

Zum anderen diskutiert die Forschung zur musikalischen Psychomotorik die Frage, wie unabhängig die Motorik von auditiver Rückmeldung sein kann und unter welchen Bedingungen (Finney 1997, Repp 1998). Hintergrund sind Erkenntnisse über die Tempogestaltung hoch geschulter Instrumentalisten, die nach langjähriger Lernphase ein so genanntes motorisches Programm[4] (Keele 1968) ausgebildet haben, das ihnen beim idealen (fehlerfreien) Vortrag den Abgleich von geplanter Handlung und erwartetem Ergebnis maßgeblich auf sensomotorischer Ebene – also im Zusammenspiel der Physiologie von Tastsinn, Muskulatur und den zugehörigen kognitiven Ebenen[5] des Gehirns – ermöglicht (Shaffer 1982, Finney 1997). Hierbei soll die auditive Rückmeldung nachrangig werden. Zwar konnte Finney zeigen, dass eine stumm geschaltete Klaviatur das Spiel von Probanden nicht nennenswert beeinflusste. Erklangen die Töne angeschlagener Tasten indes um 250ms verzögert, beeinträchtige dies die Motorik der Pianisten sehr wohl[6].

Wesentlicher Bestandteil der Überlegungen zu motorischen Programmen sind so genannte Innere Uhren (Taktgeber), die im Gehirn des Menschen feste Pulsationen aussenden (Schulze 1978). Auf diese Weise seien hoch geschulte Musiker in der Lage,

---

[1] Sensomotorik: durch Reize bewirkte Gesamtaktivität in sensorischen und motorischen Teilen des Nervensystems und des Organismus von Lebewesen sowie Steuerung und Kontrolle der Bewegungen. Siehe auch Glossar, Kapitel 6.6.
[2] vgl. dazu Migliore 2001, S. 2757.
[3] Das Gehör betreffend, zum Gehörsinn oder -organ gehörend.
[4] Siehe Kapitel 1.2.1.
[5] Kognition: menschliche Erkenntnis (lat. cognitio: Bekanntschaft, Erkenntnis, Vorstellung).
[6] Finney 1997, S. 169.

ihre für die Interpretation von Musikstücken bevorzugten Tempi über Jahre hinaus zu reproduzieren oder das Eingangstempo eines Stückes nach zahlreichen Tempowechseln wieder zu erlangen (Auhagen 2008). Indes variieren die Ansichten über den Aufbau Innerer Uhren und die Frage, wie sie angeregt werden.

Schulze formuliert in seinen vielfach zitierten Versuchen von 1978 bereits, dass diese Uhr sich an externe Ereignisse anpassen könne. Ausführlich begründet wird dieses variable Modell erst durch Povel und Essens (1985), die auch annehmen, dass die Pulsfolgen dieser Uhr unterteilt und miteinander kombiniert werden können. Im Grunde ist dies schon eine Abkehr von einem singulären Modell. Einen nicht rein singulären Ansatz hat auch Shaffer (1982), jedoch mit anderer Ausprägung: Seine Innere Uhr liefert Informationen an eigene motorische Subsysteme für jede Hand.

Interdisziplinäre Studien insbesondere seit den 1990er Jahren prüfen Theorien über so genannte Neuronale Netze, die in vielen Bereichen des Gehirns für unterschiedliche kognitive Prozesse bereitstehen, sich mit verschiedenen motorischen und auditiven Subsystemen synchronisieren und so auch beim Instrumentalspiel beteiligt wären. Dieser dezentral plurale Ansatz wird von Buonomano (2005) sogar dahin ausgeweitet, dass er Neuronale Netze als dynamische Systeme auffasst, die sich bei Bedarf – zum Beispiel extern angeregt – aufbauen und wieder deaktivieren. Überdies verarbeiteten sie zeitliche Informationen durch Selbstorganisation, also ohne zentralen Taktgeber.

Alle genannten Ansätze schließen aber weder das prinzipielle Vorhandensein einer auditiven Rückkopplungsschleife aus, noch behaupten sie deren gänzliche Inaktivität bei hoch geschulten Musikern. Dass die akustische Rückkopplung eigener musikalisch motorischer Handlungen bei zunehmender Beherrschung des Instrumentes nachrangig werden kann, haben Takahashi und Tsuzaki (2006) darlegen können. Der signifikante Unterschied zwischen einer hoch und einer weniger trainierten Gruppe von Pianisten veranlasste die Forscher indes nicht, die akustische Rückmeldung als ein wichtiges Element der Kontrolle eigener Handlungen für hoch trainierte Musiker auszuschließen[7].

1.1. Fragestellung

Am Anfang der hiesigen Studie steht aus dem vorgenannten Grund die Annahme, dass beide oben skizzierten Kontrollmechanismen prinzipiell die Grundlage für eine musikalisch

[7] Takahashi 2006, S. 1617. Ihr Versuch bezog sich allerdings auf die spielerische Imitation eines zuvor gehörten Musikstücks.

motorische Präzision bilden können. Jedoch ist nicht klar, welcher Mechanismus wann wirksam ist. Allgemein ließe sich zwar formulieren, dass die sensomotorische Kontrolle mit zunehmendem Schulungsgrad größeren Einfluss gewinnt. Dies könnte in einer Verlagerung neuronaler Prozesse auf andere Hirnregionen seine Ursache finden[8]. Dass der Gehörsinn aber zur Gestaltung eines konstanten Tempos etwa beim Spiel einfacher Stücke keinerlei Informationen mehr liefere und ausschließlich ein motorisches Programm samt sensomotorischer Perzeption die Handlungsplanung regiere, erscheint im Umfeld des Musizierens selbst bei höchster Perfektion fragwürdig.

Denkbar ist eine Rückkopplungsschleife zwischen Motorik und auditiver Wahrnehmung, die unter bestimmten Bedingungen entweder die Handlungsplanung erneut bestimmt oder dem motorischen Programm vermittelnd hinzutritt. Die zentrale Frage dieser experimentellen Studie lautet mithin:

> 1) Wirken eine Auditive Rückkopplungsschleife und ein motorisches Programm einander ausschließend?
>
> 1a) Wenn Ja: Unter welchen situativen Bedingungen wechseln sie einander ab?
>
> 1b) Existiert dabei eine von außen erkennbare zeitliche Grenze, die den Übergang vom einen zum anderen Mechanismus kennzeichnet und somit Aufschluss über kognitive Vorgänge beim Wechsel der Mechanismen bieten kann? Existiert also ein kognitives Analogon zu einem neurophysiologischen Schwellenwert?

Ein Beispiel kann den Hintergrund der Frage 1b erläutern: Die international bekannte deutsche Jazz-Organistin Barbara Dennerlein schilderte 2009 in einem Interview ihre Erfahrungen im Spiel auf Pfeifenorgeln gegenüber elektromagnetischen Orgeln wie der Hammond B3: „Es ist natürlich eine große Herausforderung, diese meist etwas trägeren Instrumente zum Swingen und Grooven zu bringen. Je nach Orgelbautechnik ist die Verzögerung bis zum Erklingen des Tons unterschiedlich stark. Man muss sich immer neu darauf einstellen und sozusagen früher spielen, um diese Verzögerung auszugleichen.[9]“

Dennerlein beschreibt ihre irritierte Erwartung über den zeitlichen Zusammenhang der eigenen Motorik (Tastendruck) zum resultierenden Toneinsatz. Zudem erklärt sie ihre zeitlich motorische Anpassung an die unerwartet späte auditive Rückkopplung. Diese

---

[8] „So führte das Erlernen einer komplizierten Sequenz von Fingerbewegungen nach mehrwöchigem täglichen Üben zu einer Ausbreitung des Gebietes der primär motorischen Hirnrinde, welches während der Aufgabe aktiv war. Andererseits nimmt bei zunehmender Automatisierung erlernter Bewegungsabläufe die aufmerksamkeitsgebundene Aktivierung präfrontaler Kortexgebiete ab.“ Schmidt 2000, S. 120.

[9] Dennerlein 2009, S. 1.

Anpassung setzt weder rein kognitiv vor dem ersten Anschlag auf der unvertrauten Orgel ein noch nach dem letzten Anschlag – sondern auditiv-sensomotorisch während des Spiels. Eine Messreihe der Tastenanschläge würde statistisch also nur zufällig isochron ausfallen.

Über viele Jazz-Organisten in identischer Situation erhoben wäre eine systematische Temposchwankung genau dann zu erwarten, während diese sich an das unvertraute Instrument anpassen. Die Anpassung wäre im Sinn der Frage 1b die von außen erkennbare zeitliche Grenze, die Aufschluss über kognitive Vorgänge bieten kann. So bei der Frage, ob die von Dennerlein geschilderte Anpassung erst beginnt, wenn der Toneinsatz der Pfeifenorgel um einen bestimmten zusätzlichen Wert (Schwellenwert) gegenüber einer Hammond B3 zeitlich verzögert ist.

Der physikalische Parameter Zeit stellt im Rahmen dieser Überlegungen also zweifellos die objektive Messgröße dar. Allerdings ist dieser Parameter nicht mit der subjektiv empfundenen Zeit gleichzusetzen[10]. Doch gerade in diesem Umstand liegt eine besondere experimentelle Chance: Beim Solovortrag befindet sich der Instrumentalist allein im Gefüge seiner subjektiven Zeitauffassung. Ein Abgleich gegen extern verlässliche Zeitstrukturen (Dirigat, Perzeption des Klanges anderer Instrumente, Blickkontakt, Metronom, Klick etc.) bleibt ausgeschlossen.

Zusätzlich herrscht eine strenge Kopplung der Sinnesreize vor. Denn die ursächliche motorische Handlung – etwa der Tastenanschlag am Klavier – führt innerhalb einer erwarteten Zeit verlässlich zum resultierenden Klang. Mäki-Patola (2005) setzt bei mechanoakustischen Klavieren je nach Anschlagstärke zwischen 30 und 100ms Dauer an, bis sich der Klang in seiner Charakteristik stabil aufgebaut hat[11]. Pneumatische Orgeln weisen höhere Spannen auf, die der Spieler aber in seine Erwartung einbezieht. Eben diese stets erwartete zeitliche Kopplung von Tastendruck und Toneinsatz ist als Bindeglied zwischen auditiver und sensomotorischer Perzeption der besondere experimentelle Beobachtungsgegenstand dieser Studie:

Im Sinn der zentralen Frage 1 gilt es, dieses Bindeglied Erwartungshaltung zwischen Gehörsinn und Tastsinn zu lockern. Eine auditiv-sensomotorische Entkopplung wird in dieser Studie daher als jede durch äußeren Eingriff (Manipulation) zusätzlich erwirkte zeitliche Verzögerung des resultierenden Toneinsatzes definiert. Töne, die dieser Manipulation unterliegen, werden als Störstelle definiert. Um ein geeignetes Mittel sowie den passenden Grad dieser zusätzlichen Verzögerung bestimmen zu können, müssen

[10] Vgl. dazu Tempo-Density-Theory von Barbara Barry (1990), Auditiver Kappa-Effekt nach Crowder und Neath (1994), Zusammenhänge von rhythmischer und harmonischer Dichte nach Auhagen (1995).

zunächst aber Vorüberlegungen zu den beteiligten Prozessen bei Gehörsinn, Tastsinn und Motorik – wie auch ihren mutmaßlichen Schnittstellen – angestellt werden.

1.2. Motorik: Planung komplexer Bewegungsabläufe

1.2.1. Das Konzept des motorischen Programms

Bereits 1965 konnten Kornhuber und Deecke zeigen, dass willkürlichen Bewegungen der Hände und Füße ein „langsam ansteigendes oberflächen-negatives Hirnpotential von 10-15 Volt[12]“ im Gehirn des Menschen vorausgeht, das sie Bereitschaftspotenzial nannten. Auf Basis dieser Befunde zum prämotorischen Bereitschaftspotenzial begründete Keele 1968 sein Konzept des motorischen Programms als eine Folge von Muskelbefehlen, die bereits vor Beginn der Bewegung strukturiert ist. Zwar ging er weiterhin davon aus, dass „das Verhältnis zwischen Geschwindigkeit, Präzision und Entfernung (einer Bewegung) von der Zeit bestimmt zu sein scheint, die für eine Rückkopplung und korrigierende Änderungen benötigt werden.“ Befunde wie die von Kornhuber ließen Keele jedoch annehmen, dass sich „die Kontrolle für Serien wiederholter Bewegungen dabei von der Rückkopplung auf ein Motorprogramm verlagert[13].“

Bewegung ist das Resultat mehrerer Stufen eines spezifischen, zentralnervösen motorischen Programms. An dessen Beginn steht der Handlungsantrieb, der zum einen als Beginn einer Willkürmotorik bewussten Ursprungs sein kann, etwa der Griff nach einem Glas Wasser. Reflexartige Bewegungen – wie das Wegziehen der Hand von einer heißen Herdplatte – gehen auf einen unbewussten Handlungsantrieb zurück. Ein motorisches Programm zeichnet sich durch Informationen über die geplante Kraft, Richtung und Geschwindigkeit der künftigen Bewegung aus[14]. Allerdings beschränkt sich das motorische Programm nicht nur darauf, effektorische Systeme anzusprechen, sodass Muskelgruppen kontrahieren oder erschlaffen.

Vielmehr kontrollieren die für das motorische Programm zuständigen Neuronen im Gehirn auch sensorische Rückmeldungen der afferenten Systeme. Grundlage eines motorischen Programms ist dabei die interneuronale Verschaltung untergeordneter motorischer Zentren im Gehirn: Sie melden die Entwicklung der tatsächlichen Bewegung in Dauer und Intensität anhand von Informationen der peripheren afferenten Sensoren und Nerven an

---

[11] Mäki-Patola 2005, S. 3.
[12] Kornhuber 1965, S. 1.
[13] Keele 1968, S. 387.
[14] Krampe 1994, S. 63.

die höhere kognitive Ebene. Dieser Vorgang wird als Rückkopplung oder Reafferenz bezeichnet[15].

In der höheren kognitiven Ebene wird die tatsächliche Bewegung dann projiziert (Afferenzkopie) und mit der Efferenzkopie – dem sensorischen Abbild der ursprünglichen Befehle im motorischen Programm – verglichen. Derart werden Erfolg oder Misserfolg der vom Programm geplanten und aktuell ausgeführten Handlung bewertet. Indes gehen nicht alle Bewegungen auf komplexe Motorbefehle zurück: Wurf- oder Kreisbewegungen können durch einzelne Motorbefehle ausgelöst werden. Jedoch resultieren die meisten Bewegungsabläufe beim Menschen aus Ketten von motorischen Befehlen[16]. Propriozeptive Sinneseindrücke[17] des Bewegungsapparates und sensorische Informationen anderer Sinne bilden dabei die Grundlage für eine effektive Kontrolle der Bewegung durch das Zentrale Nervensystem. Verlauf und Ergebnis der Bewegung können aktuell verändert oder künftige Wiederholungen angepasst werden.

„Die für geübtes Klavierspiel erforderlichen Motorprogramme zeichnen sich durch einen besonders hohen Grad an Komplexität, Volitionalität[18] und Modifizierbarkeit aus. Üben, also das motorische Training am Musikinstrument, ist im wesentlichen das Training neuer Motorprogramme[19].“ Interessant erscheint für diese Studie der Zusammenhang von Modifizierbarkeit und dem Entstehen komplexer motorischer Programme. Denn im Grunde bedeutet der Aufbau eines solchen Programms die Reduktion von Modifizierung: Je perfekter ein motorisches Programm abläuft, umso weniger Anlass findet sich zur Korrektur. In Bezug auf die zentrale Frage dieser Studie heißt das zugleich, die Grenzen zwischen einer Willkürmotorik und motorischen Programmen zu ergründen: Schließen beide einander kategorisch aus? Oder existieren zeitliche Übergänge etwa in Propriozeption, Sensorik und Gehör, bei denen Willkürmotorik und Programme ineinander greifen müssen?

1.2.1.1. Sensorische Rückmeldungen als integraler Bestandteil der Bewegung

Das Bewegungsprogramm steuert allerdings nicht nur die Effektorsysteme an und vergleicht die Rückkopplung der efferenten Systeme mit dem motorischen Programm.

---

[15] Schmidt 2000, S. 113.
[16] Bangert 2001, S. 20.
[17] „Unter Propriozeption fasst man Sinneseindrücke zusammen, die durch Reizung von Muskeln, Sehnen- und Gelenkmechanozeptoren zustande kommen. Diese Sinnesmodalität dient dem Kraftsinn und der Wahrnehmung von Stellung (Positionssinn) und Bewegungen (Kinästhesie) einzelner Teile unseres Körpers.“ Schmidt 2000, S. 239.
[18] Handlungsplanung: willkürliche (bewusste, gewollte) Handlung, im Gegensatz zur Motilität, die die Bewegungsfähigkeit oder Beweglichkeit bezeichnet.
[19] Bangert 2001, S. 20.

Vielmehr greift das Zentrale Nervensystem schon vor Beginn der Bewegung korrigierend in den Aufbau der Steuersignale ein, es reguliert zudem die Übertragung der Reafferenz und optimiert aktuelle Bewegungen: „Sinneskanäle, die den Bewegungsverlauf messen und nach zentral übertragen, werden auf maximale Empfindlichkeit eingestellt.[20]“ Unbeteiligte Kanäle hingegen werden in ihrer Empfindlichkeit reduziert.

Die Reafferenz stellt im Rahmen dieser Studie eine der kognitionsphysiologisch entscheidenden Größen dar: Immer dann, wenn Motorplan und tatsächliche Bewegung in einem ausreichenden Missverhältnis zueinander stehen, entscheidet die Güte der Reafferenz und die Präzision ihrer Auswertung – verbunden mit neuen, korrigierenden Steuerbefehlen – über die Erfüllung des ursprünglichen Handlungsantriebes: Zur Geltung kommt die Reafferenz etwa beim Schreiben auf einem rutschenden Papier oder beim Klauben einer bestimmten Münze aus dem Portemonnaie. Kurze, rasante Handlungen hingegen unterstehen nicht dem Diktat der Rückkopplung (Speerwerfen, Vollbremsung im Straßenverkehr).

Allerdings wurden auch diese Bewegungen erlernt und bedurften dabei einer Erfolgskontrolle. Insbesondere ballistische Bewegungen wie in den Wurfdisziplinen der Leichtathletik sind Resultate langer Lernprozesse. Zwar merkt der Athlet bei unsauberer Ausführung eine – oder die bestimmte – Unstimmigkeit. Eine Korrektur der Bewegung ist ihm grund der Kürze und Geschwindigkeit aber kaum möglich. Korrekturen können erst bei einem weiteren Versuch erfolgen. Hingegen eignen sich etwa rhythmisch wiederkehrende Bewegungsabläufe wie beim Hürdensprint zur Korrektur auf Basis des soeben gemachten Fehlers. Das Gehör aber spielt als auditive Sinnesmodalität in diesem Umfeld keine Rolle[21]. Lediglich die Propriozeption und Sensorik sind beteiligt.

1.2.2. Kortikale Schnittstellen zwischen Motorik und Gehör

Neuere Befunde aus neuropsychologischen und neurophysiologischen Untersuchungen deuten auf eine gemeinsame neuronale Repräsentation von Wahrnehmung und Handlungssteuerung bei komplexen motorischen Verhaltensleistungen hin. Bangert konnte 2001 die so genannte auditiv-sensomotorische Integration nachweisen. Die

[20] Schmidt 2000, S. 113.

[21] Auswirkungen durch kürzliche Gehörschädigung auf den Gleichgewichtssinn seien hier ausgenommen. Die fünf wichtigsten Endorgane für den Raumorientierungs- und Bewegungssinn des Menschen liegen im Labyrinth des Innenohrs. Dabei stehen Endolymphe und Perilymphe des Vestibulärapparates (Gleichgewichtsorgan) mit den entsprechenden Lymphsystemen der Gehörschnecke (Cochlea) in Verbindung.

experimentelle Studie[22] zeigte am Beispiel des Klavierspiels, wie multisensorische Neurone in EEG-Messungen auf Reizung unterschiedlicher Sinnesmodalitäten reagierten. So waren kortikale Bereiche im rechten präfrontalen Kortex sowohl bei motorischer Aktivität (Klavierspiel) als auch bei akustischer Präsentation des zugehörigen Notenmaterials gleichermaßen aktiv.

Die Langzeitstudie untersuchte die veränderliche Koaktivierung im Lauf des Lernprozesses (Klavierspiel). Bereits im frühen Lernstadium zeigten Probanden eine Verknüpfung von wahrnehmungs- und handlungsspezifischen neuronalen Subsystemen. Bangert schlussfolgert, dass diese Vernetzung nicht allein Ergebnis, sondern auch Voraussetzung für das Musizieren ist: „Bei professionellen Pianisten zeigt sich eine so starke Verzahnung von Hörarealen und Motorkortex, dass schon die Reizung nur einer der beiden Strukturen ausreicht, um die jeweils andere automatisch mitzuaktivieren. Die an der Integration beteiligten Areale erstrecken sich dabei über sensorische, motorische und assoziative Hirnrindengebiete[23]."

Zudem konnte das Phänomen des Missing stimulus (Klinke u.a. 1968) ein weiteres Mal experimentell bestätigt werden: Messungen der Hirnströme wiesen Aktivierungen im auditorischen Kortex[24] des Gehirns nach, obgleich Manipulationen im Versuchsaufbau das Erklingen der gespielten Note verhinderten. Grund des fehlenden akustischen Signals konnte im Innenohr kein mechanischer Reiz weitergeleitet werden, noch in elektrische Signale umgewandelt werden (Transduktion). Die Aktivierung im Schläfenlappen war dennoch vorhanden und sie entsprach in ihrer Größenordnung, ihrer Verlaufsform und Lokalisation eben jener, die zuvor beim Klang einer Klaviernote entstanden war. Auch gaben die Versuchsteilnehmer an, den Klang der Note deutlich vernommen zu haben.

Damit war nachgewiesen, dass kognitive Repräsentationen (Speicherungen) für akustische Phänomene existieren und diese Speicherungen – dies erscheint im Rahmen der hiesigen Konzeption wichtig – in einem bestimmten zeitlichen Rahmen auch ohne akustische Rückkopplung aktiviert werden können. Das Phänomen des Missing stimulus ist in dem kortikalen Feld zu beobachten, wo multisensorische Neurone die Schnittstelle

---

[22] Bangert 2001, S. 132. Durch eine Unterdrückungssoftware wurden bei einem E-Piano die Tonhöhen der Tasten verändert oder ausgeblendet. Bei Ausbleiben physikalischer Reize (fehlende Zwischenachtel) konnten dennoch adäquate auditive Ereignisse nachgewiesen werden. Bangert deutet das Auftreten einer N1-Aktivität (Verarbeitungsnegativität, siehe Kapitel 4.2.1.) im DC-EEG trotz fehlenden Reizes als Zeichen für einen Internen Taktgeber (Innere Uhr). Die Beurteilung geht so weit, dass in manchen EEG-Kanälen bei den Pianisten regelrechte 1/16-Pulsationen beschrieben werden, obgleich die entsprechend gedrückte Klaviertaste keinen Ton erzeugte. Erstmals beobachtet wurde dieses Phänomen der ereigniskorrelierten Antwort auf das Fehlen eines erwarteten Ereignisses bei Klinke et al. 1968.

[23] Bangert 2001, S. 156.

[24] Schmidt 2000, S. 334: Hirnareal im Gyrus temporalis transversus im Temporallappen (Lobus temporalis), dem die Verarbeitung und Analyse der Transmitterfreisetzung aus den inneren Haarzellen und somit die Auswertung

zwischen Sensomotorik und Gehör bilden. Es entsteht die Frage, ob jene multisensorischen Neurone im Gyrus temporalis transversus bei hoch geschulten Musikern die Kopplungspunkte darstellen, an denen Latenzzeiten bei der Verarbeitung von unvorhergesehenen auditiven Informationen entstehen können.

1.3. Grenzen von Gehör und Motorik

1.3.1. Auditive Diskrimination

Dem Hörsinn des Menschen sind Grenzen gegeben, die über Komplexität und Intensität der Signale variieren. Klicksignale[25] sind aus Sicht der Kognitionspsychologie geeignete Testgrößen, um etwa die kognitive Verarbeitung von Rhythmus und Metrum zu ergründen. In Verbindung mit Bildgebungsverfahren – wie der funktionellen Magnetresonanz-tomographie (fMRI) oder EEG- und MEG-Verfahren – lassen sich kortikale Prozesse beim Hören lokalisieren und in ihrer Intensität sichtbar machen[26].

Auch eignen sich Klicks zur Bestimmung physiologischer Hörschwellen: Versuchspersonen schätzen die Dauer von Klicks in absoluten Zahlen oder im Verhältnis größer/kleiner. Auch die geringste Diskriminationsleistung der Zuordnung gleich/ungleich wurde in Klickversuchen vielfach getestet. Bruhn (2000) beschreibt eine Abweichung von ein bis zwei Millisekunden für Klicksignale, die dem Menschen ausreichten, um die Reize in ihrer Länge unterscheiden zu können[27]. Ein sicheres Urteil über die Reihenfolge ihrer Längen ist hingegen erst mit 25ms Differenz möglich[28]. Snyder (2001) nennt diese Schwelle den Moment, in dem Ereignisse subjektiv verschmelzen und siedelt den Prozess in einem frühen Stadium der kognitiven Verarbeitung – im Bereich des sensorischen Gedächtnisses – an[29].

---

gehörphysiologischer Informationen zugeschrieben wird. Der Temporallappen (Schläfenlappen) ist einer der vier Hirnlappen der Großhirn-Hemisphäre.

[25] Einfrequente, elektrisch erzeugte Schall-Schwingungen kurzer Dauer und regulärer Abfolge.

[26] Neben der klassischen Läsionsstudie – der Untersuchung von ausbleibenden Fähigkeiten aufgrund der Beschädigung bestimmter Hirnareale – ist die funktionelle Bildgebung aktiver Nervenzellareale, zum Beispiel während der Verarbeitung bestimmter Zeitstrukturen, als Untersuchungsmöglichkeit hinzugetreten. In der funktionellen Bildgebung geschieht dies mittels elektrophysiologischer Messmethoden wie dem EEG (Elektroenzephalographie), dem MEG (Magnet-Elektroenzephalographie) oder der Gleichspannungs-Elektroenzephalographie (DC-EEG). Grundlage sind exzitatorische (den Organismus erregende) postsynaptisch oberflächennegative Potenzialfelder im Bereich der apikalen Dendritenbäume des Kortex. Sie entstehen durch gruppierte afferente (über die Nervenfaser von der Peripherie – den Sinnesorganen – hin zum Zentralnervensystem führende) Informationen, die eine bestimmte Kortexregion erreichen und diese aktivieren.

[27] Bruhn 2000, S. 45.

[28] Snyder 2001, S. 25.

[29] Ebda.

Das Bestimmen einer absoluten Dauer von Klicks gelingt bei zirka 120ms Signallänge[30]. Dies konnten Nakajima und Mitarbeiter 1991 ermitteln. Dabei war entscheidend, in welcher Länge und Abfolge Signale dargeboten wurden. Die Forscher präsentierten Folgen von Klicks zwischen 45 und 120ms Dauer. Der längere wurde unterschätzt, insofern er nachfolgte. Nakajima et al. nannten diesen Effekt Time shrinking. Er wurde als Resultat einer zeitlichen Erwartungshaltung auf Isochronie interpretiert. Zudem musste der längere Klick die Schwelle von 120ms erreichen, bis er korrekt eingeschätzt wurde.

Diese Versuche beschränkten sich auf rein perzeptive Aufgaben. Ihre und weitere Ergebnisse aus Klick-Versuchen können nur bedingt auf das Instrumentalspiel übertragen werden. Ein wesentlicher Grund ist der komplexere Aufbau des Schallsignals bei mechanoakustischen Instrumenten. Denn Klicks werden meist mit extremer Flankensteilheit eingesetzt. Mithin vergeht bei Instrumenten mehr Zeit, bis ihr charakteristisches Klangbild aufgebaut ist. Zudem werden Klicks überwiegend als Marker eingesetzt. Mit besonders kurzer Signallänge bilden sie Beginn und Ende eines leeren Intervalls, nicht eines akustischen Ereignisses. Oft kommen isochrone Sinustöne mit geringen Obertonspektren zum Einsatz[31], die in der Natur nicht existieren. Ist in der musikpsychologischen Literatur somit von Zeitschwellen menschlicher Hörfähigkeit die Rede, muss beachtet werden, welche Form akustischer Signale dargeboten wurde und welche Aussage in Bezug auf das akustische Spektrum im natürlichen Umfeld getroffen werden kann.

Für die Wahrnehmung von Klängen setzt die Literatur höhere Schwellenwerte an. Michon (1985) beschreibt eine Schwelle von 500ms Dauer bei Klängen als Grenze für ihre korrekte Zeitschätzung[32]. Für die Unterscheidung per Negation (gleich/ungleich) wurden Werte zwischen 30ms und 50ms beobachtet[33]. Die Einsätze von Bläsertönen erkennen wir um bis zu 20ms schneller als bei Saiteninstrumenten[34]. Denn ihr Klangcharakteristikum baut sich entsprechend schneller auf. Das Urteil von Probanden in den zugehörigen Studien bezieht sich dabei auf den Vergleich innerhalb einer Sinnesmodalität, nämlich den Gehörsinn.

[30] Nakajima 1991, S. 444.
[31] Desgleichen Rechteckimpulse.
[32] Michon 1985, S. 40.
[33] Pöppel 1996, S. 170.
[34] Bruhn 2000, S. 44.

1.3.2. Mechanozeptische Diskrimination

Eine Untersuchung von Rasch im Jahr 1988 ermittelte Schwankungen von rund 30 sowie 50ms bei den Einsatzzeiten der Instrumente in Bläser- und Streichertrios[35]. Die Werte entsprechen der Dauer, bis zu der sich das Klangcharakteristikum des jeweiligen Instrumentes vollständig aufgebaut hat. Zwei Schlussfolgerungen können daraus gezogen werden: Die Akustik der Instrumente ist als Resultat des Instrumentenbaus an der Güte unseres Gehörs orientiert. Gleichermaßen ist die mechanozeptische Diskrimination in der von Rasch untersuchten Umgebung nicht präziser als die zeitliche Hörschwelle.

Indes bezogen sich die Untersuchungen von Rasch auf das Spiel im Ensemble. Im Gegensatz zum Solovortrag ist den Instrumentalisten dort der so genannte intramodale Vergleich[36] möglich: Die Instrumentalisten müssen innerhalb der auditiven Sinnesmodalität auch akustische Informationen benachbarter Instrumente auswerten, um die eigene Motorik zu steuern. Neuere Studien von Keller et al. (2007) deuten an, dass die Vorstellung über den Einsatz im Ensemble bei Instrumentalisten stärker als bislang angenommen vom eigenen Spiel beeinflusst wird. So zeigten Klavierspieler eine präzisere Synchronisation zu Aufnahmen des eigenen als zum Spiel anderer Pianisten. Auch erkannten sie den eigenen Vortrag eher als fremde Mitschnitte. Dabei synchronisierten jene Teilnehmer der Studie die eigene Aufnahme am besten, die diese am sichersten identifizieren konnten[37].

Der Befund von Keller lässt annehmen, dass hoch geschulte Instrumentalisten mentale Repräsentationen des eigenen Spiels besitzen, die weit über einzelne Noten hinausgehen. Indes ist nicht klar, wann und wie der Abgleich zwischen fremder und eigener Akustik und der eigenen Erwartung (aufgrund mentaler Repräsentation) über diese externen Reize stattfindet. Für ein sinnvolles Experiment zur Untersuchung etwaiger Schwellenwerte der Kopplung von Gehör, Motorik und einer möglichen mentalen Repräsentation (oder motorischem Programm) im Duett (Trio, Orchesterverband) wären wohl weitere Untersuchungen wie die von Keller und Rasch nötig, um die Einflüsse fremden Spiels auf das Verhalten der Probanden zu prüfen.

Die hiesige Studie beschränkt die Frage deshalb auf den intermodalen Vergleich zwischen den Sinnen. Gefragt wird, um welche Dauer (Schwellenwert) die beim Instrumentalspiel resultierende Akustik von der ursächlichen Motorik zusätzlich verzögert (Entkopplung) werden muss – wie stark also die sensomotorische Integration nach Bangert strapaziert –

[35] Rasch 1988, S. 78. Der Mittelwert betrug 36ms.
[36] Aschersleben 2000, S. 150f.

werden muss, bis eine auffällige motorische Reaktion folgt. Auch sucht diese Studie zur Beantwortung der Fragen 1 bis 1b nach einer etwaig zweiten Dauer, ab der die verzögerte akustische Rückmeldung die Folgemotorik nicht weiter stört, das fortgeführte Tempo sich also nicht signifikant von dem Tempo vor der Entkopplung (Störstelle) unterscheidet.

1.3.3. Größe verwendeter Entkopplungen

Aus Erkenntnissen der Tapping-Forschung (Vos 1992, Prinz 1997, Aschersleben 2000a, Fischer 2004) lässt sich die Größenordnung des zu ermittelnden neurophysiologischen Schwellenwertes für eine Kopplung von Gehör und Motorik bereits grob auf einen Bereich von 20 bis 120ms Zeitunterschied zwischen Reiz und Reaktion – oder einer Handlungsplanung samt Wahrnehmung ihrer erfolgreichen Ausführung – eingrenzen. Beim Spiel eines mechanoakustischen Klaviers liegt die Differenz zwischen Tastendruck und Toneinsatz – abhängig von der Anschlagstärke – zwischen 30 und 100ms[38]. Dies stellt die selbstverständliche Spanne zwischen motorischer Ursache und akustischer Wirkung dar, in der Pianistinnen und Pianisten ihre Erwartungshaltung als erfüllt ansehen. Hingegen nehmen die Spieler zusätzliche Entkopplungen von 60ms am Klavier bewusst als Manipulation wahr[39]. Die kleinste Störstelle dieser Studie muss deshalb zur Sicherheit einen geringeren Wert besitzen und wird auf 50ms festgesetzt. Für die längste Verzögerung bietet sich ein Wert von 120ms an. Denn in Versuchen zur so genannten Negativen Asynchronie erkannten Probanden bei Aschersleben (2000a) eine verzögerte akustische Rückmeldung auf eine ursächliche motorische Handlung nicht, wenn diese unter 100ms lag[40]. Die längste Störstelle im hiesigen Experiment ist aus Sorgfalt deshalb mit 120ms um 20ms größer. Die von Aschersleben genannte Schwelle von 100ms ist sinnvoll auch selbst als Störgröße einzusetzen.

In einem Tapping-Versuch mit Führungssignal konnte Müller (2000b) in bildgebenden Verfahren beobachten, dass rund 80ms nach dem motorisch zu synchronisierenden akustischen Signal eine Region im primären somatosensorischen Kortex der Probanden aktiv wurde[41]. Dieser Region wird unter anderem die Funktion zugeschrieben, Signale verschiedener Sinne miteinander zu vergleichen[42]. Zudem war eine Negative Asynchronie

---

[37] Keller 2007, S. 102.
[38] Mäki-Patola 2005, S. 3.
[39] Ebda.
[40] Aschersleben 2000a, S. 145.
[41] Müller 2000b, S. 302.
[42] Schmidt 2000, S. 251.

zu beobachten: Die Probanden eilten dem akustischen Signal motorisch um zirka 80ms voraus und empfanden dies dennoch als zeitgleich. Für die meisten Probanden beschreibt Aschersleben den gleichen Wert als Obergrenze Negativer Asynchronien[43]. Wurde bei Müller das Führungssignal taktil gegeben, verschwand die Asynchronie vollständig[44].
Zudem wanderte die kognitive Aktivierung in den posterior-parietalen Assoziationskortex, der an der Entwicklung von Bewegungsabläufen beteiligt ist[45]. Müller schließt daraus, dass diese Regionen im Gehirn vermittelnde Funktionen übernehmen[46], etwa zur Auswertung der Bewegung. Demnach könnte es sein, dass zwischen ursächlich auditiv-motorisch gekoppelten Ereignissen – wie dem Klavierspiel – generell eine Zeit von mindestens 80ms vergehen muss, ehe die zeitliche oder gar ursächliche Kopplung in Frage gestellt werden kann. Deshalb wird auch dieser Wert als Störgröße eingesetzt und mit ihm die Annahme verbunden, er stelle einen Schwellenwert dar, ab dem auditiv-sensomotorisches Handeln anders organisiert wird (Hypothese B, siehe unten).

1.4. Hypothesen

Auf Grundlage vergleichbarer Versuchsanlagen (Finney 1997, Bangert 2001) sind kurzfristige Abweichungen im lokalen Tempo beim Klavierspiel des jeweiligen Probanden zu vermuten[47], wenn einzelne Tasten der Klaviatur zeitlich verzögert (entkoppelt) werden. Zeitliche Entkopplung meint im Rahmen dieser Studie dabei ausschließlich eine durch äußere Einwirkung (Manipulation) erwirkte, gegenüber der bautechnisch typischen Anschlagverzögerung mechanoakustischer Klaviere zusätzliche Verzögerung des Toneinsatzes. Sofern mechanoakustische Klaviere nach Mäki-Patola (2005) ohnehin je nach Anschlagstärke einen um 30 bis 100ms verzögerten Toneinsatz aufweisen, führt eine Entkopplung von 50ms im Rahmen dieser Studie mithin zu einer Gesamtverzögerung von 80 bis 150ms.
Abweichungen im lokalen Tempo infolge eines zusätzlich verzögerten Tones (Störstelle) könnten dabei von der Größe dieser zusätzlichen Verzögerung abhängig sein. Jede der fünf denkbaren Reaktionen der Probanden nach einer Störstelle wird dabei als Folgemotorik definiert: Die Pianisten schlagen die Folgezählzeit genau im ursprünglichen Tempo an, zu früh (Temposteigerung), zu spät (Tempoverlangsamung) oder sie drücken

[43] Aschersleben 2000a, S. 139.
[44] Müller 2000b, S. 306.
[45] Schmidt 2000, S. 119.
[46] Müller 2000b, S. 307.

eine falsche (Tonhöhenfehler) oder keine Taste. Unterscheiden sich Temposteigerung- oder verringerung auf signifikante Art von der vorausgehenden Tempogestaltung, ist dies in dieser Studie als Tempofehler definiert.
Beobachtet werden insbesondere die drei auf die Störstelle folgenden Zählzeiten. Sofern die Probanden ab der Störstelle eine signifikante lokale Tempoabweichung zeigen und diese bis zum Ende der dritten Folgezählzeit in Betrag und Richtung auf statistisch nicht zufällige Weise auszugleichen versuchen, gilt dies im Rahmen dieses Versuchs als Korrekturverhalten.

> Ab einer Entkopplungsdauer (Störstelle) von 50 bis 80ms weisen die Pianisten eine verzögerte Folgemotorik beim nächsten Tastenanschlag auf: Jedoch wird ihnen dieses nicht bewusst. Die Probanden empfinden Handlung und resultierende Perzeption im Einklang. Es kommt weder zu einer dauerhaften Tempoveränderung, noch zu einem kurzfristigen Korrekturverhalten. Lediglich der feste Grundschlag verschiebt sich auf der Zeitleiste nach hinten.
>
> **Hypothese A**

Des Weiteren ist interessant, ob sich auch in der zweiten oder gar dritten Zählzeit nach der Manipulation noch Effekte zeigen. So bestünde die Möglichkeit, dass die Probanden in Zählzeit zwei oder drei nach einer Störstelle zu einem Ausgleichsverhalten neigen, insofern ihnen ihr Tempofehler bewusst wurde:

> Oberhalb von 80ms Manipulationsgröße zeigt sich ein anderes Verhalten. Wiederum wirkt die Verzögerung zunächst irritierend und die Teilnehmer schlagen die direkte Folgezählzeit zeitverzögert an. Die darauf folgenden Zählzeiten werden jedoch so lange in kürzeren Zeitintervallen gespielt (kurzfristig gesteigertes Tempo), bis die Tastenanschläge wieder auf den Grundschlag fallen, der dem Tempo vor der Störstelle innewohnte.
>
> **Hypothese B**

Die Hypothesen A und B sowie eine noch zu formulierende Hypothese C gelten im Sinn der schließenden (induktiven[48]) Statistik als Alternativhypothesen. Zu ihnen wird im statistischen Verfahren eine jeweilige Nullhypothese aufgestellt, die mit Methoden der schließenden Statistik zu testen ist. Sie besagt jeweils das Gegenteil der Alternativhypothesen. In dieser Studie bedeutete dies, dass die Verteilungen der

[47] Vergleiche dazu auch Pfordresher 2003, S. 954.

Messergebnisse – zum Beispiel beim Spiel mit verzögerten Tönen gegen unbeeinflusste Spielsituationen – nicht oder nur zufällig voneinander abwichen, die Störstellen also keinen der Einflüsse A bis C auf das Spiel der Probanden ausübten.

1.4.1. Kognitionsmodelle über die Steuerung musikalisch motorischer Prozesse

Sollten die Messergebnisse die Hypothese B bestätigen, läge in einer Entkopplungsgröße von 80ms zwischen Gehör und Sensomotorik im Sinne der Frage 1b ein neurophysiologischer Schwellenwert vor. Er stellt die Grenze der Erwartungshaltung dar, bis zu der sich das Resultat Klangbestätigung ereignen muss. Tritt dieser Fall nicht ein, sieht der Proband sich zu einer bewussten Korrektur veranlasst, bis er in den Grundschlag zurückkehren kann.
Allerdings wird hieraus nicht ersichtlich, ob den Pianisten dies – übertragen auf die Grundsatzdebatte der Forschung zur musikalischen Psychomotorik – mittels einer auditiven Rückkopplungsschleife samt erinnertem Referenzintervall oder anhand eines motorischen Programms mit Innerem Taktgeber gelingt. Insbesondere die Rückkehr in das Grundschlagschema ließe fragen, woher beide denkbaren Kontrollmechanismen ihre zeitlichen Informationen beziehen:

> Die Perzeption von auditiven Zeitintervallen steht beim Instrumentalspiel in einem stetigen Abgleich mit kognitiven Repräsentationen vorangegangener Zeitdauern (Rückkopplungsschleife in Verbindung mit einem vom Arbeitsgedächtnis erinnerten Referenzintervall).

Kognitionsmodell A

Wird diese auditiv-sensomotorische Rückkopplungsschleife um eine Zeitdauer oberhalb des neurophysiologischen Schwellenwertes unterbrochen, so wird eine motorische Korrektur veranlasst. Die Probanden bemessen anhand des Referenzintervalls (einer im Gedächtnis erinnerten Zeitdauer) die auditive Manipulationsgröße und ihren daraus zunächst resultierenden motorischen Folgefehler. Darauf verkürzen sie den Zeitraum bis zur folgenden Handlung entsprechend, um in das Grundschlagschema zurückkehren zu können und das ursprüngliche Tempo erneut aufzunehmen.

---

[48] mathematischen oder beurteilenden.

Die Versuchspersonen beziehen ihre Informationen über Zeitdauern aus einer rein kognitiv-sensomotorischen Ebene (Theorie der Inneren Uhr in Verbindung mit einem motorischen Programm) oder sie verlagern im Moment der fehlerhaften auditiven Rückmeldung ihre Aufmerksamkeit auf jene Ebene – sie schalten ihr Gehör quasi aus.

Kognitionsmodell B

Die Vermutung, die Probanden schalteten ihr Gehör quasi aus, klingt zunächst plausibel. Ein hoch geschultes motorisches Programm erzeugte so nach einem ersten Fehler in Folge der Störstelle korrektive, neuronale Impulse im motorischen Kortex des Gehirns, bis einer der daraus folgenden Tastenanschläge mit den Pulsationen (Grundschlag) der Inneren Uhr wieder übereinstimmt[49]. Das Gehör würde praktisch überflüssig. Lediglich ein Abgleich zwischen Tastsinn und Innerer Uhr fände statt.

1.4.2. Erweiterung der Fragestellung

Sollten die Versuchsdaten Hypothese B bestätigen, wäre ein motorisches Programm qualitativ abhängig von auditiver Wahrnehmung. Oberhalb von 80ms bedeutete die auditive Rückmeldung dann zumindest eine qualitative Information für das motorische Programm, sich neu auszurichten. Indes ist damit nicht gesagt, dass sich das motorische Programm des Hörsinns auch als Informations-Quelle für die Größe der vorzunehmenden Korrektur bedient.

Frage 2) Dient eine Auditive Rückkopplungsschleife dem motorischen Programm lediglich zur qualitativen, nicht aber quantitativen Fehlerdetektion?

Um dennoch eine Aussage über die Ursächlichkeit und den Maßstab für ein Korrekturverhalten treffen zu können, muss das auditiv-sensomotorische Bindeglied Erwartungshaltung hier nicht nur gelockert (Frage 1 bis 1b), sondern völlig entfernt werden. Die Versuchssituation wird dazu in ausgewählten Durchläufen um eine künstliche Situation fehlender auditiver Rückmeldung ergänzt: Im Nachfeld bestimmter Störstellen wird die Klangerzeugung ausgewählter Noten ausgesetzt.

[49] Im Rahmen dieses Versuchsansatzes ist allerdings keine Überprüfung kognitiver Prozesse bei den Probanden mittels bildgebender Verfahren (MEG etc.) vorgesehen.

Oberhalb von 80ms Manipulationsgröße benötigt ein motorisches Programm keine auditive Rückmeldung über die folgende motorische Korrektur.

Hypothese C

Durch diese künstliche Situation fehlender auditiver Rückmeldung ist die viel geäußerte Situation des quasi ausgeschalteten Gehörs künstlich erzeugt. Sollten die Probanden dennoch in den Grundschlag im Sinne von Hypothese C zurückkehren, wäre das Kognitionsmodell A einer Rückkopplungsschleife samt Referenzintervall als allein vorherrschender Mechanismus zu verwerfen. Denn bliebe der Klang der Folgenoten aus, könnten die Probanden nicht auditiv über die Richtigkeit ihrer motorischen Korrektur entscheiden. Ihnen wäre eine Rückkehr in den Grundschlag nur zufällig möglich. Kehren die Teilnehmerinnen und Teilnehmer indes in den Grundschlag zurück, wäre das Kognitionsmodell B bestätigt.

2. Versuchsaufbau und Methoden

2.1. Grundlagen

Den Probanden soll ein musikalisch praktisches Umfeld im Test geboten werden. Entgegen Versuchen mit idealisierten Klicksignalen (extreme Flankensteilheit) und den dabei reduzierten motorischen Aufgaben erwägt der hiesige Versuch ein Verfahren mit einer Messapparatur, die das motorische Verhalten von Pianisten direkt beim Solovortrag am Instrument verlässlich dokumentieren kann. Die Probanden sollen eine einfache Notenvorlage unter der Maßgabe präziser Tempogestaltung auf dem Klavier spielen. Bei wenigen ausgewählten Noten werden die Probanden dabei durch Entkopplung von motorischer Ursache und akustischem Resultat irritiert: Dadurch wird die endogene Kopplung auditiver und sensomotorischer Perzeption der Teilnehmer zum zentralen Beobachtungsgegenstand. Auswirkungen auf die Folgemotorik sollen in ihrer Aussagefähigkeit für die zugehörige kognitive Handlungsplanung bewertet werden.

2.2. Versuchsaufbau

2.2.1. Versuchspersonen

Teilnehmer waren Studierende des Hauptfachs Klavier am Institut für Musikpädagogik sowie der Musikwissenschaft der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und der Evangelischen Hochschule für Kirchenmusik Halle. Die Händigkeit der Probanden wurde über einen einfachen Test nach Oldfield (1971)[50] ermittelt. Zu zehn Kriterien gaben die Teilnehmer an, welche Hand sie im Alltag für motorische Handlungen eindeutig bevorzugten: etwa, mit welcher Hand sie schrieben, zeichneten oder ein Streichholz entzündeten. Gaben die Probanden bei höchstens einem der zehn Kriterien an, sie führten die Handlung mit links aus, wurden sie als Rechtshänder eingestuft. Teilnehmer mit mehr als einer aber nicht neun Präferenzen der Linken wurden als Beidhänder identifiziert.
Weiterhin erhielten die Teilnehmer im Vorfeld einen Fragebogen über persönliche Daten auch im Hinblick auf ihre musikalische Vorbildung[51]. Dort gaben sie eine Selbsteinschätzung ihrer Fähigkeiten im Klavierspiel ab. Die Skala reichte dabei von 1 (sehr gut) bis 5 (weniger gut) in sechs Kategorien. Der Fragebogen diente einerseits der Zusammenstellung einer homogenen Prüfgruppe. Zum anderen konnte er bei Auswertung der Messergebnisse zur Interpretation stark abweichenden Einzelverhaltens herangezogen werden.

2.2.2. Versuchsablauf

Alle Probanden erhielten das Notenmaterial vier Wochen vor dem Versuch, sodass sie sich mit dem Stück vertraut machen konnten. Genauere Hinweise zum Experiment, etwa über die Verwendung von Störstellen, wurden den Studierenden bis zum Versuch nicht erteilt. Um vergleichen zu können, ob Vorwissen die Handlung im Versuch beeinflusst, wurden per Münzwurf Probanden bestimmt und vor Beginn ihres Spiels über die Existenz von Störstellen, deren Verteilung auf beide Hände, die Größe der Entkopplungen, deren Wechsel sowie über Unterdrückungen gegen Ende des Versuchs und unmanipulierte Durchläufe informiert.

---

[50] Siehe Kapitel 6.3.
[51] Siehe Kapitel 6.4.

Vor Beginn des Versuchs wurden die Teilnehmer gebeten, ein für sie einfaches Tempo zu wählen. In einer kurzen Einspielphase konnten sie es bestimmen und sich mit dem Instrument vertraut machen. Zu diesem Zeitpunkt war die Klaviatur unbeeinflusst. Als weitere Vorgabe sollte das eingeschlagene Tempo auch während der weiteren Durchläufe beibehalten werden. Der Versuch dauerte maximal 20 Minuten je Teilnehmer. Kein Proband brach den Versuch ab.

2.2.3. Notenmaterial

Weil der Versuch die Pianisten zugleich als Akteur und Rezipient im akustisch-musikalischen Umfeld beobachtet, müssen einige Faktoren bei der Bestimmung des melodischen Materials berücksichtigt werden. Grundsätzlich ist eine Reduzierung komplexer Phänomene, wie ein Zusammenwirken verschiedener musikalischer Parameter, angebracht[52]. Bei der Auswahl des geeigneten Notenmaterials sind neben der Rücksichtnahme auf das spielerische Vermögen der Probanden, neben den zuvor beschriebenen physiologischen Erkenntnissen auch Phänomene aus musikpsychologischen Studien zu bedenken. Denn der statistisch maßgebliche Parameter der Studie ist die Konstanz der Tempos. Grundsätzlich muss dabei zwischen einem subjektiven (psychologischen) und einem physikalischen Tempobegriff unterschieden werden:

Nach Crowder und Neath (1994) tritt der so genannte Kappa-Effekt[53] – bei dem der zeitliche Abstand taktiler Reize der Haut abhängig von der Entfernung der gereizten Orte geschätzt wird – auch im auditiven Bereich auf[54]. In unserem Ohr werden Reize vor der elektrochemischen Transduktion rein mechanisch übertragen. Die Frequenzzerlegung führt nach von Békésy (1960) zu ortsverschiedenen taktilen Reizungen durch unterschiedlich hohe Töne[55]. Entsprechend ist die Entfernung der in der Cochlea gereizten Punkte proportional zur Größe des Tonhöhenintervalls. Beim auditiven Kappa-Effekt führen größere Tonhöhenabstände zwischen den Signalen zu subjektiv länger

---

[52] Auhagen 2000, S. 421f.

[53] „Beim Kappa-Effekt handelt es sich um eine Wahrnehmungstäuschung, bei der Zeitschätzungen vom räumlichen Kontext der Reizanordnung beeinflußt werden." Aschersleben 2000b, S. 164.

[54] Crowder 1994, S. 380.

[55] Die im beweglichsten Streifen der cochlearen Trennwand liegenden Nerven übermitteln die örtlichen Maxima der Wanderwellen am genauesten, da diese in diesem Bereich bis zu 200ms anhalten, bis sie durch Dämpfung gelöscht werden. von Békésy 1960, S. 322.

empfundener Zeit[56]. Bei der Wahl der Notenvorlage muss also berücksichtigt werden, dass große Intervalle selbst schon zeitliche Einflüsse liefern können.

Untersuchungen von Barry (1990) belegen den Einfluss der Notendichte auf das subjektive Zeitempfinden. Dies sei von der Geschwindigkeit und Dichte musikalischer Informationen abhängig (Tempo-Density-Theory). Je zahlreicher die Abweichungen von der Norm – oder einem erwarteten musikalischen Verlauf – pro Zeiteinheit seien, desto länger werde die physikalische Zeit subjektiv empfunden[57]. Entfielen also viele Manipulationen der Kopplung von Tastendruck und Tonbeginn zufällig auf dieselbe Notengruppe, könnten sich die veränderten subjektiven Wahrnehmungen der akustischen Ereignisse zeitlich überlagern. Zudem wären ungestörte Passagen des Notenmaterials im Sinne Barrys so homogen zu gestalten, dass die Teilnehmer nicht durch eine stark unterschiedliche Notendichte zu einem expressiven Tempo (Agogik) verleitet werden.

Auch das Verhältnis von melodischer Dichte und wechselnden Notenwerten gilt es nach Auhagen (1995) zu beachten: Werden unterschiedliche Musikstücke als gleich schnell empfunden, kann ihr metronomisches Tempo dennoch stark abweichen. Etwa, wenn das tatsächlich langsamere Stück melodisch stärker variiert[58]. In Konsequenz reichen bei Stücken höherer tonaler Variabilität geringere Temposteigerungen aus, um Probanden die gleiche Tempozunahme empfinden zu lassen[59]. Zwar beschränkte sich Auhagens Versuch auf eine rein perzeptive Anordnung. Trotzdem sollten Störstellen in diesem Versuch in melodisch und rhythmisch ähnlichen Umfeldern platziert werden, damit die beschriebenen Effekte die hier in den Hypothesen vermuteten nicht überlagern.

Aus diesen Überlegungen wird ein einfacher Kontrapunkt mit imitierendem Wechsel der Melodie von der Ober- in die Unterstimme verwendet. So ist gesichert, dass die oben genannten Problemfelder möglichst reduziert sind und rechte wie linke Hand ähnliche Bedingungen erhalten. Der Wechsel von Notenlängen ist auf ein Minimum reduziert: Hierdurch wird eine stabile Ausführung des Metrums erwartet. Diese systematischen Akzente im Anschlag ließen sich entsprechend statistisch berücksichtigen (Partielle Autokorrelation sowie durch den in dieser Studie grundlegenden periodischen Mittelwert, siehe dazu Kp. 2.5.2.5.).

[56] Crowder 1994, S. 384 sowie Shigeno 1986, S. 10.
[57] Barry 1990, S. 167.
[58] Auhagen 1995, 181.
[59] Ebda.

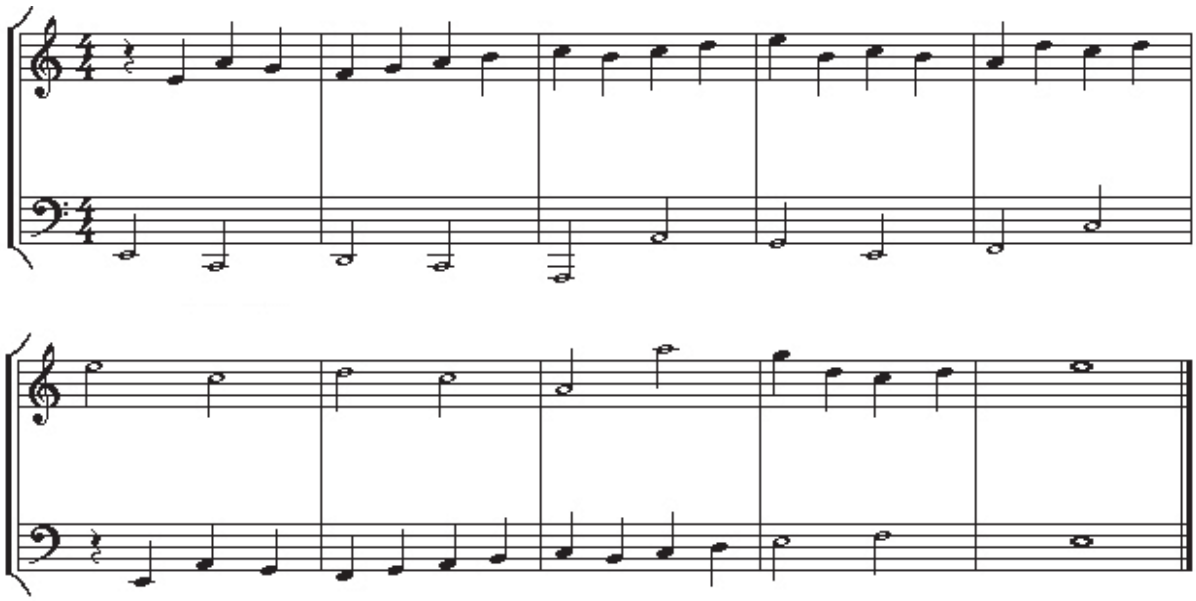


Abb.1: Notenvorlage zum Versuch

2.2.4. Positionierung der Störstellen

Grundsätzlich wird die Zahl manipulierter Noten pro Durchlauf gering gehalten. Das unbeeinflusste Spiel der Probanden soll deutliches Übergewicht in jedem Durchlauf erreichen. Zum einen sollen vermeintliche Reaktionen nach Zeitverzögerungen als abweichender Sonderfall ermittelt werden. Zum anderen wird eine ausreichende Zahl von Messwerten unbeeinflusster Noten als Kontrollgröße benötigt.

Zu erwarten ist, dass die Probanden die erste Note des Stück trotz der Aufgabe eines konstanten Tempos langsamer spielen werden. Insbesondere der auftaktige Charakter der Oberstimme (Viertelpause) legt dies nahe. Gegen Ende des Stücks in Takt neun wandert die melodische Dichte in die Oberstimme zurück. Zugleich umspielen Sekundschritte, Gegenbewegung und Wechselnoten den Grundton, wodurch eine – wenn auch schwach ausgeprägte – Klausel entsteht. Auch diese verleitet zu ausdrucksbetontem Tempo. Beide Passagen eignen sich daher nicht für Störstellen. In die Auswertung fließen Zählzeit zwei bis 35 ein.

Auch technische Kriterien schränken die Auswahl von Noten ein, die sich als Störstelle eignen. Die zur Manipulation und Aufzeichnung verwendete Software Logic Audio identifiziert und filtert eingehende MIDI-Noten anhand der Tonhöhe. So kann etwa das eingestrichene a nicht allein in Takt zwei verzögert werden. Mit einem Delay versehen wäre es bei jedem Auftreten während des Durchlaufs verzögert. Aspekte wie die Anzahl einer Note im Stück oder der Abstand, in dem sie auftritt, müssen daher beachtet werden.

Deshalb wurde das Notenbild einer Analyse unterzogen, um die geeignete Wahl zu treffen. Eine Übersicht der Kriterien und Ergebnisse ist in Kapitel 6.1. dargestellt.
Noten, die nicht mindestens durch zwei in der Tonhöhe von ihr verschiedene Noten getrennt sind, scheiden technisch für den letzten Versuchsteil – die Unterdrückung von Folgenoten zur Prüfung der Hypothese C – aus. Der Grund liegt darin, dass Logic nur eine Funktion für dieselbe Tonhöhe ermöglicht: Verzögerung oder Unterdrückung. Weiterhin dürfen unterdrückte Noten einzig nach verzögerten Noten auftreten, nirgendwo anders. Andernfalls wäre der Proband einer zusätzlichen Aufgabe und Schwierigkeit ausgesetzt. Auch dieses Kriterium schränkt die Zahl geeigneter Noten ein.
Zudem sollten Störstellen nicht platziert werden, wenn in der gleichen Stimme der Notenwert wechselt, etwa von Halben auf Viertel oder umgekehrt. Denn Instrumentalisten tendieren dazu, ein längere Zählzeit zu dehnen, wenn sie von einer kürzeren gefolgt wird[60]. Diese Einflüsse innerhalb einer Stimme dürfen die Effekte der Störstellen nicht überlagern. Dazu ist wesentlich, dass Notenwerte im Takt der Störstelle unverändert bleiben. Zudem sollte der vorangehende Takt gleiche Notenwerte führen, wenn die Störstelle am Beginn ihres Taktes liegt. Am Ende gelegen, gilt gleiches für den Folgetakt. Mit Ausnahme vom e'' in Takt sechs und a' in Takt acht konnten die zahlreichen Kriterien von den meisten der ausgewählten Noten vollständig erfüllt werden.
Wie erwähnt können in Logic nur Tonhöhen – nicht aber Positionen im Spielvortrag – unterdrückt oder gestört werden. Auch für Unterdrückungen sind deshalb Passagen zu finden, die im übrigen Notenbild selten oder nicht vorkommen: Die Zählzeiten vier bis sechs kommen in Frage und Zählzeit 31 bis 33, diese jedoch eingeschränkt. Deshalb sei – als rechtzeitige Methodendiskussion – schon hier angemerkt, das Zählzeit 30 und 31 mit dem großen h und dem kleinen c Noten besitzen, die direkt zuvor bereits auftauchen. Auch diese würden unterdrückt werden, wenn Zählzeit 30 bis 32 auch in der Linken unterdrückt werden sollte. Darauf wird verzichtet. Einzig das a'' wird stumm geschaltet. Gestört wird das eingestrichene a.
Nur bei identischer Tonhöhe in linker und rechter Hand ist eine Zählzeit vollständig gestört oder unterdrückt. Erneut sei im Sinn einer frühen Diskussion erwähnt, dass der Verfasser das große d in Zählzeit fünf nicht für eine Unterdrückung eingerichtet hat, sodass in Zählzeit vier bis sechs keine geschlossen unterdrückte Passage entsteht. Dies ist in allen weiteren Betrachtungen zu berücksichtigen. Insgesamt eignen sich die hier farbig markierten Noten sinnvoll als Störstellen:

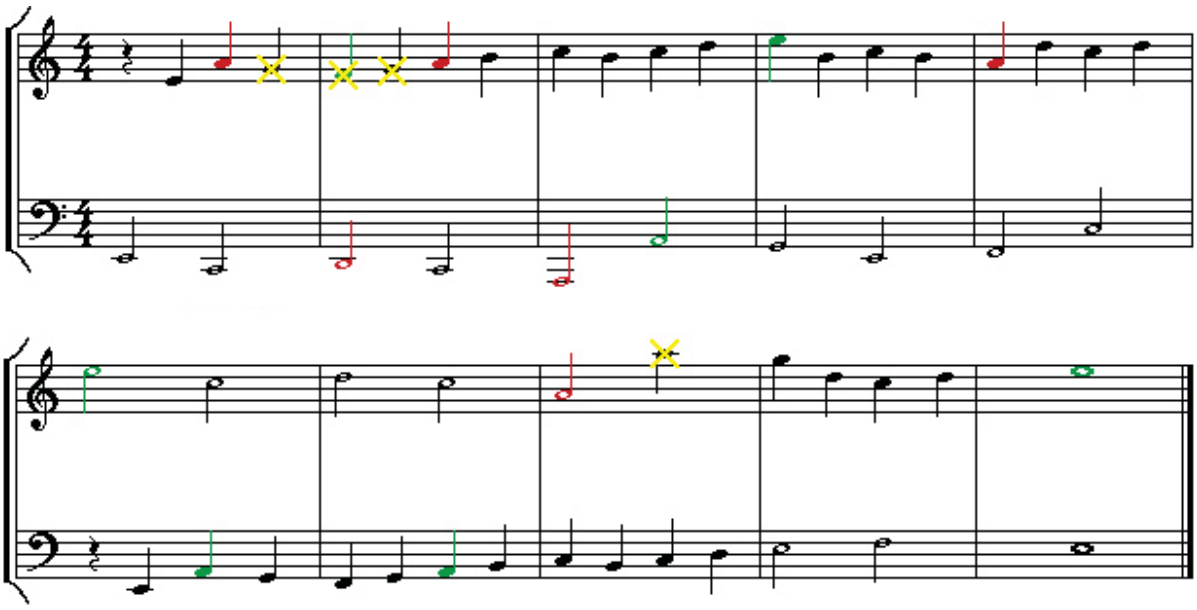


Abb. 2: Zur Manipulation ausgewählte Noten. Durchläufe mit Störstellen in den rot markierten Noten sind in einer eigenen Vorlage gespeichert, ebenso jene mit grünen. In der dritten Vorlage sind die gelb markierten Noten unterdrückt, das a' ist dort um 100ms verzögert.

2.2.5. Versuchsdurchläufe

Um Messwiederholungen mit jeweils nur eingradigen Störfaktoren zu erhalten, trat je Durchlauf nur eine Störgröße auf. Dadurch gibt es zunächst fünf quantitativ verschiedene Durchgänge: ungestörte sowie gestörte mit Verzögerungen von 50, 80, 100 oder 120ms. Sofern diese vier Störgrößen auch an anderer Stelle im Notenbild getestet werden sollen – um Scheineffekte auszuschließen, die maßgeblich vom Notenbild stammen –, ergäben sich weitere vier Gänge. Abbildung zwei teilt die als Störstelle geeigneten Noten in eine grüne und eine rote Variante. Jede wird im Versuch in allen vier Störgrößen vorkommen, mithin existieren acht gestörte Durchläufe.

Um das Ereignis Störstelle als Sonderfall auftreten zu lassen, erhält das Experiment zusätzlich vier Durchläufe ohne Manipulation. Dadurch verringert sich das prozentuale Auftreten von Störstellen. Zudem bieten die freien Durchgänge eine neutrale Basis des Vergleichs. Hinzu treten zwei Tests mit stummen Folgenoten nach 100er Störstellen (gelbe Vorlage), um Hypothese C überprüfen zu können. Das Experiment umfasst also 14 Durchläufe:

[60] Auhagen 2008, S. 437.

Durchlauf	Vorlage	Verzögerungen	verzögerte Note			Unterdrückte Noten		
1								
2		50ms	f ’	e’’	A			
3		100ms	f ’	e’’	A			
4								
5		80ms	a’	D	A_1			
6		120ms	f ’	e’’	A			
7								
8		50ms	a’	D	A_1			
9		120ms	a’	D	A_1			
10		80ms	f ’	e’’	A			
11								
12		100ms	a’			f ’	g’	a’’
13		100ms	a’	D	A_1			
14		100ms	a’			f ’	g’	a’’

Abb. 3. Abfolge der Durchläufe mit Störstellen und Unterdrückungen.

Hypothese C dieser Studie sagt vorher, dass die Teilnehmer bei Störstellen von mehr als 80ms keine auditive Rückmeldung mehr benötigen, um ihr – infolge der Störstelle – kurzfristig verändertes Tempo anschließend durch Rückkehr in den Grundschlag zu korrigieren. Um dies sinnvoll hinterfragen zu können, wurde im Versuchsablauf ein roter Durchlauf zwischen die gelben mit Unterdrückungen gesetzt. Denn der rote 100er-Durchlauf enthält Störstellen der Oberstimme, die in den gelben Varianten an gleicher Stelle und in gleicher Größe auftreten, dort indes gefolgt von Unterdrückungen.

Zwar ist – vom Prä-Post-Test abgesehen – die zufällige Anordnung in Experimenten mit Messwiederholungen die sicherste Methode, um Einflüsse durch den Aufbau selbst auszuschließen. Im hiesigen Fall erzeugte ein Losverfahren aber große Unwägbarkeiten. Vielmehr gab es gute Gründe dafür, dass der Block mit Unterdrückungen am Ende der Reihe steht: So war es unumgänglich, den Probanden zum Auftakt einen unmanipulierten Durchlauf zu präsentieren, um – bei etwaig widersprüchlichen Ergebnissen – wenigstens eine einzige unbeeinflusste Messreihe zu besitzen, die frei von Lern- oder sonstigen Folgeeffekten ist.

Zum Beispiel konnte Fischer (2004) in einem Experiment mit Messwiederholungen zur Negativen Asynchronie nachweisen, dass die Teilnehmer ihren zum akustischen Führungssignal motorischen Synchronisationsfehler schon nach wenigen Minuten

signifikant verringerten[61]. Zudem reduzierte Vorwissen die Spanne. Sollte schon der erste Durchlauf dieser Studie große Verzögerungen enthalten, könnten die Probanden wie bei Finney (1997) motorisch reagieren und sich darauf anpassen (Fischer 2004), wodurch keine Messreihe mit ursprünglichem Verhalten als Vergleich erfasst wäre.

Grundsätzlich sollte dem Dreier-Block mit Unterdrückungen auch mindestens ein Durchlauf jeder Störgröße vorausgehen. Denn folgte der Block direkt dem unmanipulierten ersten Durchgang und hätte das Experiment keine signifikanten Ergebnisse in den späteren Wiederholungen geliefert, wäre einerseits dem Argument schwer zu begegnen, die Probanden hätten mit Auftreten der ersten Unterdrückungen – also seit dem zweiten Durchlauf – ohnehin auf einen rein innerlichen Prozess zur Steuerung ihrer Sensomotorik umgeschaltet und der Versuch hätte dort im Grunde abgebrochen werden können.

Andererseits ließe sich über nicht signifikante Ergebnisse nach einem frühen Block mit Unterdrückungen ebenso sagen, akustische Verzögerungen wirkten sich unabhängig der Größe generell nicht aus – dies zeige schließlich die Zufälligkeit der Schwankungen in den Durchläufen nach dem Block mit Unterdrückungen. Dies im Blick sollten mindestens fünf Durchläufe – je ein unmanipulierter, ein 50er, 80er, 100er und 120er – dem Block mit Unterdrückungen vorausgehen.

Gerät die Maxime dabei nicht in Vergessenheit, das unmanipulierte Spiel in den Vordergrund zu stellen, träten dem unmanipulierten Auftakt und einer möglichst großen Anzahl manipulierter Durchläufe wenigstens einige der verbleibenden drei ungestörten Gänge hinzu, ehe der Block mit Unterdrückungen folgt. Vor diesen Hintergründen wurde ein ungestörter Durchlauf an den Beginn des Experiments gestellt. Der genannte Dreier-Block beendete den Versuch. Die Abfolge der mittleren Gänge wurde ausgelost.

2.2.6. Versuchsinstrument

Für die Entkopplung von Tastendruck und Signalbeginn eignen sich insbesondere Digitalpianos. Zum einen unterliegen Digitaltöne bei zeitlicher Verschiebung in viel geringerem Maße Störungen und Verzerrungen als analoge Signale. Gerade eine zeitliche Klangtreue ist bei Manipulation in Echtzeit für diesen Versuch aber wesentlich. Zum anderen lässt sich bei MIDI-tauglichen Digitalpianos jede einzelne Taste orten und individuell mit Manipulationen belegen.

---

[61] Fischer 2004, S. 3.

Dies geschieht zunächst durch die Einstellung Local Control Off am Instrument – der interne Klangerzeuger wird abgekoppelt. In dieser Einstellung erklingen keine Töne beim Spiel auf der Tastatur. Über den MIDI-Ausgang des Instrumentes können die Anschlagdaten aber in einen externen Computer übertragen und dort manipuliert sowie aufgezeichnet werden. Die Signale gelangen von dort zurück in die MIDI-Schnittstelle des Klaviers und danach zur internen Klangerzeugung.

Neben dem Vorteil, Störstellen für verschiedene Durchläufe schon im Vorfeld festlegen zu können, ermöglicht diese geschlossene Datenschleife die Ermittlung systemimmanenter Latenzen. So können alle MIDI-Noten sowohl im Messrechner als auch am Anfang wie am Ende der MIDI-Schleife im klaviereigenen Sequenzer mitgeschnitten und später verglichen werden. Dies ist Voraussetzung, um die Latenz der Messapparatur selbst bestimmen zu können (siehe Kapitel 2.3.1.).

Als Versuchsinstrument dient das Digitalpiano CLP 170 der Clavinova-Serie von Yamaha. Der Umfang der Klaviatur umfasst den üblichen Bereich von 7¼ Oktaven. Der mechanische Tastenwiderstand orientiert sich durch eine nach Herstellerangaben neu entwickelte Klaviatur eng an der Spielsituation auf Konzertflügeln. Etwa das Prinzip beliebiger Repetitionsfähigkeit von Anschlägen auf Pianos mit Stoßzungenmechanik sowie die mechanische Bedämpfung der Saite beim Loslassen der Taste soll hierdurch optimal gewährleistet sein.

Klangliche Vorlage für das Digitalpiano ist die große Serie von Konzertflügeln der Firma Yamaha. Verschiedene Klänge jeder einzelnen Taste eines C3-Flügels stehen in Dynamik, Anschlaggeschwindigkeit, Anschlagdauer und Bedämpfung im Wellenformspeicher (Wavetable[62]) des Digitalpianos zur Verfügung. Je nach Anschlag einer Taste wird ein entsprechender Klang aus dem digitalen Speicher abgerufen, verstärkt und vom Lautsprechersystem des Digitalpianos abgestrahlt.

Nach Herstellerangaben sorgt ein neues Konzept AFC[63] für eine dreidimensionale Wiedergabe des Klavierklangs. Mikrofone orten, wie sich der Schall eines zweiten, rückwärtig montierten Lautsprechersystems verbreitet. Hierdurch werden Raumgröße oder Schall benachbarter Instrumente erfasst und in ihrer Auswirkung auf den Klang eines mechanischen Klaviers berücksichtigt. Gleichzeitig beziehen die Mikrofone die Resonanz des Gehäuses mit ein. AFC wurde auf einen Mittelwert eingestellt. Weitere

[62] Wavetable sind Datenbanken aus digital konservierten Klängen, in diesem Fall eines Yamaha C3-Flügels. Die Klänge jedes Tastendrucks bei verschiedensten Anschlagstärken und -dauern sind im Wavetable digital gespeichert und mit einer hierarchischen Struktur versehen. Schlägt ein Pianist eine Taste des Digitalpianos an, sucht der Prozessor des Pianos zunächst die Sammlung aller Klänge der zugehörigen Tonhöhe und dann den gespeicherten Klang, der der tatsächlichen Anschlagstärke und Dauer des Pianisten am meisten entspricht. Darauf erklingt der Ton.

[63] Active Field Control.

Klangeinstellungen für zusätzliche Effekte wie Sound Board Reverb oder Sustain Sampling wurden auf neutrale Werte gesetzt. Verwendet wurde der Wavetable Grand Piano 1, der einen dreidimensionalen Klang simuliert und vom Hersteller in seiner Dynamik als Mezzopiano beschrieben wird.
Die Klaviatur wurde wie üblich nach Kammerton A 440Hz gestimmt. Jedoch wurde eine so genannte Stretched-Tuning-Stimmung eingesetzt: Entsprechend der nicht exakt gleichmäßig temperierten Stimmung bei Klavieren und Konzertflügeln waren die tiefen Töne leicht herabgestimmt, die hohen leicht höher. Die Anschlagempfindlichkeit der Tastatur war auf einen Mittelwert justiert. Derart war ein lineares Verhältnis von Kraftaufwand zum Tastendruck und erzielter Lautstärke gegeben.

2.2.7. Messrechner

Wie oben beschrieben gelangen die digitalen Informationen (MIDI) der Tastenanschläge über den MIDI-Ausgang des Klaviers zum MIDI-Eingang des Messrechners, einem PC mit Pentium-IV-Chip und 256 MB physikalischem Arbeitsspeicher (DDR-RAM). Die Leistungsfähigkeit eines Pentium-IV-Chips mit einer Taktung von allerwenigstens 1,6 Gigabyte ist unerlässlich, da die Notenwerte in Echtzeit manipuliert werden müssen.
Die Rechenleistung erzeugt in dieser Testsituation eine extreme Auslastung sowohl des Prozessors als auch des Arbeitsspeichers. Grundsätzlich muss der Versuchsaufbau so gestaltet sein, dass es niemals zu einer Auslagerung von Daten aus dem physikalischen Arbeitsspeicher in den virtuellen Speicher auf der Festplatte kommt. Zugriffszeiten auf Festplatten sind erheblich höher und beeinträchtigen die Signalverarbeitung in Echtzeit. In Vorversuchen wurde daher neben den musikalischen Bedingungen für die Platzierung von Manipulationen auch diese technische Voraussetzung geprüft.
Hierzu wurden sämtliche Programmdienste anderer Software ausgeschaltet. Dienste des Betriebssystems Windows XP wurden deaktiviert, sofern sie für die Situation im Test nicht notwendig waren. Unerlässliche Dienste und Systemprozesse wurden auf ihren Kapazitätsbedarf an Rechenleistung geprüft. Prozessorzeitplanung und Speichernutzung wurden auf den Betrieb der Software Logic Audio optimiert. Empfangs- und Übertragungspuffer (First In First Out) der MIDI-Schnittstellen wurden auf Maximalwerte eingestellt, um eine höchste Übertragungsgeschwindigkeit zu erzielen. Physisch wurde die Datenübertragung zwischen Digitalpiano und Messrechner über den Gameport (PCI-Bus) abgewickelt. Datenverkehr über USB-Schnittstellen erwies sich als deutlich zeitverzögert und wurde daher nicht in Betracht gezogen, siehe dazu Kapitel 2.3.1. Die Soundkarte des

Computers wird nicht zur Klangerzeugung benötigt. Weder die darauf gespeicherten Standard-Wavetables kommen zum Einsatz noch eine sonstige DA-Wandlung (analoge Klangerzeugung aus digitaler Vorlage im Messrechner).

2.2.8. Software

Alle Übertragungsdaten sind im MIDI-Format kodiert. Der Software-Sequenzer Logic Audio Platinum 4.81 der Firma Emagic übernimmt die von der Klaviatur abgehenden Daten über die Schnittstelle MIDI-In des PCs. Zur kontrollierten Auswahl und Zeitverzögerung gewünschter Noten wird eine virtuelle Verdrahtung in der Arbeitsumgebung (Environment) von Logic erstellt. Für jeden individuellen Durchlauf jedes Probanden wird dazu eine Dateivorlage eingerichtet, die zu Beginn des jeweiligen Durchlaufs geöffnet wird. Zum einen ist derart sichergestellt, dass planbar über 14 Durchläufe jede Störstelle vorab festgelegt ist, ohne sie während des Durchlaufs aktivieren oder deaktivieren zu müssen. Weiterhin zeigt die visuelle Verdrahtung jeden aktuell einfließenden Notenwert sowie dessen Verlauf und Beeinflussung.

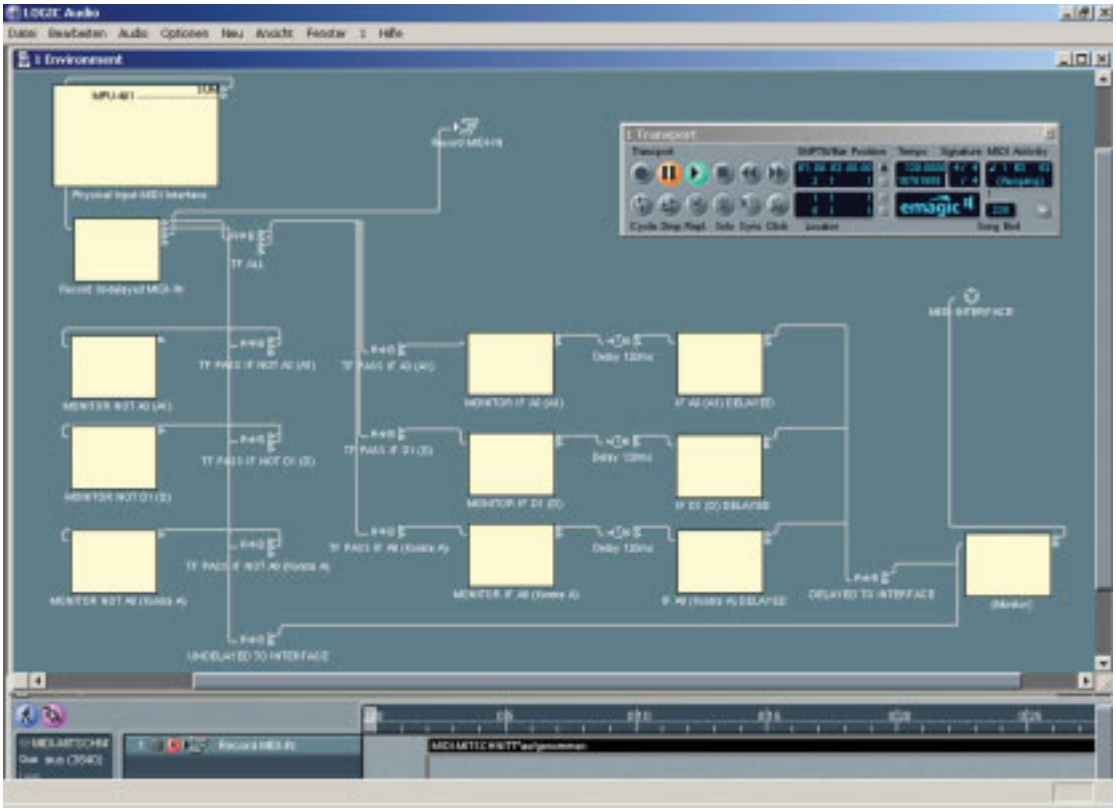


Abb. 4: Verdrahtung in einer Logic-Dateivorlage. Einen größeren Ausschnitt liefert Kapitel 6.2.

Alle einfließenden Daten werden unmittelbar am MIDI-Eingang[64] abgenommen und in einer MIDI-Spur im Sequenzer aufgezeichnet[65]. Logic speichert die Informationen dabei in einem eigenen Datei-Format (.lso). Parallel zweigt ein identischer Datenstrom TF ALL (Abbildung 4) vom MIDI-Eingang in die Verdrahtung ab, wo ausgewählte Noten[66] in einer separaten Schleife verzögert[67] werden. Manipulierte[68] und unmanipulierte[69] Noten aus den beiden Schleifen werden vor dem MIDI-Ausgang[70] des Rechners wieder zusammengeführt[71]. Von dort gelangt das vereinte Signal zum MIDI-Eingang des Klaviers zurück. Erst hier wird die interne Klangerzeugung des Instrumentes eingesetzt: Die MIDI-Daten werden in Audioklänge umgewandelt und von den Lautsprechern des Digitalpianos in das Hörfeld der Probanden abgestrahlt.

2.3. Methoden

2.3.1. Prüfung der Messapparatur

Die gesamte Datenschleife zwischen Klaviatur, der Manipulationseinheit im PC, der Messapparatur im PC und dem Klanggenerator des Klaviers muss auf eigene Latenzzeiten geprüft und anschließend geeicht werden. Zunächst wurde geprüft, welcher Übertragungsmodus zwischen Klavier und Computer die verlässlichste Kommunikation liefert. Dazu wurden die Daten über USB sowie eine herkömmliche COM-Schnittstelle am Computer ausgetauscht. Sowohl in Logic als auch im Sequenzer des Klaviers erfolgte der Mitschnitt. Dabei wurde – wie später im Versuch üblich – die Einstellung Local Off am Klavier gewählt, wodurch im Sequenzer des Klaviers reine Werte MIDI-Out aufgenommen werden. Sie entsprechen nach Auskunft des Herstellers präzise dem Tastenanschlag[72].
Der Vergleich beider Zeitreihen von Logic und dem Digitalpiano ließ die Abwicklung via USB fraglich erscheinen: Zwar wurden die Noten in Logic im Mittel nur rund 2,5 ms später aufgezeichnet. Jedoch schwankten die Abweichungen im Einzelfall stark, zum Teil um

---

[64] Physical Input MIDI Interface Roland MPU-401, siehe Abbildung 4 oben links.
[65] Record MIDI-In. Die Aufnahmespur erscheint im Arrangier-Fenster, siehe Abbildung 4 unten: schwarze Aufnahmespur.
[66] TF PASS IF F3 (E4, A1).
[67] Delay 120ms (beziehungsweise 50, 80 oder 100).
[68] DELAYED TO INTERFACE.
[69] UNDELAYED TO INTERFACE.
[70] Siehe Abbildung 4 Mitte rechts: MIDI-Interface.
[71] Monitor.
[72] Signale zum MIDI-Ausgang durchlaufen im CLP 170 nicht die interne Klangregelung. Es handelt sich um reine ADSR-Werte. ADSR steht für Attack, Decay, Sustain und Release. Diese vier Parameter bilden die Hüllkurve (Envelope) eines MIDI-Tons, also seinen Verlauf, auch Envelope-Generator genannt.

12ms[73]. Bei näherer Betrachtung fand sich ein weiteres Problem, dass die Verwendung von USB ausscheiden ließ: Störstellen passierten den MIDI-Ausgang am Rechner unabhängig von ihrer Größenordnung um etwa 450ms später als unmanipulierte Noten. Zwar handelt es sich bei USB um einen ebenso seriellen BUS-Dienst wie bei einer herkömmlichen COM-Schnittstelle. Der Fehler trat beim Einsatz über COM aber nicht auf.

2.3.1.1. Summierende Latenzen in Logic

Beide Übertragungswege weisen eine systematische Latenz auf, die Anlass zu kritischen Fragen über die Güte der Messapparatur bietet: Die oben genannte Abweichung um 2,5ms bei der Aufnahme via USB bestätigte sich in ihrer Systematik auch via COM mit allerdings geringeren Werten. Die besondere Problematik besteht darin, dass die Latenzen sich bei der Aufzeichnung summieren.
Zwar findet die Addition keinerlei akustische Entsprechung – unverändert erklangen unmanipulierte Noten zum Zeitpunkt ihres Tastenanschlags und dies auch nach längerer Spieldauer, während der Sequenzer Fehler weiterhin kumuliert aufzeichnete. Auch zeigte sich in der Arbeitsumgebung (Environment) von Logic keine Analogie dazu. Die Notenwerte erschienen pünktlich in den Monitoren, manipulierte Noten also entsprechend später. Dennoch wuchs der kumulierte Fehler im Sequenzer an. Gegenüber den Zeitreihen, die im Klavier mitgeschnitten wurden, hinkte das Tempo der Logic-Aufnahme um rund ein Prozent hinterher. Zu klären war nun folgendes:

> 1) Bestehen Diskrepanzen zwischen den Ausgangswerten und den Eingangswerten der Signale am Klavier?
>
> 2) Wenn Nein oder nur im stabilen und geringfügigen Maß: Verändern sich diese Diskrepanzen zwischen Ein- und Ausgang des Klaviers unter extremen Bedingungen (hohe Anschlagzahl, vielfacher Einsatz von Störstellen)?
>
> 3) Wenn Nein: Verändert sich das im Sequenzer von Logic stabil um zirka ein Prozent langsamere Tempo unter extremen Bedingungen?

Sollte auch diese dritte Frage mit Nein beantwortet werden können, besteht keine operative Fehlerquelle. Vielmehr läge ein statistisch äußerst stabiler Fehler im Zeitstempel des Sequenzers von Logic vor.

[73] Fünf Tests mit bis zu 300 Anschlägen. Siehe Daten-CD im Ordner Experiment\Test Latenzen\1 CLP vs. Logic via

Um die drei Fragen zu prüfen, bleibt die Messapparatur im Rechner unangetastet. Geändert wird hingegen eine Einstellung am Klavier: Die Schaltung Local-On wird aktiviert, sodass der Klanggenerator des Klaviers die angeschlagenen Töne erzeugt. Diese Tonreihe kann im Sequenzer des Pianos mitgeschnitten werden. Zudem zeichnet dieser Sequenzer auch das Signal auf, das durch den PC geschleift wurde und wieder zurück in das Klavier gelangt. Auch dieses Signal wird vom Klanggenerator akustisch umgewandelt. Damit erklingen zwei Tonreihen: eine unverfälschte und jene, die durch den Computer verläuft. Entsprechend klingen größere Störstellen im Echo nach, kleinere hingegen verleihen dem Signal einen schwammigen Charakter.

Von Bedeutung ist dieser technische Eingriff, weil der Sequenzer im Klavier nun beide Tonreihen dokumentiert – und damit die Latenzzeit der gesamten Messschleife. So entstehen drei Messpunkte für die Töne: je einer für Ursprung (Klaviatur), Manipulation (Computer) und Resultat (Klangenerator), deren Zeitreihen verglichen werden können.

Zur Überprüfung wurden fünf Tests gespielt[74], wechselweise mit Störstellen von 50ms und 120ms sowie ohne Störstellen. Die Testreihen ergaben Mittelwerte zwischen 3,82[75] und 4,25ms[76] als Abweichung zwischen Eingang und Ausgang des Klaviers. Auffällig rekrutieren sich diese Laufzeiten ausnahmslos aus Werten von null, fünf und sechs Millisekunden. Die Latenz der gesamten Messschleife liegt hochgerechnet bei rund vier Millisekunden. Die erste Frage ist somit positiv beantwortet. Allerdings handelt es sich um geringfügige und stabile Diskrepanzen. Der Test muss also mit Blick auf die zweite Frage unter erschwerten Bedingungen wiederholt werden:

Um das gesamte System größtmöglich zu belasten, wurden Cluster gespielt. Dabei diente ein Holzstab auf der Klaviatur, der fünf Oktaven überspannte, für einen zeitgleichen Anschlag. Wiederum ergaben sich identische Differenzen zwischen den beiden Zeitreihen im Sequenzer des Klaviers. Die Laufzeit der MIDI-Daten von rund vier Millisekunden durch die Manipulationsebenen der Software samt Schnittstellen und Kabeln ist also unabhängig von der Dichte gespielter Noten.

Indes weisen die Aufnahmen in Logic erneut Besonderheiten auf: Mit identischen Zeitstempeln versehene Daten aus dem Klavier erscheinen im Logic-Sequenzer seriell aufgezeichnet. Der gespielte Cluster erscheint im Sequenzer aufgefächert. Jede Note besitzt einen neuen Zeitstempel. Der Grad der Auffächerung beträgt gemittelt 2ms je Note. Ein Cluster von fünf Oktaven wird in der Aufnahme über gut 70ms verteilt.

USB S&D\Schritt 3 Datenaufbereitung Excel\Auswertung.xls. Dort Spalte J und Zelle K2.

[74] Bis 310 Anschläge.

[75] Experiment\Test Latenzen\4 Latenzen CLP vs. Logic Halle 310105\Schritt 3 Datenaufbereitung Excel\Auswertung Latenzen 310105.xls\ Test 2 0ms. Dort Spalte H.

Mehrere Ursachen sind für diese problematische Beobachtung denkbar: MIDI basiert auf serieller Datenübertragung, die Schnittstellen reichen Informationen seriell weiter. Sollte dies eine Ursache für Latenzen sein, müsste der Cluster auch in der Eingangsspur des Sequenzers vom Klavier aufgefächert eintreffen und dort mit entsprechenden Zeitstempeln versehen werden. Weder trifft dies zu noch erklingt der Cluster aufgefächert.
Überdies bekräftigt die Aufnahme in Logic selbst die Annahme, dass Fehler in der Dokumentationsebene der Software ursächlich sind: Wird die Aufnahmespur des Clusters angehört, erklingen die Töne der fünf Oktaven zeitgleich. Dies ist nicht anders erklärbar als durch einen Dokumentationsfehler, der sich bei der Umwandlung vom MIDI-Datensatz in das interne Format .lso ereignet. Möglich ist, dass der Transfer von MIDI zu .lso im Cache des Rechners etwa zwei Millisekunden Zeit beansprucht – der neue Zeitstempel ist zwei Millisekunden älter.
Diese Erklärung würde aber starke Probleme nur für Versuche mit anderer Konstellation als der hiesigen aufwerfen. Zum einen werden bei diesem Experiment nie mehr als zwei Noten zugleich angeschlagen. Zum anderen liegt das Hauptaugenmerk auf einer fehlerfreien Durchleitung der Daten zurück zum Klangenerator des Klaviers, damit keine Verzögerung auf der Klaviatur insgesamt oder unverlässliche Verzögerungen entstehen. Überdies kann die als Fehler im Zeitstempel vermutete Problematik der Auffächerung sowie summierender Latenzen eindeutig als ebensolche belegt werden: Denn wie zuvor erwähnt ist beim Abspielen des aufgezeichneten Clusters keine Auffächerung hörbar.
Das Problem ist damit als Fehler in der Dokumentationsebene von Logic identifiziert, das nur unter extremsten Bedingungen auftritt – bei Zusammenfallen zweier Noten hingegen nur in einer stabilen Größenordnung von zwei Millisekunden. Die Fehlertoleranz des Messsystems beträgt so betrachtet maximal plus sechs Millisekunden: Bei der Durchleitung entstehen im Mittel plus vier Millisekunden (siehe oben), ergänzt um plus zwei Millisekunden im Fall zeitgleichen Anschlags. Die Abweichung von plus zwei Millisekunden bei synchronem Anschlag übt faktisch aber keinen Einfluss aus. Denn ein zeitgleicher Anschlag zweier Tasten wäre zwar theoretisch bei 50 Prozent aller Zählzeiten zu erwarten. Die Probanden zeigten aber hoch signifikant keine isochronen Anschläge von rechter und linker Hand.
Das Phänomen summierender Latenzen im Sequenzer von Logic übt mithin keinen Einfluss auf den Datentransfer sowie die Delay-Pufferung aus. Es handelt sich um einen systematischen Fehler in der Dokumentationsebene von Logic. Dieser weist eine so große Stabilität auf, dass er sinnvoll in die Statistik des Experiments einbezogen werden kann.

[76] Ebda. Test 1 0ms. Ebenso Spalte H.

Die statistisch stabile Latenz der gesamten Mess- und Störeinheiten liegt damit bei plus vier Millisekunden.

2.3.1.2. Eichung der Delays

Wiederum werden Zeitreihen an den drei bekannten Messpunkten aufgezeichnet. Mittel der Beobachtung ist der simultane Anschlag einer manipulierten und einer auf der Klaviatur benachbarten unbeeinflussten Note. Um hohe Präzision zu gewährleisten, wurden die Tasten mit einem überspannenden Holzklotz gedrückt.
Insgesamt wurden 13 Eichschritte mit bis zu 500 simultanen Anschlägen durchgeführt. Zunächst wurde das Delay in Logic auf Werte von null und einer Millisekunde eingestellt. Die Zeitreihen der Messpunkte wurden verglichen: Ein Delay von null Millisekunden hinterlässt im Mittel eine Verzögerung von 0,87ms in der Aufnahme am Eingang des Klaviers, der Wert für eine Millisekunde beträgt 1,44ms. Ungenauigkeiten von ± 0,5ms können aber nicht ausgeglichen werden, da Logic als kleinste Zeiteinheit die Millisekunde besitzt.
Zur Eichung der vier Störwerte 50, 80, 100, 120ms wurden Annäherungen vorgenommen. Dies geschah auch vor dem Hintergrund, dass Delays in Logic von einem virtuell voreingestellten Tempo abhängig sind. Dieses wurde auf 120 Schläge pro Sekunde festgelegt. Als Folge erzeugt ein Delay, das auf 50ms eingestellt ist, bei virtuell 120 Schlägen pro Minute eine tatsächliche Verzögerung von etwas weniger als 25ms.
Die eingestellte Verzögerung musste also verdoppelt werden. Über zu hohe und zu niedrige Werte angenähert erwiesen sich letztlich 101ms als beste Einstellung: Das Mittel der zugehörigen Messwerte im Klavier betrug dann 50,38ms. Analog wurde mit den restlichen Störwerten verfahren. Die für das Experiment justierten weiteren Größen in Logic sind 162 für 80ms, 202 für 100ms und 243 für 120ms.

2.3.2. Messdatenakquise

In Logic gespeicherte Zeitreihen lassen sich nicht direkt in statistische Programme übertragen. Daher wurden die Daten zunächst in MIDI-Dateien ausgelagert. Ziel war die weitere Konvertierung in ein Format, dass zumindest durch MS-Excel importiert werden

kann. Versuche mit Konvertern wie GNMIDI[77] erwiesen sich als umständlich und zum Teil fehlerhaft. Verlässliche Ergebnisse indes liefert das onlinegestützte Verfahren POCO Web[78] des Instituts Cognitie en Informatie der Radboud Universiteit Nijmegen. Jede MIDI-Datei wurde auf diesem Weg in das tabellenbasierte Format .mtx übertragen. Die Ergebnisse wurden mit den ursprünglichen Zeitreihen in Logic verglichen. Im Anschluss dienten die Import-Filter in Excel zur Bereinigung von Informationen, die im Sinn dieser Studie nicht relevant sind.

Zurück blieben 14 Excel-Dateien für jeden Probanden aus Reihen mit Zeitpunkten seiner Tastenanschläge in Millisekunden, der Tonhöhen sowie zusätzlicher Informationen über Dauer und Intensität des Anschlags. Ehe die Zeitreihen jedoch mit dem Statistikprogramm SPSS bewertet werden konnten, bedurfte es grundsätzlicher Überlegungen: Mittel der Beobachtung in dieser Studie ist die Abweichung eines lokalen Tastenanschlags vom Tempo der Anschläge in seiner zeitlichen Umgebung. Dies sollte dennoch in Relation zum durchschnittlichen Tempo des gesamten Stückes geschehen. Für die statistische Auswertung böten sich partielle Autokorrelationen an, siehe dazu Kapitel 2.4. ff.

Indes wirft das verwendete Notenmaterial für beide Verfahren Probleme auf: Durch den Wechsel von Halben- und Viertelnoten sowie der Viertelpause in Takt sechs vergehen unterschiedlich viele Zählzeiten – nämlich eine bis drei –, ehe innerhalb einer Stimme ein neuer Anschlag erfolgt. Dies unberücksichtigt, erschiene das Tempo zwischen dem kleinen c in Takt fünf und dem großen E in Takt sechs dreimal langsamer als die Spanne des großen E bis zum folgenden großen A. Damit fällt die Differenzfunktion innerhalb der Autokorrelation als Methode aus. Doch lässt sich die Schwierigkeit umgehen, indem alle Zeitreihen vorweg in Excel in ihre Differenzen zerlegt werden. Dabei wird besagte Passage mit dem Faktor drei dividiert, Bereiche mit halben Noten analog um zwei.

2.3.2.1. Problematik der Messwertdifferenzen

Messwertdifferenzen sind in der statistischen Literatur als problematische Größen beschrieben, insofern sie als Veränderungswerte analysiert werden sollen[79]. Dies gilt insbesondere für Lerntests mit Messungen vor und nach einem beeinflussenden, externen

---

[77] Copyright by Günther Nagler, http://www.gnmidi.com

[78] POCO Web (http://poco.nici.kun.nl/login.php) ist eine Schnittstelle im Internet zwischen dem Browser eines Anwenders und der Server-Seite im Institut für Cognitie en Infomatie Nijmegen. Der Anwender kann Dateien der Formate .mtx oder .mid zum Server senden und diese dort umwandeln lassen. Standard-MIDI-Files können in Music-Text (.mtx) konvertiert werden, das im Wesentlichen schon den Charakter von Tabellen besitzt. Entsprechend praktikabel verläuft der anschließende Transfer nach Excel.

[79] Guthe 1996, S. 114 und Bortz 2000, S. 70.

Ereignis. „Differenzwerte sind in der Regel nicht so zuverlässig wie die beiden Grundwerte (Prä- und Post-Test), da die Messfehler beider Grundmessungen sozusagen in den Differenzwert eingehen[80]."

Prinzipiell können die Dauern von Zählzeiten als Messwertdifferenzen aufgefasst werden. Die n-1 Werte der ursprünglichen Zeitreihe können jeder für sich Messfehler aus dem zugehörigen Prä- oder dem Post-Wert enthalten. Indes sind diese identifizierbar, da mit Ausnahme der ersten und letzten Zählzeit der Notenvorlage jedem Messwert eine Zählzeit vorausgeht und nachfolgt. Im Vergleich zu konventionellen Anordnungen bei Lerntests ist in dieser Studie – die im Übrigen nicht primär Lerneffekte untersuchen will – daher immer der Vergleich innerhalb einer ausreichend langen Zeitreihe von Differenzwerten möglich.

Das substanziellste Argument dafür, die zuvor beschriebene Problematik für dieses Testumfeld vernachlässigen zu können, liegt aber in der Gerichtetheit der hier gegebenen Messwertdifferenzen. So wirkt sich ein späterer Anschlag einer Taste nicht nur auf die Zählzeit aus, die er abschließt sondern gleichermaßen auf jene, die er einläutet. Dies führt unweigerlich zu bereits augenscheinlichen Temposchwankungen.

Zusätzlich werden alle auffälligen Anschlagwerte in ihrer möglichen Bedingtheit in den Excel-Tabellen analysiert und kommentiert, ehe die Zählzeiten auf Basis der Differenzen zwischen den Anschlägen bestimmt werden.

2.3.2.2. Probleme mit simultanen Anschlägen benachbarter Noten

Weiterhin erzeugen ungewollt simultane Anschläge zweier Tasten mit einem Finger statistische Schwierigkeiten. Zwar müssen sie dokumentiert und beurteilt werden. Die Sensoren der Klaviatur zeichnen jedoch äußerst feinfühlig auf. Und prinzipiell sollte etwa ein simultaner Anschlag a', h' mit einer Differenz von zwei Millisekunden nicht als Tempofehler gedeutet werden, vielmehr als unsauberes Spiel. Gleiches gilt für die Berührung einer anderen Taste beim Loslassen der ursprünglichen.

Beließe man beide Anschläge in der Zeitreihe, entstünde eine extreme Schwankung ohne externe wie interne Ursache: Weder wurde der Proband gestört, noch veränderte er tatsächlich sein Tempo. Entsprechend wurden die Zeitreihen bei der Aufbereitung von diesen seltenen simultanen Anschlägen bereinigt. Gleichwohl ist dieses Verfahren in den Excel-Tabellen Schritt für Schritt dokumentiert.

---

[80] Guthe 1996, S. 114.

Zudem bewältigten die Probanden die Aufgaben mit unterschiedlicher Sicherheit. Einige Probanden schlugen in den 14 Durchläufen keine falsche Taste an, andere hingegen wiederholten die Anschläge derselben Zählzeit, wenn ihnen ein eigener Fehler bewusst wurde.

Vorlage	DF9	Note	Länge	Vel.	DF10	Note	Länge	Vel.
d"	18.513	D4	0.822	0.35	17.042	D4	0.723	0.26
c/c"	19.344	C4	0.849	0.32	17.787	C2	1.320	0.35
c/c"	19.364	C2	1.285	0.26	17.795	C4	0.746	0.36
d"	20.100	D4	0.766	0.26	18.559	D4	0.683	0.30
e"	20.833	E4	1.661	0.40	19.299	E4	1.445	0.39
E	21.608	E1	0.804	0.28	20.148	E1	0.978	0.30
A/c"	22.443	C4	1.598	0.31	21.074	C4	0.180	0.07
A/c"	22.455	A1	0.787	0.30	21.143	G1	0.403	0.27
					21.369	C4	1.398	0.41
					21.554	A1	0.584	0.27
G	23.309	G1	0.658	0.24	22.148	G1	0.613	0.28
F/d"	24.024	F1	0.773	0.31	22.796	D4	1.464	0.39
F/d"	24.054	D4	1.452	0.33	22.814	F1	0.719	0.28
G	24.824	G1	0.671	0.28	23.552	G1	0.665	0.33
A/c"	25.541	C4	1.706	0.33	24.271	A1	0.984	0.21
A/c"	25.546	A1	0.722	0.33	24.276	C4	1.756	0.23

Abb. 5: Korrekturverhalten einer Probandin

Abbildung fünf zeigt ein solches Korrekturverhalten einer Probandin. Nachdem sie statt eines großen A (A1 in digitaler Kurznotation) bereits das später notierte große G bei 21.143 Millisekunden anschlägt, wiederholt sie die Zählzeit komplett. Erst dann setzt sie ihren Vortrag fort. Als Folge verlängert sich die Zeitreihe dieser Probandin. Für die Analyse des einzelnen Durchlaufs ergeben sich daraus keine Schwierigkeiten. Für den statistischen Vergleich indes wirft es Probleme auf. So etwa, wenn die verschiedenen Durchläufe eines Probanden miteinander verglichen werden sollen oder gar das Gruppenverhalten.

Da die Zeitreihe mit jeder wiederholten Note nach hinten verrutscht, ist der Vergleich identischer Spielmomente nicht möglich. Daraus folgt auch, dass die Störstellen in unterschiedlich langen Zeitreihen in der Tabellenkalkulation nicht nebeneinander stehen. Ein statistischer Vergleich des Verhaltens nach Störstellen schiede aus. Die Daten der Probanden mit Wiederholungsnoten müssen jedoch berücksichtigt werden, da das Abweichen von der Notenvorlage oder aus einem gleichmäßigen Tempo das wesentliche Augenmerk dieser Studie ist.

Als Lösung wurden Zeitreihen aus den zuerst angeschlagenen Noten einer Zählzeit erstellt: Im geschilderten Fall ist dies das fehlerhafte große G bei 21.143ms. Die

nachfolgenden Noten werden in dieser zweiten Variante eliminiert. So werden die Messzeitpunkte dieser Zeitreihe mit anderen vergleichbar. Da in dieser Studie also Messzeitpunkte und nicht Anschläge individueller Noten die Datengrundlage bilden, wird in Zukunft von Zählzeiten gesprochen.
Zurück zum oberen Beispiel führt dies zu einer große Spanne von 1.005 Millisekunden bis zum Anschlag bei 22.148. Einen Durchlauf zuvor setzte die Probandin ihren Vortrag am gleichen Messzeitpunkt bereits nach 864 Millisekunden fort. Der Fehler und die Schwierigkeiten der Probandin werden somit quantitativ dokumentiert und vergleichbar. Zudem bleibt die qualitative Information einer falschen Tonhöhe (G statt A) erhalten.

2.4. Statistische Grundlagen

Nachdem die statistische Methodik in den vergangenen Jahrzehnten erhebliche Bedeutung in den Sozialwissenschaften gewonnen hat, wächst auch ihr Einfluss in den Geisteswissenschaften, insbesondere bei experimentellen Studien mit interdisziplinärem Ansatz. Die statistische Literatur liefert eine ganze Reihe gesicherter Verfahren, die auf Datensätze mit bekannten Parametern standardisiert angewendet werden können. Entsprechend können zulässige Methoden in geisteswissenschaftlichen Arbeiten zunächst knapp vorgestellt und über eine anschließende Methodendiskussion in ihrer Wirksamkeit und Praktikabilität besprochen werden.
Nach Wissen des Verfassers existiert bislang kein ausreichend geprüftes statistisches Verfahren, das sich auf die Messwerte dieser Studie anwenden ließe. Dafür gibt es drei Gründe: Zum einen sind Messzeitpunkt und Beobachtungsgegenstand identisch. Denn gefragt wird in dieser Studie nicht, wie sich Probanden – wie bei Zeitreihenanalysen üblich – zum Messzeitpunkt in einem anderen Merkmal als der Zeit verhalten. Vielmehr ist es die Willkür beziehungsweise die ausbleibende Willkür der Probanden zu einem zeitlich determinierten Akt, die hier beobachtet wird.
Damit entzieht sich zum anderen der Beobachtungszeitpunkt jeder Festlegung durch den Versuchsleiter. Zwar resultiert daraus nicht kausal eine fehlende Äquidistanz der Messzeitpunkte. Indes wäre alles andere als der zeitlich variable Akt in diesem Experiment völlig abwegig. Und wenn sich – sophistisch formuliert – dennoch völlig isochrone Tastenanschläge ergäben, erübrigte dies zugleich den Sinn dieser Studie.
Zum Dritten ist zu erwarten, dass den Zeitreihen weniger lineare Funktionen (Trends, stetige Tempoveränderungen) innewohnen als vielmehr periodische. Zwar ließen sich

diese durch Partielle Autokorrelationen entfernen (Bereinigung saisonaler Trends). Indes sind hier gleich mehrere sich überlagernde Funktionen durch die Metrik des Taktes zu erwarten, nämlich mindestens eine je Zahlzeit, wenn nicht gar überlagert von Funktionen für Perioden von Taktgruppen. Lägen nur zwei zu untersuchende Zeitreihen vor, böten sich hierfür Spektralanalysen an, die mit Frequenzzerlegungen arbeiten und auch in der Rhythmusforschung angewendet werden[81]. Jedoch steht in diesem Experiment die Frage nach einem möglichen Gruppenverhalten im Blick und damit der Vergleich von 21 Zeitreihen, überdies mit 14 Messungen.

Mithin ist ein Verfahren zu suchen, das die für jedes Individuum typische Metrik wie auch die ihnen charakteristischen Blockwerte eliminiert, nämlich das Grundtempo und die dem Probanden typische Schwankung, die nicht auf äußeren Einflüssen (Störstellen) beruht. Erst dann können standardisierte Verfahren eingesetzt werden, indem lediglich die Residuen der Messwerte miteinander verglichen werden. Die geeignete statistische Methode muss also hergeleitet werden, was einer ausführlichen Methodendiskussion gleichkommt. Deshalb nimmt diese Studie die Diskussion der statistischen Methoden bereits in den nächsten Kapiteln vorweg.

2.4.1. Zusammensetzung der Stichprobe

Stichproben sind zufällig aus einer Population entnommene Untersuchungseinheiten. In dieser Studie entstammen sie einer realen und endlichen Population Klavier spielender Studentinnen und Studenten, die zum Zeitpunkt der Erhebung Institute in Halle besuchten. Zufällige Stichproben setzen einen freien Zugang der Teilnehmer zur Stichprobe voraus[82]. Dies war der Fall, weil die Teilnahme freiwillig und keinem Mitglied der Population verwehrt oder erschwert war und jedes Mitglied der Population die Möglichkeit hatte, von der Einladung zum Versuch zu erfahren: Ein Jahr lang wurde an drei Instituten für eine Teilnahme unter bekannten Voraussetzungen per Aushang und persönlich in Seminaren geworben. Damit hatte jedes Mitglied der Population die gleiche Chance, in die Stichprobe aufgenommen zu werden.

Für das zu wählende statistische Verfahren ist zudem von Bedeutung, ob die Stichprobe repräsentativ ist. Werden an einem zufällig gewählten Vormittag in der Hauptgeschäftsstraße einer Großstadt Passanten befragt, ob sie für oder gegen den

[81] Fourier- und Walsh-Fourier-Analyse. Musial 2000, S. 346.
[82] Bortz 2000, S. 25.

Beitritt eines Landes zur EU seien, kann (bei ausreichender Teilnehmerzahl) angenommen werden, dass diese Stichprobe repräsentativ ist. Denn theoretisch hatte jede Person die Möglichkeit, an der Umfrage teilzunehmen.
Zwar besäße auch diese Stichprobe eine gewisse Homogenität, die sich auf das Ergebnis auswirken könnte: Schließlich wäre die Zahl Berufstätiger bedingt durch den Zeitpunkt und Ort der Erhebung mutmaßlich geringer als im Bundesdurchschnitt der Bevölkerung. Indes ist dies zum einen bekannt und kann statistisch berücksichtigt und auf die gesamte Population hochgerechnet werden. Zum anderen wäre die Stichprobe (bei ausreichender Teilnahme) ein genaues (repräsentatives) Abbild der Merkmalgruppe ‚Vormittags-Passant'.
Die Repräsentativität ist deshalb so bedeutend, weil einschlägige Signifikanztests und Randomisierungsverfahren[83] diese voraussetzen. Signifikanztests prüfen, ob Nullhypothesen – zu den Alternativhypothesen A bis C dieser Studie – mit einer bestimmten Grenzwahrscheinlichkeit (Signifikanzniveau) abgelehnt werden müssen. Signifikante Unterschiede zwischen Messwerten sind dabei jene, die auf dem gesetzten Signifikanzniveau nicht zufällig entstanden sein können, woraus ein Zusammenhang in den Daten geschlossen werden darf.
Die hiesige Stichprobe ist repräsentativ für die im Jahr 2005 an den musischen Instituten der Universitäten in Halle studierenden Pianistinnen und Pianisten. Begründet ist dies, weil sie Merkmale einer erschöpften Stichprobe zeigt: Trotz intensiver Werbung in Seminaren und durch Aushänge in den drei Instituten nahm der Zulauf zum Experiment schnell und erschöpfend ab. Selbst im Wintersemester 2005/2006 nahmen am Versuch überwiegend Studierende teil, die schon Mitte 2005 ihr Interesse bekundet hatten. Überdies zogen ältere Studentinnen und Studenten ihre Teilnahme zurück, nachdem sie die Universität inzwischen verlassen hatten.
Für das statistische Verfahren ist weiterhin entscheidend, dass die Datensätze jedes für sich genommenen Probanden als voneinander abhängig zu betrachten sind. Sie entsprechen dem Sonderfall abhängiger Stichproben bei Untersuchungen mit Messwiederholungen[84]. Dies gilt auch für Wiederholungen unter veränderten Bedingungen, etwa durch Störstellen und ihre wechselnden Größen in den Durchläufen. Dabei sind Wiederholungen unter verschiedenen Bedingungen nur dann konklusiv, wenn sie keinem zeitlichen Trend folgen und die Abfolge der Bedingungen losbestimmt ist[85].

[83] Zufällige Zuordnung der Verfahren zu den Versuchseinheiten.
[84] Ebda., S. 27.
[85] Ebda.

Wird jedoch das Gruppenverhalten betrachtet, können die Daten als unabhängig voneinander angesehen werden. Dazu müssen identische Zählzeiten miteinander verglichen werden: zum Beispiel die Dauer der ersten Zählzeit im zweiten Takt bei allen 21 Probanden. So liegen keine Wertepaare mehr vor, deren Einzelwerte einander bedingen können. Denn für den vierten Teilnehmer der Studie ist es unerheblich, wie der zwölfte oder die vierzehnte Teilnehmerin die erste Zählzeit im zweiten Takt angeschlagen hat.

2.4.2. Skalenniveau

Die Anwendung statistischer Verfahren ist auch abhängig von der Skala, auf der die Merkmale anhand der Messwerte abgebildet werden können. So beschreiben nominalskalierte Daten einander ausschließende Merkmale (Geschlecht, Religion, Farbe). Einen höheren Informationsgrad besitzen komparative Merkmale (größer/kleiner). Sie werden ordinal skaliert erfasst.
Den Messwerten dieses Experiments liegt darüber hinaus ein Maßsystem zu Grunde. Man spricht von metrischen Merkmalen. Weiterhin beziehen sich die Daten auf einen absoluten Nullpunkt, den Spielbeginn. Sie sind damit sogar verhältnisskaliert. Das Merkmal Tastenanschlag zum Zeitpunkt x ist auch ein so genanntes stetiges (kontinuierliches) Merkmal – seine Ausprägung kann alle reellen Zahlen annehmen.
Zudem ist bei der Betrachtung von Messwerten zwischen Quer- und Längsschnittdaten zu unterscheiden. Mit Längsschnittdaten (Verlaufs-, Zeitreihen) werden mehrere interessierende Phänomene im Zeitablauf erfasst. Unter einer Zeitreihe versteht man eine zeitlich geordnete Folge von Werten

$$X_t \; [\, t = 1, 2, \ldots, T \,]$$

die im Beobachtungszeitraum eine unveränderte sachliche und räumliche Abgrenzung aufweist[86]. Im vorliegenden Versuch sind diese Bedingungen durch das Merkmal der wiederholten Anschläge gegeben[87].

[86] Schulze 2000, S. 229.
[87] Die Aufgabe eines konstanten Tempos bleibt unverändert.

Dennoch weichen die Daten dieser Studie von klassischen Zeitreihen grundlegend ab. Denn üblich ist die Frage, ob nacheinander erhobene Merkmale zufällig aufeinander folgen (Nullhypothese) oder nicht (Alternativhypothese). Geprüft wird dazu die Wahrscheinlichkeit, dass die Folge der Merkmale bei gültiger Nullhypothese zustande kam[88]. Ist die Wahrscheinlichkeit gering, so kann überprüft werden, ob den Zeitreihen lineare oder periodische Trends innewohnen. Insbesondere in der Ökonometrie und den Sozialwissenschaften spielen diese Verfahren eine große Rolle. Die Verfahren setzen Messpunkte in gleichen Abständen voraus, wie zum Beispiel in der technischen Aktien-Analyse, der Erhebung von Arbeitslosenzahlen oder bei Tests zum Lernverhalten mit Werten vor und nach einem mutmaßlich beeinflussenden Ereignis (Prä-Post-Test).

Die hiesigen Daten sind aber fast ausnahmslos nicht äquidistant und das Merkmal Tastenanschlag ist binärer Natur – vorhanden oder nicht. Schulze (2000) schlägt Verfahren vor, die zeitliche Verteilungen von Ereignissen in unregelmäßigen Abständen bewerten lassen, etwa den Okkupanzentest[89]. Auch dieser eignet sich nicht für das hiesige Daten-Material, weil die Zeitachse in n gleiche Intervalle unterteilt werden muss, um die Besetzung mit Merkmalen zu zählen. Zwar ließen sich dadurch geschätzte und empirische Häufigkeiten ermitteln und vergleichen. Das Maß der Abweichung tatsächlicher Anschläge von jenen, die Grund der Notenvorlage und der bisherigen Tempogestaltung zu erwarten gewesen wären, ginge damit aber verloren.

Das grundlegende Problem der vorhandenen Zeitreihen besteht also wie in Kapitel 2.4. erwähnt darin, dass der Tastenanschlag (Beobachtungsgegenstand) keine vom Messzeitpunkt unabhängige Merkmalsausprägung besitzt, die für die Fragen dieser Studie wesentlich wäre. Zwar ließen sich die Anschlagstärken zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmen – eine kausale Aussage über zeitliche Abhängigkeiten motorischer Handlungen erlaubt dieser Parameter indes nicht. Trotz umfangreicher Studien statistischer Literatur und experimenteller Studien konnte kein geeignetes Verfahren zur sinnvollen Auswertung der Daten gefunden werden.

Eine Lösung kann die Bestimmung von Differenzen zwischen den Zeitpunkten erwarteter und tatsächlicher Tastenanschläge bieten. Hierin fände die an die Probanden gerichtete Aufgabe einer konstanten Tempogestaltung einen sehr plastischen statistischen Ausdruck. Im Sinn der Nullhypothese könnten die Größen der Differenzen zu den verschiedenen Zeitpunkten – zumindest im Vergleich der 21 Probanden[90] – als

---

[88] Bortz 2000, S. 545.
[89] Schulze 2000, S. 620.
[90] Siehe dazu auch Kapitel 2.4.1. Zusammensetzung der Stichprobe.

zufallsabhängig gelten und damit als Zufallsvariable aufgefasst werden. Die der Notenfolge vertikal innewohnenden Zählzeiten bildeten demnach äquidistante Zeitabstände der Größe eins.
Dabei tritt ein zuvor bereits angedeutetes Problem auf: Das Verfahren muss metrische Effekte der taktgebundenen Notenvorlage berücksichtigen, denn starke periodische (saisonale) Trends sind auf Basis betonter und unbetonter Zählzeiten zu erwarten. Beobachtet und bewertet werden sollen jedoch von Trends befreite Zeitreihen, es sei denn, Probanden erhöhen das Tempo erkennbar infolge von Störstellen, sei es in linearer Steigung oder durch einmalige Niveau-Anpassung. Insbesondere periodische (metrische) Schwankungen sollen durch das statistische Verfahren eliminiert werden, um die auf äußeren Einflüssen (Störstellen) beruhenden Temposchwankungen ermitteln zu können.

2.5. Herleitung des statistischen Verfahrens

2.5.1. Beschreibende Statistik

2.5.1.1. Autokorrelation

Als wichtige und durch die statistische Literatur gesicherte Hilfsmittel zur Erkennung von Mustern in Zeitreihen können Autokovarianzen sowie Autokorrelationen dienen[91]. Entgegen Kovarianzen und Korrelationen beziehen sie sich auf lineare Zusammenhänge sowie deren Stärke in derselben Zeitreihe[92]. Diese Art der Zeitreihenanalyse beruht auf der Theorie der stationären stochastischen Prozesse[93]. Ein solcher Prozess liegt dann vor, wenn eine (jede) Verteilung und damit die zugehörigen Momente von T aufeinanderfolgenden Zeitreihenwerten unabhängig von t sind[94].
Das heißt, die Korrelation von Zufallsvariablen verschiedener Zeitpunkte (Autokorrelation eines solchen stationären stochastischen Prozesses) hängt allein von der Zeitdifferenz der betrachteten Zufallsvariablen ab und nicht von der absoluten Zeit[95]. Deshalb ist die Korrelation zwischen den Variablen x_5 und x_{10} identisch zur Korrelation zwischen x_{12} und

---

[91] Schulze 2000, S. 239.
[92] Wird die Entwicklung einer einzigen Zeitreihe betrachtet, so bezeichnet man dies als univariate Zeitreihenanalyse (Ebda.). Der einzige erklärende Faktor ist dabei die Zeit (Voß 2004, S. 260).
[93] Ein stochastischer Prozess ist durch eine Menge (Familie) $X(t) = \{X_t, t \in T\}$ von Zufallsvariablen mit dem gemeinsamen Wertebereich E beschrieben. Der Wertebereich E wird als Zustandsraum bezeichnet und ist im Allgemeinen durch die reellen Zahlen gekennzeichnet. Der Parameterraum wird mit T beschrieben und hat im Allgemeinen die Bedeutung einer reellen Zeitvariablen.
[94] Schulze 2000, S. 238.
[95] Walz 2004, S. 125.

x_{17}, da die Differenz jeweils k = fünf Zeiteinheiten beträgt. Charakteristisch für diese Prozesse ist, dass sie einen konstanten Mittelwert (oder Erwartungswert) und eine konstante Varianz[96] besitzen[97].

Dem entspricht im hiesigen Versuch das Fehlen fest determinierter Messwerte. Stattdessen werden die Tasten am Klavier nur zu bestimmten Zeiten mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten angeschlagen. Das Streuungsmaß der zeitlichen Anschlagwerte auf dem Klavier kann durch die empirische Autokovarianz beschrieben werden. Die empirische Autokovarianz S_k zum lag (Abstand, Zeitverschiebung) k für k = 1, 2, 3, …, T-1 lässt sich definieren als

$$S_k = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T-k} (x_t - \bar{X})\,(x_{t+k} - \bar{X})$$

wobei das arithmetische Mittel $\bar{X}$ der Zeitdifferenzen bestimmt ist durch

$$\bar{X} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} x_t$$

Für k = 0 entspricht die Autokovarianz S_k gerade der empirischen Varianz der Zeitreihenwerte x_1, … x_T. Das heißt, die Streuung der Abweichungen jedes Tastenanschlags wird im Verhältnis zum arithmetischen Mittel der Abstände aller Tastenanschläge dargestellt. Die so erzielten Individualwerte zu jeder Note können einer Beurteilung des Probandenverhaltens im Zuge von Störstellen dienen.

Wird die empirische Autokovarianz S_k – wie bei einer Korrelationsanalyse üblich – durch die Varianz S_o dividiert, so erhält man die empirische Autokorrelation ρ_k zum Abstand k mit k = 0, 1, 2, …, T-1

[96] Sachs 2006, S. 70: „Die Streuung metrischer Daten wird durch eine gemittelte Abweichung vom Mittelwert gekennzeichnet. Dabei ist die Summe der Abweichungen als Maß ungeeignet (da sie stets gleich Null ist).“ Die Varianz hingegen als Quadrat des Streuungsmaßes Standardabweichung ist ungerichtet, berücksichtigt aber die Größenordnung der Streuung. Für metrische (kardinalskalierte) Daten gilt die Standardabweichung – und damit die Varianz – als wichtigstes Streuungsmaß. vgl. dazu Bortz 2000, S. 76.

[97] Voß 2004, S. 270.

$$\rho_k = \frac{S_k}{S_0} = \frac{\sum_{t=1}^{T-k} (x_t - \bar{X})\,(x_{t+k} - \bar{X})}{\sum_{t=1}^{T} (x_t - \bar{X})^2}$$

Die mathematische Funktion ρ_k ist abhängig vom Abstand k. Daher spricht man von Autokorrelation. ρ_k besitzt die Eigenschaften der Korrelationskoeffizienten von Bravais-Pearson: Für k = 0 gilt $\rho_0 = 1$. Die Funktion gestattet eine Aussage über einen möglichen Trend und periodische Schwankungen (Periodizitäten) innerhalb derselben Zeitreihe[98]. Geringe Werte für ρ_k deuten auf einen fehlenden Trend in der Zeitreihe hin (diese ist dann stationär). Hohe Werte für den Autokorrelationskoeffizienten zeigen Zusammenhänge für Werte in der Zeitreihe an, die k Zeitpunkte auseinander liegen.

„Da ein vorhandener Trend alle anderen Charakteristika der Zeitreihe dominiert, ist es sinnvoll ihn auszuschalten[99].“ Dies gilt auch für periodische Schwankungen, die sonstige Abweichungen – etwa durch externe Ereignisse wie etwa Störstellen – überlagern und unkenntlich machen können[100].

Die Notenvorlage lässt erwarten, dass die Probanden leichte und schwere Zählzeiten spielen. Bei strikter Beachtung der Aufgabe zu einem konstanten Tempo und hoher sensomotorischer Fähigkeit könnte es indes zu hohen positiven Korrelationen zwischen den Dauern benachbarter Zählzeiten kommen (lokales Tempo). Die Metrik würde von den Pianisten dann höchstens durch Akzente der Lautstärke über die Stärke des Anschlages interpretiert. Gelingt den Teilnehmern es hingegen nur ihr globales Tempo konstant zu halten, werden benachbarte Noten (k = 1) negative Zusammenhänge aufweisen. Geradzahlig auseinander liegende Noten werden mutmaßlich positiv korreliert angeschlagen, was ähnlichen Dauern entspricht.

---

[98] Mit zunehmendem k reduziert sich die Zahl der in die Rechnung eingehenden Wertepaare. Der Einfluss einzelner Wertepaare steigt entsprechend, sodass als Faustregel für den maximal anzunehmenden Abstand ein Viertel des Beobachtungsumfangs T angesetzt werden soll.

[99] Schulze 2000, S. 244.

[100] Gleichermaßen sind die Koeffizienten einer Zeitreihe mit Hilfe von so genannten Portmanteau-Tests auf Autokorrelationsfreiheit der Restkomponenten zu prüfen. Für Zeitreihen mit mehr als 100 Werten greift der Box/Pierce-Test. Die Auswahl eines geeigneten Wertes für k (Anzahl der Koeffizienten, die gemeinsam getestet werden sollen) ist nicht unproblematisch. Ist k zu niedrig, greift die Asymptotik der Chi-Quadrat-Approximation nicht. Auch ein zu großes K hat nicht gewünschte Effekte. Für kürzere Reihen wie im vorliegenden Fall wird der Test nach Ljung/Box eingesetzt. Dabei wird der Umfang des Datensatzes T durch T(T+2)/(T-K) ersetzt. Auch der Test nach Ljung/Box ist ein reiner Signifikanztest. Entsprechend werden alle hier ermittelten Autokorrelationskoeffizienten nach Ljung/Box überprüft.

2.5.1.2. Partielle Autokorrelation

Zwar nehmen die Zusammenhänge der Variablen in der Autokorrelation über größere Abstände meist deutlich ab. In vielen Fällen liefert sie dennoch signifikante Werte etwa für k gleich acht und mehr. Das hieße, die Zufallsvariable x_t habe Einfluss auf alle zukünftigen Beobachtungen x_{t+1} ... x_T[101]. Analog zum hiesigen Experiment entsteht die Frage, ob solche Korrelationen tatsächlich existieren: Wirkt sich die Dauer einer Zählzeit im zweiten Takt direkt auf die Tempogestaltung in Takt sieben aus? Oder ergeben sich die berechneten Korrelationen lediglich aus Korrelationen erster Ordnung, die in jeweils abgeschwächter Form auf größere Verzögerungen zurückwirken?
Ein Mittel zur präziseren Betrachtung k auseinander liegender Zählzeiten ist die Partielle Autokorrelation (PAK). Sie misst den linearen Effekt zwischen k voneinander entfernten Variablen x_k und x_{k-s} nach Beseitigung der Effekte der zwischen ihnen liegenden Variablen $x_{k-1}, \ldots, x_{k-s+1}$.

$$\rho_{k-1}(k) = \frac{\rho(k) - P_{k-1}\, P^{-1}_{k-1,\,k-1}\, \tilde{P}^{T}_{k-1}}{\sqrt{(1 - P_{k-1}\, P^{-1}_{k-1,\,k-1}\, P^{T}_{k-1})\,(1 - \tilde{P}_{k-1}\, P^{-1}_{k-1,\,k-1}\, \tilde{P}^{T}_{k-1})}}$$

Über die Partielle Autokorrelation lässt sich also die Stabilität der metrischen Gestaltung über sämtliche Takte ermitteln. Auch lässt sich die Partielle Autokorrelation auf ausgewählte Passagen – etwa nach Störstellen – anwenden. Dieses Verfahren eignet sich zur ersten Identifizierung und Bewertung entsprechender Passagen. Dennoch liefert der Koeffizient weiterhin keine Aussage über die Wirkung von Störstellen auf die folgende Tempogestaltung. Zudem eignen sich Autokorrelation und partielle Autokorrelation nicht für den paar- oder gruppenweisen Vergleich von Stichproben. Eine geeignete Methode zum Vergleich zumindest zweier Zeitreihen stellt die Kreuzkorrelation dar.

2.5.1.3. Kreuzkorrelation

Werden zwei Zeitreihen verglichen, kann sich das Phänomen der zeitverzögerten Korrelation auch zwischen den Zeitreihen als so genannte Kreuzkorrelation ergeben. Auch

[101] Kreiß 2006, S. 39.

lässt diese Analyse identische Zeitpunkte (Zählzeiten) in verschiedenen Durchläufen miteinander vergleichen. So kann die Kreuzkorrelation über alle Kombinationen des Datenbestandes gerechnet eine erste Aussage zum Gruppenverhalten der Versuchsteilnehmer liefern, insofern sie nacheinander auf Paare von Durchläufen angewendet wird, bis der gesamte Datenbestand erfasst ist.
So entsteht ein Vergleich zwischen unmanipulierten und manipulierten Durchläufen sowie nach Größen ihrer Störstellen. Unterscheiden sich verschiedene und gleichen sich gleich oder ähnlich beschaffene Durchläufe in der Tempogestaltung, wäre nach der Kreuzkorrelation zu klären, welche Noten die Unterscheidung erzeugen. Prinzipiell könnte die Kreuzkorrelation auch ausgewählte Notenbereiche untersuchen. Im Grunde ist sie aber kein Mittel zur Gruppenanalyse und dient daher zur Voruntersuchung der Datenstruktur. Sind X(t) und Y(t) zwei stochastische Prozesse zweiter Ordnung über dem gleichen Wahrscheinlichkeitsraum und es gilt t ist Element aus T, so heißt die mittels der Varianzen normierte Funktion

$$\rho_{x_t y_t} = \frac{\sum_{t=1}^{T} (x_t - \bar{X})\,(y_t - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{T} (x_t - \bar{X})^2}\sqrt{\sum_{t=1}^{T} (y_t - \bar{Y})^2}}$$

Kreuzkorrelation[102]. Wiederum dient der Pearson'sche Korrelationskoeffizient als Grundlage. Die bivariate Funktion misst die Stärke der Abhängigkeit zweier Wertereihen im Zeitverlauf. Damit eignet sich diese Methode zum paarweisen Vergleich aller Durchläufe eines Probanden oder dem Vergleich identischer Zählzeiten zweier.

2.5.1.4. Exkurs: Häufigkeitsverteilungen

Ein wesentliches Instrument der beschreibenden Statistik sind Häufigkeitsverteilungen. Ihr Nutzen für diese Studie wird deshalb vor der methodischen Einführung der schließenden Statistik geschildert. Gleichwohl haben die Kapitel zur Autokorrelation und partiellen Autokorrelation bereits angedeutet, dass die metrische Grundstruktur der Notenvorlage nicht unerhebliche Periodizitäten in den Zeitreihen erwarten lässt. Insbesondere Analysen

[102] Walz 2004, S. 126.

durch Häufigkeitsverteilungen können hierdurch massiv verfälscht werden, insofern das Datenmaterial nicht aufbereitet wird.

Die beschreibende Statistik befasst sich maßgeblich mit den Eigenschaften der Gesamtverteilung (Gesamtheit). Sie ist zudem unerlässlich, wenn für die Daten noch kein Modell – zum Beispiel eine Kenntnis über die Verteilungsform – vorliegt. Diese Erkenntnisse können mit den gängigen Methoden, etwa den Lagemaßen oder auch durch graphische Darstellung gewonnen werden. So geben Häufigkeitsverteilungen einen guten allgemeinen Überblick zur Datenstruktur.

In der beschreibenden Analyse werden die Lage und Tendenz[103], Maße der Streuung[104] der Messwerte sowie die Form[105] der Verteilung ermittelt. Um falschen Interpretationen auffälliger Verteilungen vorzubeugen, sind zusätzliche grafische Abbildungen (Histogramme) für die Beurteilung sinnvoll[106]. Hierzu werden via SPPS Klassen von Ereignissen (hier Spanne von Abweichungen in ms) gebildet und darauf die absoluten Häufigkeiten (Besetzungszahlen) in den Klassen bei jeder Verteilung ermittelt. Die Rechteckflächen im Histogramm sind dabei proportional zu den Anteilen an der Häufigkeitsverteilung.

Spätestens mit der Frage nach Häufigkeiten von Besetzungsklassen wird deutlich, welchen Einfluss die Metrik der Notenvorlage auf die Struktur der Daten ausübt. Vermutlich werden die Dauern aller Zählzeiten eines Probanden sich um zwei oder gar vier arithmetische Mittel sammeln. Die Verteilung wäre damit bi- oder quattromodal. Ein zugehöriges Histogramm würde anhand von Besetzungsklassen eine Verteilung mit mehreren Gipfeln zeigen. Entsprechend unterschiede sich das arithmetische Mittel (als zentrale Lage aller Messwerte) vom Modalwert, der die Mehrgipfligkeit berücksichtigt.

Die Metrik würde die eigentlich zu untersuchenden Abweichungen verdecken. Angenommen, erste und dritte Zählzeit eines jeden Taktes wären als betonte Zählzeiten länger als die unbetonten schwachen: So fiele eine Temposchwankung gleicher Größe bei den schwachen – kürzeren Zählzeiten – stärker ins Gewicht. Überdies war den Probanden das Grundtempo freigestellt: Schwache Zählzeiten der einen Teilnehmerin könnten demnach so lang sein, wie starke Zählzeiten eines anderen Probanden. Deshalb werden Häufigkeitsverteilungen zur Erkennung dieser Probleme erst eingesetzt, wenn die Periodizitäten nach Vorbild der partiellen Autokorrelation aus den Daten entfernt sind[107].

---

[103] arithmetische, geometrische oder harmonische Mittelwerte, Modalwerte und Mediane.
[104] Spannweite, Standardabweichungen und Varianz.
[105] Schiefe und Exzess.
[106] Sachs 2006, S. 80.
[107] Siehe zur Methodik Kapitel 2.5.2.5. sowie zur Auswertung 3.2.5.

Zudem müssen das Grundtempo sowie die individuelle Schwankung, die nicht auf äußere Einflüsse zurückgeht, als Block aus den Werten entnommen sein.

2.5.2. Schließende Statistik

2.5.2.1. Verteilungen und Verfahren – parametrische vs. nichtparametrische Tests

Ziel der hiesigen Studie muss es sein, für jeden Zeitpunkt x in der Notenvorlage einen Erwartungswert ¥ für den Tastenanschlag zu errechnen. So entstünden Zeitreihen aus Erwartungswerten, von denen die tatsächlich gemessenen Anschläge in Richtung und absoluter Größe abweichen können. Erst dadurch ließen sich Werte für die so genannte Residualkomponente ε bestimmen, die eine Aussage über eine zufällige oder unzufällige Abweichung eines Variablenwerts ermöglicht. „In ihr drücken sich die unvorhersehbaren, nicht regelmäßig wiederkehrenden Einflüsse[108]“ aus.
Wie zuvor in Kapitel 2.4.1. beschrieben, sind die Datensätze eines Probanden als voneinander abhängig zu betrachten. Sie entsprechen dem Sonderfall abhängiger Stichproben bei Untersuchungen mit Messwiederholungen. Dies gilt auch für Wiederholungen unter veränderten Bedingungen, etwa durch Störstellen. Wesentlich ist zudem, dass mit Ausnahme absehbarer und durch partielle Autokorrelationen bestimmbare Periodizitäten – und damit annehmbare Häufungen von Messwerten rund um vier Zentralwerte – dennoch die Form der Verteilungen der Messergebnisse nicht vorhergesagt werden kann. Zwar bieten grafische Verfahren zu Häufigkeitsverteilungen einen ersten Überblick[109]. Inwieweit die empirische Verteilung um einen kritischen Wert von einer theoretischen Verteilung – zum Bespiel der Normalverteilung als Voraussetzung varianzanalytischer Test-Methoden – abweicht, können grafische Verfahren indes nicht sagen.
Eine solche Vorhersage durch Tests auf Verteilung entscheidet jedoch über das zu verwende Verfahren eines Hypothesen-Tests, der die Nullhypothesen zu den Alternativhypothesen A bis C dieser Studie bestätigen oder verwerfen könnte. Standardisierte Verfahren zur Ermittlung der Verteilungsform haben dabei Voraussetzungen, die vom hiesigen Daten-Material zumindest in Teilen nicht erfüllt werden: So beruht etwa der Quotienten-Test R/s auf dem Verhältnis zwischen Spannweite und Standardabweichung der Verteilung. Selbst vereinzelte extreme Ausreißer gefährden

[108] Bohley 2000, S. 269.

die Stabilität dieses Tests damit erheblich. Zudem wird der Test als anfällig bei stark überspitzten Verteilungen beschrieben[110].

Tests auf Anpassung an verschiedene Verteilungsformen[111] wie der Chi-Quadrat-Test arbeiten mit Besetzungszahlen, müssen die Daten also klassifizieren. Wiederum spielen extreme Ausreißer eine besondere Rolle, da etwa ein fehlender Anschlag nach obigem Beispiel zahlreiche unbesetzte Klassen zwischen seiner Klasse und jenen erzeugte, die sich um den Mittelwert scharen. Die mindestens einmalige Besetzung von Klassen ist für Anpassungstests aber von nicht unerheblicher Bedeutung[112]. Der Chi-Quadrat-Anpassungstest lässt sich als Verteilungstest hingegen gut anwenden, wenn Klassen so zusammengeführt werden können, bis keine leeren Klassen mehr vorhanden und nicht allzu viele Klassen kleiner als dreifach besetzt sind[113].

Der Test prüft, wie viele Beobachtungen im Mittel in einer Klasse liegen müssen, wenn die empirische Verteilung tatsächlich der theoretischen (hier Normalverteilung) folgt. Hierzu wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, nach der die Beobachtungen in die bestimmte Klasse fallen. Insofern der Chi-Quadrat-Anpassungstest eine angenäherte Normalverteilung der Daten bestätigt, könnten parametrische Analyse-Verfahren – zum Beispiel varianzanalytische Methoden – eingesetzt werden.

2.5.2.2. Verteilungsfreie Tests für k abhängige Stichproben

Verteilungsfreie (nichtparametrische) Verfahren haben große Vorteile, da „man praktisch überhaupt keine Kenntnisse über die den Daten zugrundeliegende Verteilungsfunktion zu haben braucht[114]." Bortz und Lienert schildern die schwierige Suche nach einem für k abhängige Stichproben geeigneten Verfahren ausgiebig[115]. Anstatt einen verteilungsfreien Test für abhängige Daten zu entwickeln, entfernen sie die Abhängigkeit der Strukturen und rechnen mit Tests für unabhängige Daten. Auch Sachs argumentiert, dass dieses Verfahren unter anderem zur Normalisierung der Daten beitrage, wobei aber die Varianz der eigentlichen Beobachtungskomponente – etwaiger, unzufälliger Temposchwankungen – nach Bortz unverändert bleibt[116]. „Verfahren dieser Art lassen sich ... einfach

---

[109] Siehe Kapitel 3.2.4. f.
[110] Sachs 2006, S. 327.
[111] Normalverteilung, Log-Verteilung, Gleichverteilung etc.
[112] Sachs 2006, S. 333f.
[113] Der weithin eingesetzte Kolmogoroff-Smirnoff-Test entscheidet sensitiver in der Mitte der Daten als an den Rändern. Zudem müssen Erwartungswert und Streuung bekannt sein. Die Streuung ist hier aber nicht bekannt.
[114] Sachs, S. 325.
[115] Insbesondere Bortz 2003 und 2005 sowie Sachs 2006, Kreiß 2006 und Backhaus 2006.
[116] Bortz 2000, S. 318.

konstruieren, wenn man die Abhängigkeitsstruktur der Daten dadurch eliminiert, dass man von den Messwerten eines jeden Individuums den jeweiligen durchschnittlichen Messwert subtrahiert[117]."

Dies könnte das dem Probanden eigene Grundtempo im jeweiligen Durchlauf sein. Übrig blieben absolute Abweichungen vom Mittelwert in beiden Richtungen, siehe dazu auch Kapitel 2.5.2.5. Der Vorteil bestünde zudem darin, dass verschiedene Durchläufe auch unter den Probanden vergleichbar wären, da verschiedene Grundtempi die jeweiligen Abweichungen in ihrer Größenordnung nicht mehr verzerren. Überdies eignen sich diese derart bereinigten, vormals abhängigen Stichproben für Tests auf Mittelwertsvergleiche[118], da der hier beschriebene Vorgang im Kern eine Streuungszerlegung darstellt[119]. Über einen Umweg tritt damit das zuvor erwähnte parametrische Verfahren der Varianzanalyse wieder in den Vordergrund.

2.5.2.3. Varianzanalytische Methoden

Durch Varianzanalysen kann untersucht werden, ob beim Zustandekommen von Messwerten in verschiedenen Gruppen unterschiedliche Gesetzmäßigkeiten herrschten. Dazu werden die Varianzen zwischen den und innerhalb der Gruppen miteinander verglichen. Unterschiedliche Gesetzmäßigkeiten drücken sich dabei durch substanziell abweichende Varianzen aus. Ist das der Fall, spricht man davon, dass die Verteilungen (Streuungen der Messwerte jeder Gruppe) unterschiedliche Erwartungswerte besitzen.

„Eine besondere Rolle spielen hierbei die Vergleiche von Mittelwerten[120]." Mit Bezug auf diese Studie könnte eine Varianzanalyse prüfen, ob sich das Tempo und dessen Schwankung in bestimmten Notenfolgen bei einem Probanden über die verschiedenen Durchläufe signifikant unterscheiden. Zudem können die Passagen gruppenweise verglichen werden. Überdies gestattet es die Varianzanalyse, wesentliche von unwesentlichen Einflussgrößen zu unterscheiden. In besonderem Maße eignet sie sich zur Messung des Einflusses nominalskalierter unabhängiger Variablen – zum Beispiel persönlicher Merkmale der Probanden – auf eine abhängige Variable metrischer Skalierung[121].

---

[117] Ebda.
[118] Ebda.
[119] Sachs 2006, S. 454.
[120] Ebda., S. 418.
[121] Backhaus 2006, S. 120.

Der letztgenannte Aspekt stellt das vornehmliche Anwendungsgebiet der Varianzanalyse dar, etwa zur Untersuchung der Wirksamkeit von Werbung (unabhängige Variable) auf den Absatz eines Produktes (abhängige Variable) oder der Verpackungsgröße eben darauf. Ihr Einsatz im Rahmen von Zeitreihenanalysen ist in der Literatur nahezu unbeschrieben[122]. Entsprechend erschiene ihre Anwendung im Rahmen dieser Studie zunächst plausibler, um vermeintliche Zusammenhänge zwischen persönlichen Merkmalen der Probanden und ihrer Tempogestaltung zu prüfen: zum Beispiel die Wirkung der Faktoren Orgelspieler, Händigkeit oder Spielpraxis (unabhängige Variablen) auf die Konstanz des Tempos (abhängige Variable).
Zudem kann die Varianzanalyse prüfen, ob und wie stark das Wissen um die manipulative Situation die Tempogestaltung der informierten Gruppe vergleichsweise zur unwissenden Gruppe stabilisiert oder nicht. Mithin, ob in den ersten Durchläufen ein Überraschungseffekt bei den nicht informierten Probanden auftritt. Aber für die Zeitreihenanalyse ist die Varianzanalyse ursprünglich nicht konzipiert worden. So setzt sie als parametrisches Instrument Normalverteilung und Gleichheit der Varianzen voraus[123]. Beide Komponenten sind bei den Verteilungen der hiesigen Studie jedoch unbekannt. Der Einsatz varianzanalytischer Methoden als universelles Instrument ist für diese Studie jedoch aus mehreren Gründen reizvoll:

1) Verbleib maßzahliger Strukturen auf Basis von Mittelwertsvergleichen

2) Zudem bemisst die Varianzanalyse Zusammenhänge quantitativ: Die Größe des Varianzquotienten ist damit ein Argument für die Stärke eines Zusammenhanges.

3) Die Varianzanalyse prüft anhand der Gleichheit von Erwartungswerten[124], denen in dieser Studie eine große Bedeutung zukommt.

4) Mit ihr kann der Einfluss von Faktoren auf den Beobachtungsgegenstand ermittelt werden.

5) Die Varianzanalyse ist in ihrer konventionellen Anwendung ausreichend beschrieben.

„Wesentlich für die einfache Varianzanalyse, auch einfache Streuungszerlegung genannt, ist, dass sich die Summe der Abweichungsquadrate ($SAQ_{insgesamt}$) der Stichprobenwerte

[122] vgl. und Ausnahme dazu Sachs 2006 und Bortz 2000.
[123] Sachs 2006, S. 418.
[124] Ebda.

um das Gesamtmittel $\bar{X}$ in zwei Anteile zerlegen lässt, in die Summe der Abweichungsquadrate der Einzelwerte um die Gruppenmittelwerte ($SAQ_{innerhalb}$) und die Summe der Abweichungsquadrate der Gruppenmittelwerte ($SAQ_{zwischen}$) um das Gesamtmittel

$$SAQ_{insgesamt} = SAQ_{innerhalb} + SAQ_{zwischen}$$

$$\sum_{i,j} (x_{ij} - \bar{X})^2 = \sum_{i,j} (x_{ij} - \bar{X}_{i.})^2 + \sum_{i} n_i \, (x_{i.} - \bar{X})^2$$

Streuungszerlegung: Der Punkt deutet den Index an, über den summiert wurde.

mit den zugehörigen Freiheitsgraden[125]“

$$(n-1) = (n-k) + (k-1)$$

Um zu testen, ob die jeweiligen Gruppen derselben Grundgesamtheit entstammen – das Tempoverhalten der Probanden trotz einiger Unterschiede und deutlicher Ausreißer insgesamt homogen ist –, müssen die Varianzen miteinander verglichen werden. Dazu werden im Fall der hier zunächst geschilderten einfachen Varianzanalyse die Summen der Abweichungsquadrate durch ihre zugehörigen Freiheitsgrade geteilt. Es ergeben sich die jeweiligen Varianzen $MQ_{zwischen}$ (auch Stichprobenfehler genannt) und $MQ_{innerhalb}$ (auch Versuchsfehler genannt). Der Varianzquotient $\hat{F}$ errechnet sich demnach wie folgt:

$$\hat{F} = \frac{MQ_{zwischen}}{MQ_{innerhalb}} = \frac{\frac{1}{k-1} \sum_{i} n_i \, (\bar{X}_{i.} - \bar{X})^2}{\frac{1}{n-k} \sum_{i,j} (x_{ij} - \bar{X}_{i.})^2} = \frac{\frac{1}{k-1} \sum_{i} n_i \, (\bar{X}_{i.} - \bar{X})^2}{\frac{1}{n-k} \sum_{i} s^2_i \, (n_i - 1)}$$

Einfache Varianzanalyse mit dem Varianzquotienten $\hat{F}$: $\bar{X}_{i.}$ ist der Mittelwert der Stichprobe *i*, $\bar{X}$ der Gesamtmittelwert.

Sind der Stichprobenfehler und der Versuchsfehler etwa gleich groß, entstammen die Gruppen der gleichen Grundgesamtheit (Gesamtheit). Das heißt: Beim Zustandekommen

[125] Ebda., S. 424.

der Verteilungen wirkten keine unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten (unterschiedliche Erwartungswerte). Abweichungen der Messwerte entspringen dann mit einer zuvor zu bestimmenden Irrtumswahrscheinlichkeit (gesetztes Signifikanz-Niveau) nur dem Zufall. Indes eignet sich die einfache Varianzanalyse wie zuvor erwähnt nur für Stichproben mit normalverteilten Streuungen.
Streng genommen müsste zusätzlich der so genannte Beta-Fehler geschätzt werden, der sich ergeben kann, wenn das Signifikanzniveau (alpha), auf dem die Verteilungen varianzanalytisch untersucht werden, sehr hoch, die Irrtumswahrscheinlichkeit alpha also sehr niedrig (streng) angesetzt worden ist. Indes ist die Untersuchung des Beta-Fehlers überaus aufwendig, wenn die Effektgröße unbekannt ist. Häufig wird in der Literatur daher ein weniger strenges Niveau für alpha gleich fünf Prozent empfohlen. Zur Sicherheit werden in den Varianzanalysen dieser Studien zudem die kritischen F-Werte für ein alpha von 0,25 und 0,01 angegeben.

2.5.2.4. Blockvarianzanalyse

„Das Problem der vollständigen Nutzung nicht normalverteilter Messwerte zur Signifikanzprüfung wurde bereits früh von Fisher (1936) in Angriff genommen und von Pitman (1937) systematisch bearbeitet. Zur Lösung dieses Problems dient unter anderem das so genannte Randomisierungsverfahren[126], weshalb die einschlägigen Signifikanztests auch Randomisierungstests heißen[127].“ Sie sind bedingte Tests, setzen also voraus, dass die vorliegenden Stichproben genaue (repräsentative) Abbilder der Population sind. Wie in Kapitel 2.4.1. beschrieben, kann dies für diese Studie angenommen werden, weil der Zulauf zum Versuch trotz intensiver persönlicher Werbung in Seminaren sowie durch Aushänge dennoch schnell und erschöpfend abnahm.
„Die Randomisierung auch auf den Vergleich von k abhängigen Stichproben anzuwenden, war von Fisher-Pitman ursprünglich nicht intendiert; sie kann jedoch mit ähnlichen Überlegungen auf den Vergleich mehrerer abhängiger Stichproben übertragen werden[128].“ Hierzu kann die Varianzanalyse als Zerlegung der Streuung in wesentliche und

[126] Sachs 2006, S. 471: „Die Idee der zufälligen Zuordnung der Verfahren zu den Versuchseinheiten, kurz Randomisierung genannt ... kann als Grundlage jeder Versuchsplanung angesehen werden. Durch sie erhält man eine erwartungstreue Schätzung des interessierenden Effektes, eine erwartungstreue Schätzung des Versuchsfehlers und eine verbesserte Normalität der Daten. Damit werden unerwünschte und unbekannte Korrelationssysteme zerstört, so dass ... Standard-Signifikanztests“ angewendet werden dürfen. Bei der Randomisierung werden einige unter allen Verteilungen zufällig für die Prüfverteilung ausgewählt.
[127] Bortz 2000, S. 295.
[128] Ebda., S. 318.

unwesentliche Einflussgrößen für Messwiederholungen (abhängige Stichproben) zu einer so genannten Blockvarianzanalyse erweitert werden[129].

Dies schlägt sich im einzusetzenden Prüfverfahren nieder, indem der Stichprobenfehler $MQ_{innerhalb}$ weiter in die so genannte Residualvarianz $MQ_{residual}$ mit einem Streuungsanteil MQ_{block} zerlegt werden kann[130]. MQ_{block} ist dabei individuell für jede *i*-te Stichprobe individuell zu erklären. Das kann zum Beispiel ein allen Stichprobenwerten gemeinsamer Grundwert sein. Bei Messwiederholungen kann dies der jeder Messreihe individuelle Mittelwert sein, zu dem die Einzelwerte als zu beobachtendes Moment ihre Abweichung (zum Beispiel in ms) dokumentieren. MQ_{block} darf also nicht mit dem gemeinsamen Mittelwert aller i Stichproben verwechselt werden[131].

$$SAQ_{insgesamt} = SAQ_{innerhalb} + SAQ_{zwischen} + SAQ_{block}$$

Dieser Grundwert ließe sich aus dem Nenner entfernen, wodurch die Teststatistik gegenüber der einfachen Varianzanalyse eine erhöhte Stärke besitzt.

$$\hat{F} = \frac{MQ_{zwischen}}{MQ_{innerhalb}} = \frac{\frac{1}{k-1} n \sum_{i=1}^{k} (\bar{X}_{i.} - \bar{X})^2}{\frac{1}{(n-k)(k-1)} \sum_{i,j} (x_{ij} - \bar{X}_{i.} - \bar{X}_{j.} + \bar{X})^2}$$

Blockvarianzanalyse für k abhängige Stichproben mit dem Varianzquotienten $\hat{F}$: $\bar{X}_{i.}$ ist der Mittelwert der Stichprobe *i*, $\bar{X}_{j.}$ des zu definierenden Anteils Block und $\bar{X}$ der Gesamtmittelwert.

Durch die Methode der Blockvarianzanalyse kann die Abhängigkeit der Datenstruktur entfernt werden, indem den Messwerten jedes Individuums zum Beispiel der kleinste gemeinsame Wert – die nicht von äußeren Einflüssen bedingte, individuelle Schwankung – abgezogen wird. Indes wäre dies sinnlos, wenn dadurch die Spannweite der Verteilung nur unwesentlich verändert wird.

Angenommen, Probanden spielten im arithmetischen Mittel Zählzeiten von 500ms Länge (120 Schläge pro Minute), und weitere Lagemaße – die den häufigst gespielten Wert und den Schwerpunkt der Verteilung wiedergeben – befänden sich nahe des arithmetischen

[129] Sachs 2006, S. 454.
[130] Bortz 2000, S. 318 und Sachs 2006, S. 454.
[131] Sachs 2006, S. 71 und 455.

Mittels. So wäre eine geringe Standardabweichung zu erwarten, jedoch könnten einzelne Ausreißer die Spannweite der Streuung stark dehnen. Existieren extrem kurze Zählzeiten, etwa, dass ein Proband einen Verspieler der Tonhöhe bereits nach 70ms zu korrigieren sucht und neu anschlägt, könnten die Werte der Gesamtverteilung lediglich um den gemeinsamen Grundwert 70ms reduziert werden. Eine effektive Erhöhung der Teststärke – wie Sachs sie fordert – ist in einem Verhältnis 70 zu 500 bei einer ansonsten gering gestreuten Verteilung nicht zu erkennen.
Vielversprechender könnte es sein, an Stelle der Beträge der empirischen Werte (Dauer der Zählzeit) auch ihre gerichtete Abweichung von ihrem Mittelwert (Erwartungswert) zu betrachten. So könnten seltene n Ausreißer mit einem jeweils hohen Wert x in ihrem geringen Vorkommen gegenüber zahlreichen n Abweichungen von geringem x gewürdigt werden, und zwar ausgehend von einem Nullniveau, wodurch das individuelle Grundtempo keine Rolle mehr spielt. Zusätzlich muss für einen wirklich verteilungsfreien Test k abhängiger Stichproben eine weitere Besonderheit der Datenstruktur beachtet werden: die schon angedeutete Metrik der Notenvorlage.

2.5.2.5. Absolute Abweichungen vom periodischen Mittelwert

Da für die Zählzeiten im Vortrag der Probanden metrische Strukturen zu erwarten sind, kann jeder *i*-ten Zeitreihe durch eine Blockvarianzanalyse nicht nur ein einzelner Mittelwert entnommen werden. Die Mittelwerte der vier Zählzeiten jedes Taktes würden sich über die Zeitreihe betrachtet zu stark unterscheiden. Aus diesem Grund wird auf das Prinzip der Partiellen Autokorrelation zurückgegriffen, die periodische Effekte aus den Daten filtert. Dazu wird der periodische Mittelwert $\not{X}$ als Erwartungswert für x_{ij} und alle t = ±4 entfernten empirischen Variablenwerte definiert. Damit werden die in allen Takten metrisch identischen Zählzeiten zusammen erfasst.

$$\not{X} = \frac{t}{T} \sum_{t=4}^{T} x_t$$

Um die Residualkomponente ε zu ermitteln, wird der tatsächliche Messwert x_{ij} der spezifischen Zählzeit von seinem Erwartungswert $\not{X}$ (periodischer Mittelwert) subtrahiert.

Nicht nur wird das mittlere Grundtempo X_i[132] des jeweiligen Probanden entfernt, sondern auch sein in Abhängigkeit der Position des gegebenen x_{ij} in der Notenvorlage individuell metrisches Verhalten. Zurück bleiben Abweichungen in Millisekunden, und zwar in beiden Richtungen vom Erwartungswert. Die Datensätze (Zeitreihen) sind nunmehr unabhängig vom Grundtempo und der metrischen Individualität. Damit wird nicht nur eine zweite Zählzeit in Takt drei – zum Beispiel des fünften Probanden – mit ihrem Pendant in Takt sieben vergleichbar, sondern auch mit beiden Noten in der Gestaltung durch die Teilnehmerin dreizehn im gleichen Durchlauf und sogar in ihrem Verhalten in anderen Durchläufen. Dies gilt im besonderen Maß für die Begutachtung des Gruppenverhaltens, obwohl den Probanden die Wahl des Grundtempos freisteht.

$$\varepsilon = x_{ij} - \bar{x}_{ij,t}$$

Zudem ermöglicht die Restkomponente den Vergleich absoluter Abweichungen mit absoluten Dauern von Störstellen. Hierdurch kann ein direkter Bezug hergestellt werden, etwa, ob es einen linearen oder anderen funktionalen Zusammenhang zwischen der Größe einer Störstelle und anschließenden Schwankungen des Tempos gibt. Auch zur Bestimmung eines angenommenen, neurophysiologischen Schwellenwerts der Kopplung auditiver Reizverarbeitung und mechanozeptischer Koordination ist dies die geeignete Grundlage. Die erhaltenen Zeitreihen aus absoluten Abweichungen vom Erwartungswert (periodische Mittelwertsabweichungen ε) dienen im Rahmen dieser Arbeit daher als Basis aller weiterer Verfahren.

Wie zuvor erwähnt, bleibt die Fehlervarianz der ursprünglichen Messwerte vorhanden. Enthalten ist nach wie vor die individuelle Schwankung jedes Probanden, seine ihm eigene Tempopräzision, die nicht von äußeren Einflüssen abhängt. Bei einem Teilnehmer mit stabilen Schwankungen von plusminus 30ms fallen zusätzliche zehn Millisekunden infolge einer Störstelle anders ins Gewicht als bei einem Spieler, der lediglich um 15ms schwankt. Es ist also sinnvoll, mit periodischen Mittelwertsabweichungen statt einer herkömmlichen Varianzanalyse dennoch eine Blockvarianzanalyse zu rechnen, die diese – neben dem Grundtempo und der metrischen Gestaltung – dritte individuelle Komponente durch den Term MQ_{block} entfernt. Damit ist in einem dritten Schritt „die Abhängigkeitsstruktur der Daten dadurch eliminiert (worden), dass man von den

[132] Als arithmetisches Mittel des gesamten Durchlaufs.

Messwerten eines jeden Individuums den jeweiligen durchschnittlichen Messwert subtrahiert[133]."

2.5.2.6. Das Problem der Randomisierung

Für zulässig erklären Bortz und Lienert ihr Verfahren für k abhängige Stichproben jedoch erst im Zusammenhang mit der so genannten Randomisierung (Permutation). Diese floss in die bisherigen Überlegungen nicht ein und muss jetzt berücksichtigt werden. Ziel der Randomisierung ist der Vergleich der Reihenfolge tatsächlicher Messergebnisse mit allen Reihenfolgen, die theoretisch hätten eintreten können. Weicht der empirische Wert erkennbar von den allermeisten theoretischen Werten ab, so kann seine Zufälligkeit nicht sinnvoll behauptet werden.
Zur Randomisierung werden tatsächlich ermittelte empirische Varianzquotienten mit theoretischen Varianzquotienten verglichen. Im Rahmen dieser Studie basiert der theoretische Varianzquotient auf allen denkbaren Reihenfolgen der tatsächlich gemessenen Dauern von Zählzeiten in einer jeweiligen Zeitreihe. Um etwa zu prüfen, ob sich die Tempogestaltung einer bestimmten Notenfolge bei einem Probanden in seinen verschiedenen Durchläufen nicht zufällig unterscheidet, würden die periodischen Mittelwertsabweichungen innerhalb jeder Zeitreihe in Permutation ihrer k^{n-1} möglichen Anordnungen verglichen. Wird der tatsächlich gemessene Wert weit überwiegend nicht von den permutierten Varianzquotienten übertroffen, kann ein zufälliger Unterschied zwischen den verglichenen Passagen nicht sinnvoll behauptet werden.
Jedoch erzeugt die Datenfülle dieser Studie ein nicht zu lösendes Problem für Permutations-Tests: k^{n-1} mögliche Messwertanordnungen bedeuteten 34 hoch 13 theoretische Verteilungen (34 Anschläge hoch 13 weitere Durchläufe) und diese wären für 21 Probanden zu bilden. Es resultierten rund 1.7 Trilliarden[134] theoretische Verteilungen. Ein Verfahren zur automatisierten Gewinnung dieser Verteilungen ließ sich weder mit Excel und SPSS bilden noch durch intensive Suche in themennahen Chat-Rooms finden, etwa in Online-Auftritten gängiger Computer-Magazine.
Angenommen, entsprechende Matrizen würden von einer Person per Hand permutiert, so dauerte der Vorgang – 20 Sekunden pro Verteilung angesetzt – geschätzte 1.08 Billiarden

[133] Bortz 2000, S. 318.
[134] 1.703.904.368.156.874.153.984.

Jahre[135]. Diese Rechnung klingt absurd und zeigt dennoch die Schwierigkeit auf, standardisierte Verfahren auf die Daten dieser Studie anzuwenden. Gleichzeitig ist die Absurdität dieser Aufwandsrechnung ein weiteres Plädoyer für die hier gewählte statistische Vorgehensweise[136]. Demnach wäre es ein brauchbarer und gebotener Weg, die Verlässlichkeit der Ergebnisse aus den Blockvarianzanalysen in diesem Testumfeld zu hinterfragen, indem die bislang stiefmütterlich behandelten Rangdatentests für k abhängige Daten kontrollierend hinzugezogen werden.

2.5.2.7. Nichtparametrischer Test zur Kontrolle der Blockvarianzanalyse

Als geeignetes Instrument erweist sich der Friedman-Test „für den verteilungsunabhängigen Vergleich mehrerer verbundener Stichproben von Messwerten hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz[137]." Der verallgemeinerte Vorzeichenrangtest (Rangvarianzanalyse) eignet sich besonders bei einfaktoriellen Messwiederholungen für n Probanden, die im Versuch k Stufen des Faktors ausgesetzt sind. Damit „ist der Friedman-Test das verteilungsfreie Pendant zur einfaktoriellen parametrischen Varianzanalyse mit Messwiederholungen oder Blockplänen[138]."

$$\chi_r^2 = \frac{12}{n * k * (k+1)} * \sum_{j=1}^{k} T_j^2 - 3 * n * (k+1)$$

Summe der Quadrate der Spaltenrangsummen T_j für die k zu vergleichenden Bedingungen

Der Friedman-Test untersucht die Homogenität verschiedener Verteilungen, indem er (ähnlich dem Median-Test) die zentrale Tendenz mehrerer Verteilungen heranzieht. Dies unterscheidet ihn zusätzlich von der Varianzanalyse, die etwaige Unterschiede im arithmetischen Mittel der Verteilungen aufdeckt. Bei leicht schiefen Verteilungen können zwischen diesen unterschiedlichen Maßen durchaus verschiedene Ergebnisse eintreten. Deshalb sollte ein Test auf Homogenität der Varianzen wie der Bartlett-Test hinzugezogen werden,

[135] Auf zwei Stellen gerundet: 1.080.609.061.489.646,22 bei ununterbrochener Arbeit.
[136] Zur mangelnden Ökonomie verschiedener Randomisierungstests vergleiche auch Bortz 2000, S. 308f., Bortz 2003, S. 213 und Sachs 2006, S. 412.
[137] Sachs 2006, S. 456.
[138] Bortz 2003, S. 186.

der Schiefe und Wölbung berücksichtigt und damit die Ursache für verschiedene Ergebnisse zwischen Varianzanalyse und Friedman-Test begründen ließe[139].
Für nicht zu kleine n ist die Teststatistik des Friedman-Tests angenähert wie Chi-Quadrat für k-1 Freiheitsgrade verteilt. Werden die kritischen Werte der Chi-Quadrat-Verteilung durch die Werte des Friedman-Tests übertroffen, sind die entsprechenden Nullhypothesen – verglichene Verteilungen unterschieden sich nicht oder nur zufällig voneinander – abzulehnen.

2.5.2.8. Tests zur Untersuchung persönlicher Merkmale

Wie erwähnt, setzt der Friedman-Test ein Minimum an Individuen, aber auch Messwiederholungen k voraus[140]. Sollen Einflüsse persönlicher Merkmale von Probanden auf die Tempostabilität in manipulativen Situationen des Versuchs ergründet werden, liegen indes zweistufige Variablen vor: Organist ja/nein, reiner Rechtshänder ja/nein oder Vorwissen ja/nein. Entsprechende Datensätze böten die Möglichkeit zur mehrfaktoriellen Varianz- oder der Faktorenanalyse. Denkbar ist auch der paarweise Vergleich über zweifaktorielle Varianzanalysen. Der Friedman-Test scheidet dann aber als Kontrollgröße aus, da k kleiner als drei ist (Sachs 2006)[141].
Das in der Literatur wohl am häufigsten empfohlene, nichtparametrische Verfahren zur Rang-Daten-Analyse paarweise verbundener Stichproben ist der Paardifferenzen-Test nach Wilcoxon. „Der Test gestattet die Prüfung, ob die Differenzen paarig angeordneter Beobachtungen symmetrisch mit dem Median gleich null verteilt sind, das heißt unter der Nullhypothese entstammen die Paardifferenzen einer Grundgesamtheit[142].“ Vor allem eignet sich der Wilcoxon-Test für die Untersuchung mutmaßlich systematischer Tempo-Abweichungen vor dem Hintergrund persönlicher Merkmale, weil er sowohl die Richtung als auch die Stärke der Differenzen berücksichtigt.
Übersteigt der Wilcoxon-Wert Z die kritischen Schranken auf einem entsprechenden Signifikanz-Niveau[143] – wird also die Nullhypothese abgelehnt –, so ist entweder der Median ungleich Null oder den Stichproben liegen unterschiedliche Erwartungswerte zu

[139] So schildert Bortz 2000 (S. 270) einen Fall, bei dem eine Varianzanalyse keine signifikanten Unterschiede erkennt, der Friedman-Test hingegen doch.
[140] Sachs 2006 gibt kritische Werte erst ab n und $k \geq 3$ an: S. 457f.
[141] Ebda.
[142] Sachs 2006, S. 400.
[143] Die Werte für Z können näherungsweise aus den Quantilen für die Standardnormalverteilung abgeleitet werden: So stehen Z-Werte zwischen ±1.96 und 2.58 für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von fünf Prozent; zwischen ± 2.58 und 2,81 für ein Prozent.

Grunde. Varianzanalyse und Wilcoxon-Test bieten zusammen ein ausreichend gesichertes Maß für eine Aussage, ob etwa Organisten einen bestimmten Zählzeittyp oder Durchlauf signifikant verschieden zu Probanden spielen, die keine Orgel-Praxis besitzen.

3. Ergebnisse

3.1. Allgemeine Beobachtungen

Die Probandengruppe war im Mittel rund 23 Jahre alt und bestand aus 13 Frauen und acht Männern. Sie spielten seit durchschnittlich zwölf Jahren Klavier und hatten mehr als neun Jahre Unterricht am Instrument genossen. Sie gaben an, rund zwei Stunden täglich Klavier zu spielen, schätzten ihre technischen Fähigkeiten, ihre Gehörbildung und das Spiel vom Blatt auf einer Skala von eins bis fünf aber eher mittelmäßig ein[144]. Dennoch zeigten 18 der 21 Probanden im Versuch keine insgesamt erkennbaren Schwierigkeiten, der Aufgabe einer konstanten Tempogestaltung gerecht zu werden. Kein Proband brach den Versuch gänzlich ab. Insofern sollte die subjektive Einschätzung der Probanden über ihr eigenes Können – insbesondere mit Blick auf die umfangreiche instrumentale Vorbildung – verhalten bewertet werden.
13 Teilnehmer konnten durch Auswertung des Händigkeitstests nach Oldfield (1971) als reine Rechtshänder eingestuft werden. Zwei der übrigen zeigten in acht und neun von zehn möglichen Präferenzen starke Tendenz zur Linkshändigkeit. Indes war die Schranke für eine eindeutige Bevorzugung bei neun von zehn Kriterien gesetzt. Einer dieser Teilnehmer, Proband 19, nahm in vier von zehn Kriterien beide Hände zur Hilfe. Zudem zeichnete er sich durch die mit Abstand längste Spielpraxis (35 Jahre Klavier) sowie durch langjährige Orgelerfahrung aus. Wie im folgenden Kapitel zu sehen sein wird, konnte dieser Teilnehmer die Störstellen zeitlich sehr genau schätzen, wobei dies eine unverlangte Angabe seinerseits war und deshalb kein Vergleich zu anderen Teilnehmern gezogen werden kann, die sich dazu nicht äußerten.
Probandin drei zeigte Probleme bis einschließlich Durchlauf drei und schlug danach den Takt mit dem rechten Fuß, wodurch sich ihr Spiel erheblich stabilisierte. Probandin vier brach den dritten Durchlauf bei erstmaligem Auftreten einer 100ms langen Störstelle ab und begann von vorn. Darauf hielt sie das Tempo konstant, und zwar in höherer Geschwindigkeit als zuvor. Probandin zwölf hatte Schwierigkeiten mit der Aufgabe. Mit

lediglich zwei Jahren Klavierspiel und nur zwei Monaten Unterricht am Instrument sowie keinem Hintergrund durch Orgelspiel oder weitere Tasteninstrumente war die Probandin allerdings die Teilnehmerin mit den weitaus geringsten Vorkenntnissen. Zudem gehörte die Probandin zu jener Gruppe, die nicht über die Problematik der Aufgabe informiert worden war. Wurden die Daten des Versuchs indes mit und ohne die Werte dieser Probandin gerechnet, veränderte sich das Gruppenverhalten nicht bedeutsam[145].

3.1.1. Subjektive Äußerungen der Probanden

Zehn der 21 Teilnehmer hatten mehrjährige Erfahrung als Orgelspieler[146]. Sie meisterten die Aufgabe nach äußerer Betrachtung ohne Probleme. Von Orgelspielern sind im Folgenden einige Aussagen skizziert, die eine vermeintliche und per Augenschein zunächst auch bestätigte Sonderstellung dieser Instrumentalisten im Rahmen der Versuchsanordnung dokumentieren:

> Probandin zwei äußerte bereits bei Durchlauf zwei, der lediglich Störstellen von 50ms aufwies: „Da stimmt etwas nicht: Die Tastatur arbeitet nicht sauber."
>
> Proband sieben: „Ich spiele so weiter, bei Unterdrückung. Ich kalkuliere das ein und lasse mich nicht aus dem Konzept bringen."
>
> Probandin 16: „Habe verstärkt auf die Hände geachtet. Unterdrückungen wirken weniger schlimm als die Verzögerungen. Längere Verzögerungen sind schwieriger. Bei Auswendigspiel wäre es weniger schwierig."
>
> Proband 17: „Unterdrückung hat mich am wenigsten interessiert. Man wird aber ein wenig unruhig, weil die Lage der Manipulationen auf der Tastatur wechselt. Dadurch kann man sich nicht darauf einstellen, zum Beispiel früher drücken. Hatte den Eindruck bei kurzen Zeitverzögerungen als sei der Tastendruck verändert[147].

Zusammen mit den Aussagen der weiteren Orgelspieler und jener Probanden, die ausschließlich Klavierunterricht genossen haben, wird deutlich, dass alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer die Manipulationen erkannt und sich eine Strategie zur Lösung der

---

[144] Siehe Daten CD: Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Allgemeine Beobachtungen\Teilnehmer.xls
[145] Siehe dazu Kapitel 3.3.: Den Blockvarianzanalysen wurden alle Probanden einzeln entnommen, um die Veränderung mit Blick auf die übrigen 20 zu untersuchen.
[146] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Allgemeine Beobachtungen\Teilnehmer.xls
[147] Diese bemerkenswerte Aussage regt zu einem Versuch an, der den Zusammenhang zwischen taktiler und zeitlicher Empfindung genauer prüft. Es ist denkbar, Proband 17 habe hier einen Eindruck des so genannten Kappa-Effektes beschrieben. Vergleiche dazu auch Kapitel 2.2.3.

Aufgabe eines konstanten Tempos gesucht haben. Die Strategien sind indes unterschiedlich. So äußerte die sechste Probandin, sie spiele sehr nach Gehör und das Klacken der Klaviatur beim Anschlag habe ihr geholfen, insbesondere bei Stummschaltung. Diese Aussage lässt auf eine Strategie im Sinn einer auditiven Rückkopplungsschleife schließen, während die vorangegangenen Lösungs-Techniken mutmaßlich einer eher sensomotorischen Orientierung zugehörig scheinen. Zwar mögen die sensomotorischen Lösungs-Ansätze überwiegen, wenn man den subjektiven Eindruck der Probanden nicht hinterfragt. Allerdings wohnt vielen der Äußerungen zu vermeintlich rein motorisch kognitiven Lösungen das Indiz einer Beteiligung der auditiven Komponente inne, die der neunzehnte Proband als Orgelspieler nach Ende seines Versuchs auf den Punkt brachte:

> „Mit dem Vorwissen war die Aufgabe nicht mehr so schwer. Die unterdrückten Noten haben mich am wenigsten gestört. Die kleineren Verzögerungen, vielleicht etwa eine 20stel Sekunde, haben kaum gestört. Die größeren, vielleicht eine 10tel, stärker bis stark. Es entstand ein chaotischer Rhythmus."

Denn die absolute Größenordnung der Verzögerung war keinem der Probanden – weder vor noch nach Ablauf des Versuchs – genannt worden[148]. Proband 19 schätzte die Verzögerungen exakt ein. Nur konnte er dies niemals über einen intramodal motorischen Abgleich tun, da die ausschließliche Information der Verzögerung eine akustische war. Es ist denkbar, dass der Proband durch kognitionspsychologische Kenntnisse seinen Eindruck geringer Störstellen mit den auch in dieser Arbeit vorab genannten Schwellenwerten aus der Literatur gleichgesetzt hat und daraus eine 20tel Sekunde (50ms) als im Versuch kleinste Störung vermutete. Allerdings wurde allen Probanden vorenthalten, ob möglicherweise auch nicht bewusst wahrnehmbare Störstellen zum Einsatz kommen. Auch diesem Probanden war also unkenntlich, ob sogar Störstellen von 10, 20 oder 30ms eine Rolle spielten[149].

Die Frage an die Probanden nach Ablauf des Versuchs lautete stets: „Ab welchem Durchlauf haben Sie gemerkt, dass eine Entkopplung stattfindet?" Stellvertretend für weitere Äußerungen steht hier Probandin zwei:

---

[148] Die informierte Gruppe wusste, dass kurze und längere Verzögerungen sowie gegen Ende des Versuchs auch unterdrückte Noten auftreten. Die genauen Positionen im Notenbild und Dauern kannten diese Teilnehmerinnen und Teilnehmer nicht.

> Sie sagte unaufgefordert bereits in Durchlauf zwei, der lediglich Störstellen von 50ms aufwies: „Da stimmt etwas nicht: Die Tastatur arbeitet nicht sauber."

Die von vielen Pianisten hier geäußerte Verlagerung der Aufmerksamkeit auf eine innere und an der motorischen Ausführung orientierte (also sensomotorische) Handlung ist also nicht blanko als Beweis für die Nichtberücksichtigung akustischer Außenreize zu werten. Überdies darf auf Basis dieser ersten statistisch nicht validierbaren Selbstauskünfte sogar eher die Frage aufgeworfen werden, ob nicht gar ein Einfluss akustischer Störelemente auf taktile Wahrnehmungen denkbar wäre, wie es der schon genannte Proband 17 in seiner Äußerung vermuten lässt:

> „Hatte den Eindruck bei kurzen Zeitverzögerungen, als sei der Tastendruck verändert."

Sicherlich ist diese Äußerung eine spontane nach einem reibungslos verlaufenen Versuch mit nicht im Detail gekanntem Schwierigkeitsgrad[150]. Die logische Verkettung der Äußerung spricht jedoch wenig dafür, dass der Pianist meinte, erst ob eines veränderten Tastendrucks auf ein resultierendes akustisches Phänomen aufmerksam geworden zu sein. Vielmehr das Gegenteil, zumal faktisch keine Veränderung des Tastdrucks vorlag. Tatsächlich scheint dieser Proband ob des wahrgenommenen akustischen Fehlers einen (irrtümlichen) Rückschluss auf seinen taktilen Eindruck gezogen zu haben.
Auf Basis dieser Auskünfte präsentiert sich zunächst kein einheitliches Bild in der Bewältigung der motorischen Aufgabe bei veränderlichem Außenreiz akustischer Rückmeldung. Mit Ausnahme der Vermutung, dass Probanden mit Orgel-Praxis möglicherweise der Aufgabe zu einem konstanten Tempo in manipulierten Situationen stärker gewachsen waren. Eine Analyse unter diesem Stichwort soll dazu gegen Ende des analytischen Teils der Arbeit näheren Aufschluss bringen, siehe Kapitel 3.4. Dennoch drängt sich auf Basis der subjektiven Aussagen der Probanden der Gedanke auf, dass Störstellen von 50 oder 80ms den Spielfluss weniger beeinträchtigt haben als jene von 100 und 120ms[151].

---

[149] Damit bleibt dennoch freigestellt, dass der Proband bereits zuvor seine individuelle Grenze zur Aufmerksamkeit für Diskrepanzen zwischen motorisch und akustisch gekoppelten Phänomenen in anderen statistischen Versuchen hinterfragt haben könnte und damit „ins Blaue" und unverlangt die richtige Aussage treffen konnte.
[150] Proband 17 gehört zur Gruppe der informierten Teilnehmer.
[151] Vgl. Hypothese A: Ab einer Entkopplungsdauer von 50 bis 80ms weisen die Pianisten eine verzögerte Folgemotorik beim nächsten Tastenanschlag auf: Jedoch wird ihnen dieses nicht bewusst. Die Probanden empfinden Handlung und resultierende Perzeption im Einklang. Es kommt weder zu einer dauerhaften Tempoveränderung, noch zu einem kurzfristigen Korrekturverhalten. Lediglich der feste Grundschlag verschiebt sich auf der Zeitleiste nach hinten. Vgl. Hypothese B: Oberhalb von 80ms Manipulationsgröße zeigt sich ein anderes Verhalten. Wiederum wirkt die

> Probandin 16: „Habe verstärkt auf die Hände geachtet. Unterdrückungen wirken weniger schlimm als die Verzögerungen. Längere Verzögerungen sind schwieriger. Bei Auswendigspiel wäre es weniger schwierig."
>
> Probandin 20: „Vorwissen hat mir geholfen. Längere Verzögerungen sind schwieriger als kürzere. Unterdrückungen waren weniger problematisch.

Zugleich drängt sich wieder die Frage auf, ob die Probanden ihr Tempo nach Störstellen von 100ms anders gestalten, wenn die Folgezählzeiten akustische Unterdrückungen enthalten. Erste subjektive Äußerungen lassen zunächst vermuten, dass die Probanden die Unterdrückungen als nicht problematisch empfunden haben. Ob die statistische Betrachtung diese Eindrücke bestätigen kann, soll die Analyse der entsprechenden Passagen erbringen, siehe Kapitel 3.3.4. f.

3.2 Beschreibende Statistik

3.2.1. Fehler in den Tonhöhen

Fehler beim Anschlag der korrekten Tonhöhe könnten Resultate vorausgehender Störstellen sein[152]. Insgesamt haben die 21 Probanden 133 Noten in falscher Tonhöhe angeschlagen. Da die erste sowie die letzten beiden Zählzeiten der Notenvorlage nicht in die Wertung einflossen, waren 14.700 anzuschlagende Noten im gesamten Versuch zu analysieren. Die Quote falsch angeschlagener Noten liegt bei gerundet 0,8 Prozent. Der mit der ersten größeren Störstelle von 100ms versehene dritte Durchlauf weist mit Abstand die meisten Fehlanschläge auf. 30-mal vergriffen sich die Probanden dort bei 1.050 anzuschlagenden Tasten[153], was einer Quote von immerhin 2,86 Prozent entspricht. Das deutet darauf hin, dass die Probanden in diesem Stadium eine hohe Aufmerksamkeit für die akustische Rückmeldung zeigten. Die Aufgabe eines konstanten Tempos verleitete sie nicht, sich sofort und allein auf die Sensomotorik zu konzentrieren.

Verzögerung zunächst irritierend und die Teilnehmer schlagen die direkte Folgenote zeitverzögert an. Die darauf folgenden Noten werden jedoch so lange in kürzeren Zeitintervallen gespielt (kurzfristig gesteigertes Tempo), bis die Tastenanschläge wieder auf die Zählzeit des ursprünglichen Tempos vor der Störstelle fallen.

[152] Probandin zwei spielt die linke Hand in Durchlauf eins konsequent um eine Oktave zu hoch. Es waren keine Beeinträchtigungen auf das Tempo oder die Anschlagstärke erkennbar. Zudem äußerte die Teilnehmerin nach diesem Durchlauf, sie habe sogleich um den Fehler gewusst und den Durchlauf bewusst nicht abgebrochen.

[153] 21 Probanden spielten je 50 Noten bei jedem Durchlauf drei.

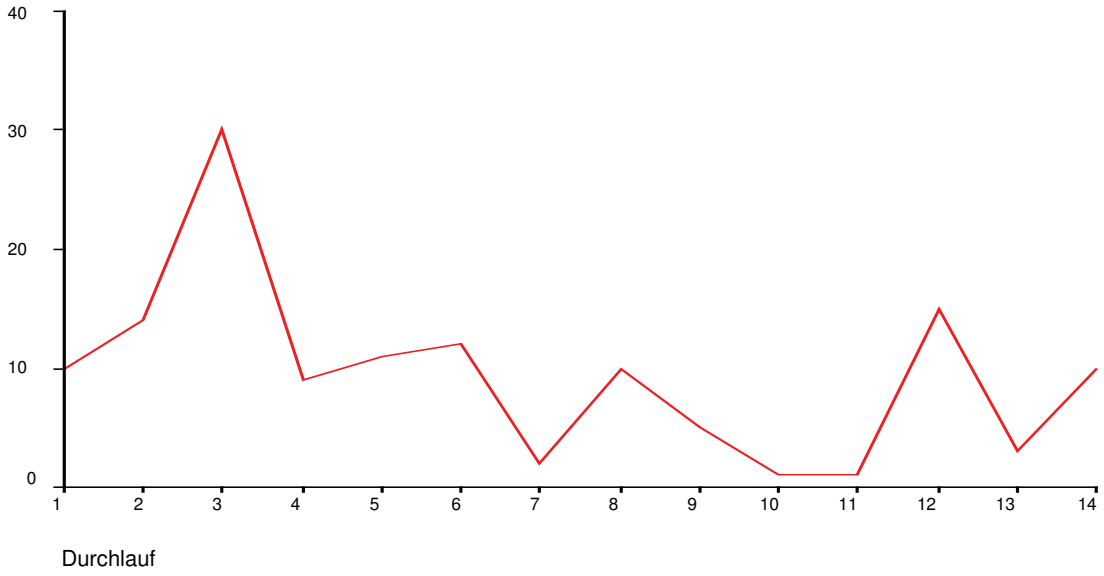


Abb. 6: Summe falscher Tonhöhen je Durchlauf über alle Probanden

Bis einschließlich des elften Durchlaufs reduziert sich das Fehlverhalten unabhängig vom Auftreten der Störstellen und ihrer Größenordnung[154]. Für Durchlauf zehn (80er Störstellen) und Durchlauf elf (ohne Störstellen) liegt die Quote falscher Tastenanschläge nur noch bei knapp 0,1 Prozent. Die Probanden scheinen sich an die manipulierte Situation gewöhnt zu haben. Zudem wird hier deutlich, dass die Zahl falscher Tonhöhen nicht zwingend mit der Größe der Störstelle korreliert.

Auffällig nimmt die Zahl falsch angeschlagener Tasten im zwölften Durchlauf wieder zu. Auch Durchlauf 14 liefert einen vergleichbar höheren Wert. Beide Durchgänge enthalten Unterdrückungen nach einigen 100er Störstellen. Indes werden im dazwischen liegenden 13. Durchlauf – der ohne Unterdrückungen ebenfalls 100er Störstellen besitzt – mit die wenigsten Fehler des Versuchs gemacht. Insofern setzt sich die rückläufige Fehlerquote in ihm fort. Durchlauf zwölf und 14 durchbrechen diesen Trend. Dies scheint umso interessanter, weil eine Vielzahl der Probanden subjektiv einschätzte, ihnen bereiteten die Passagen mit Unterdrückungen weniger Schwierigkeiten als jene mit großen Störstellen ohne Unterdrückungen. Durchlauf zwölf weist zum Beispiel dreimal so viele Fehler auf wie Durchlauf neun mit 120er Störstellen.

Auch korrespondieren diese Messwerte nicht umfassend mit Aussagen einiger Probanden, sie hätten zur Lösung der Problematik im Verlauf des Versuchs verstärkt auf die Hände geachtet. Denn für einen sensomotorischen oder gar rein kognitiv-motorischen Lösungsansatz dürfte eine fehlende akustische Rückmeldung keinen erheblichen

[154] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Allgemeine Beobachtungen\Fehlerzählung Tonhöhe.xls\Zählzeiten Gesamt. Dort Zeile 39.

Unterschied zu einer verzögerten Information darstellen. Insofern ist die sprunghafte Zunahme von Tonhöhenfehlern in den Durchläufen zwölf und 14 ein erstes Indiz für eine – in bestimmten Grenzen – auditiv-sensomotorisch gekoppelte Reizverarbeitung auch in diesem Versuchsstadium. Gleichwohl ist hieraus keine Aussage für die Tempogestaltung abzuleiten. Zudem ist diese Interpretation eingehender zu prüfen. Hier lohnt ein genauerer Blick auf die Lage der Tonhöhenfehler im Notenbild und im Umfeld von Störstellen.

3.2.1.1. Lage der Tonhöhenfehler im Notenbild

Bis zur einschließlich sechsten Zählzeit bereitet das Notenbild den Probanden auch unabhängig vom Auftreten und der Größe von Störstellen offenbar wenig Probleme. Die meisten Fehler ereigneten sich bei Zählzeit 23 auf A und c'' mit zwölf Fehlgriffen sowie bei Zählzeit 35 im f und c'' mit sogar 16 Fehlgriffen in je 588 Anschlägen sämtlicher Probanden zu diesen Zählzeiten während des gesamten Versuchs. Das entspricht Fehlerquoten von 1,14 und 1,52 Prozent[155].

Die höchsten Fehlerkonzentrationen im Ablauf dreier Noten finden sich in den Zählzeiten 15 bis 17 (19 Fehler), 23 bis 25 (17 Fehler) sowie der gesamten Passage 30 bis 35[156]. Diese Bereiche des Notenbildes prägen den zuvor genannten Trend anfänglich hoher und bis hin zum elften Durchlauf stetig und stark abnehmender Fehlerquoten in besonderem Maße. Zudem tragen diese Notenfolgen erheblich dazu bei, dass der Trend in Durchlauf zwölf und 14 negativ durchbrochen wird.

Ein zunächst nicht plausibles Phänomen wird beim Vergleich beider Passagen mit unterdrückten Folgezählzeiten in der Notenvorlage deutlich: Während die Probanden bei der gegen Ende des Stücks unterdrückten Note[157] in Folge einer 100er Störstelle sieben Fehler produzierten, vergriffen sie sich in der anfänglichen Folge (Zählzeit vier bis sechs) kein einziges Mal. Ob auch die Tempostabilität der Probanden sich in beiden Passagen ähnlich stark unterscheidet, wird zu untersuchen sein.

---

[155] Ebda.
[156] Hohe Fehlerdichte bei allen Dreier-Folgen innerhalb dieser sechs Noten.
[157] Zählzeit 31: Diese Unterdrückungspassage in der rechten Hand währt zwei Zählzeiten, statt der drei der ersten Passage.

3.2.1.2. Lage der Tonhöhenfehler nach Störstellen

Diese ersten allgemeinen Untersuchungen können weiter auf die ursprünglichen Fragen zugeschnitten werden, indem das Spiel nach Störstellen auf Tonhöhenfehler untersucht und mit jenem außerhalb dieser Bereiche verglichen wird. Dazu werden sämtliche Passagen dreier Zählzeiten nach Störstellen mit der übrigen Menge verglichen. Die Fehlerquote bei Zählzeiten außerhalb von Störstellen ist mit 0,77 Prozent geringer als der Gesamtwert von 0,82 Prozent (siehe oben), für jene nach Störstellen liegt der Wert von 0,91 Prozent darüber. Dabei fällt auf, dass die Zählzeit direkt nach einer Störstelle seltener einen Tonhöhenfehler birgt als die zweite danach. Störstellen von 50 und 80ms waren dabei weniger ein Problem für die Probanden als vielmehr die 100er und 120er. Die größere Zahl der Folgefehler in zweiten und dritten Folgezählzeiten bei 100er Störstellen gegenüber den 80ern ist deutlich. Dies deckt sich mit den nachträglichen Aussagen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer.

Störstelle	Folgezählzeiten 1 bis 3		
50ms	0	3	3
80ms	1	2	0
100ms	0,5	6	4,5
120ms	2,5	7	2,5
100ms+	3,5	3	2,5
Summe	7,5	21	12,5

Abb. 7: Anzahl der Fehler sämtlicher Probanden nach Störstellen. Zählzeiten, die eine Folgenote für zwei Störstellen darstellen und Fehler verzeichnen, werden mit je einem halben Fehler gewertet.

Bei akustischer Unterdrückung nach 100er Störstellen (100ms+) ereignen sich ebenso Fehler, indes keiner Folgezählzeit vorbehalten.

3.2.1.3. Tonhöhenfehler nach Händen betrachtet

Für die linke Hand zeigt sich zunächst ein ähnliches Bild bei den Tonhöhenfehlern wie im beidhändigen Spiel, für das nur der jeweils erste Anschlag beider Hände gewertet wird: In Durchlauf drei steigt die Zahl der Fehlgriffe sprunghaft an, um bis einschließlich Durchlauf elf auf ein Minimum abzufallen. Wiederum sind es die Durchläufe zwölf und 14 mit unterdrückten Folgezählzeiten, die mehr Verspieler begünstigen. Der Anstieg ist jedoch

noch stärker als in der Betrachtung des beidhändigen Spiels[158]. Der dazwischen liegende 13. Durchlauf setzt die zuvor abnehmende Fehlerquote fort.

Das Gruppenverhalten beim Anschlag individueller Noten unterscheidet sich von der Betrachtung des beidhändigen Spiels: Eine wesentliche Ursache ist die Notierung von halben Noten[159], sodass auf diesen unbesetzten Zählzeiten Fehlerquoten von null Prozent zu erwarten wären. Zählzeit 16 weist indes Verspieler auf: Anschläge der Linken gleich welcher Tonhöhe[160]. Da das E zuvor und auch das c'' der Oberstimme Fehlerschwerpunkte darstellen, ist hier von einem Folgefehler auszugehen. Insgesamt kristallisieren sich ähnliche Fehlerschwerpunkte für die individuelle Betrachtung beider Hände wie für das Gesamtverhalten heraus[161].

Der markanteste Unterschied zwischen linker und rechter Hand liegt in der Präzision beim Spiel von Durchlauf zwölf und 14. Denn der in der Gesamtbetrachtung auffällige Wiederanstieg der Fehlerquoten geht weit überwiegend auf Probleme in der linken Hand zurück. Dies ist umso interessanter, weil Erklärungsversuchen widersprüchliche Phänomene im Notenbild und den Messergebnissen gegenüber stehen: Zunächst ist es erstaunlich, dass die erste Passage mit 100er Störstelle und anschließender Unterdrückung (Zählzeiten drei bis sechs) fast keine Fehler nach sich zieht, während die Passage um Zählzeit 31 einen großen Teil Fehler der Durchläufe zwölf und 14 enthält.

Beim Vergleich mit anderen Durchläufen fällt auf, dass diese Passage für die linke Hand auch unter anderen Bedingungen einen Fehlerherd darstellt, so in Durchlauf eins bis drei. Eine Erklärung könnte der in der Rechten zu vollziehende Oktavsprung zu sein. Allerdings erzeugt der andere Oktavsprung im dritten Takt der Unterstimme keine Fehler in der Gegenstimme[162]. Zum Beispiel zeigt das Verhalten der zweiten Probandin einen Tonhöhenfehler in Durchlauf fünf und einhergehend deutliche Rückwirkungen auf die Tempogestaltung.

---

[158] Mit 13 Fehlern der Linken gegenüber zweien der Rechten geht der Effekt also fast vollständig auf die linke Hand zurück. Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Allgemeine Beobachtungen\Fehlerzählung Tonhöhe.xls\Zählzeiten Gesamt sowie Datenblatt Viertel Linke Hand vs. Viertel Rechte Hand

[159] Während bei der Betrachtung des beidhändigen Spiels immer zumindest ein Anschlag je Zählzeit vorhanden ist.

[160] Ebda.

[161] Die höchsten Fehlerkonzentrationen im Ablauf dreier Noten finden sich in den Zählzeiten 15 bis 17 (19 Fehler), 23 bis 25 (17 Fehler) sowie der gesamten Passage 30 bis 35.

[162] Zwar ereignen sich hier insgesamt vier Fehler, allerdings auf dem ausgehenden Kontra A. Die Fehler können damit kein Folge-Resultat sein, allerhöchstens ein Verspieler in Vorausschau auf das weitere Notenbild.

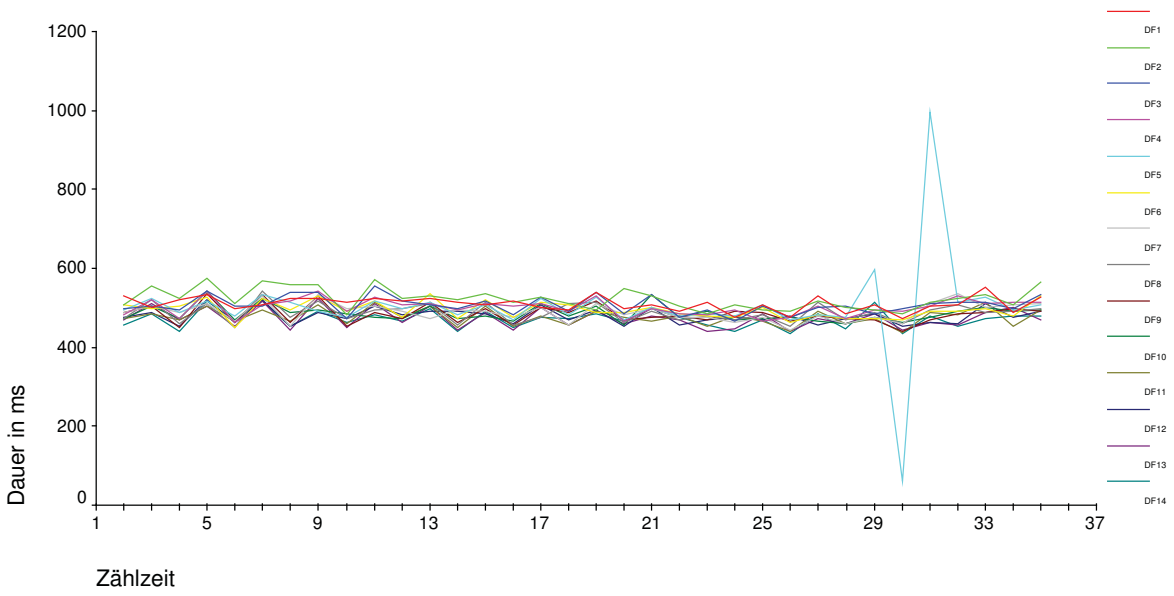


Abb. 8: Korrelogramm der Dauern der Zählzeiten sämtlicher Durchläufe von Probandin zwei in ms. DF 5 weist einen Tonhöhenfehler mit starken Temposchwankungen ab Zählzeit 29 auf.

Zählzeit 29 ist mit einer 80er Störstelle in der Rechten belegt. Die Probandin zieht den Oktavsprung zum a'' in Zählzeit 31 versehentlich dem in 30 vorausgehenden B der Linken vor. Sie bemerkt diesen Fehler und hält das a'' etwa drei Zählzeiten statt zwei aus und spielt zudem das B leicht verspätet am Anfang der zugehörigen Zählzeit 30[163]. Interessant ist, dass die vergleichbare, aber in den Stimmen getauschte Passage ab Takt neun in Durchlauf fünf keine Fehler und Temposchwankungen aufweist.

Besonders auffällig ist: Weder in der ersten noch in der zweiten Passage der Unterdrückungen in Durchlauf zwölf und 14 treten Fehler in der Rechten auf. Während der ersten Passage entstehen auch in der Linken fast keine Fehler, woraus der Rückschluss gezogen werden könnte, Fehler unterliefen der Linken dann vermehrt, wenn sie jede Zählzeit – in der Melodie oder Führungslinie – anzuschlagen hat und Störstellen zeitgleich oder kurzfristig vorausgehend in der anderen auftreten. In diesen Fällen werden Tonhöhenfehler zum Teil in Sekundschritten fortgeführt.

Der allgemeine Vergleich zwischen linker und rechter Hand offenbart, dass analog zur ausgeprägten Rechtshändigkeit der Probanden mehr Fehler mit der Linken gespielt werden (0,53 gegenüber 0,29 Prozent). Nach Störstellen verursacht die Linke die höhere Quote, die Rechte indes spielt sogar geringfügig weniger Tonhöhenfehler nach Störstellen als außerhalb manipulierter Bereiche (0,24 gegenüber 0,29 Prozent). Die Probanden reagieren also anfälliger in der linken Hand auf Störstellen.

[163] Experiment\Einzelanalysen\Proband 02\Schritt 3 Datenaufbereitung Excel\PR 02.xls\02 Fehler markiert+kommentiert. Dort Zellen R bis U 44 und 45.

Noch ein weiteres Resultat scheint bedeutsam, insbesondere für die Frage nach Temposchwankungen infolge von Störstellen: Während die Rechte im Verhältnis fünf zu eins überwiegend Fehler spielt, wenn Störstellen in der eigenen Stimme vorausgehen, produziert die Linke im Verhältnis drei zu eins eher Fehler, wenn die Störstelle in der anderen Hand vorausgeht. Einig ist diesem Gegensatz jedoch, dass sich die meisten Fehler erst in der zweiten Zählzeit nach Störstellen ereignen[164].
Sollten diese Beobachtungen eine Analogie auf zeitlicher Ebene finden, würde das nahe legen, dass die kognitiv-motorischen Organisationsprozesse zur Gestaltung eines konstanten und fehlerfreien Vortrages in dieser Versuchsanordnung unterschiedliche Strukturen für die rechte und linke Hand vorsehen und die Motorik zudem eine nur geringe Anfälligkeit in der unmittelbaren Folge von Störstellen besitzt. Doch ehe die Störstellen und unbeeinflussten Bereiche mit der für diese Arbeit zentralen Beobachtung Tempoabweichung anhand periodischer Mittelwertsabweichungen untersucht werden, folgen zunächst grundsätzliche Überprüfungen zur Stabilität des Tempos mit absoluten Dauern der Zählzeiten.

3.2.2. Allgemeine Stabilität der Tempogestaltung

Wie erwartet waren ausgeprägte und stabile metrische Periodizitäten zu finden. 14 der 21 Probanden spielen betonte Zählzeiten erkennbar länger als unbetonte[165]. Die Länge starker Zählzeiten entsprach je nach Proband rund 102,5 bis 104,5 Prozent des Gesamtmittels ihrer Zählzeiten. Lediglich ein Proband schlug unbetonte länger als betonte an[166]. Sechs Probanden zeigten ein eher ausgeglichenes Metrum[167], wobei die betonten immer noch rund ein halbes Prozent länger währten.
Im Durchschnitt dauerten die Zählzeiten über alle Probanden und Durchläufe 477,72ms. Das entspricht einem Tempo von 125,6 Schlägen pro Minute[168]. Das individuelle Zeitmaß variiert dabei erheblich: So schlug Proband 13 hochgerechnet erstaunliche 245,76-mal pro Sekunde an, seine Vorgängerin markierte mit 76,13 Schlägen den unteren Rand der Skala. Kein Proband veränderte das Tempo während des Durchlaufs spürbar, mit

[164] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Allgemeine Beobachtungen\Fehlerzählung Tonhöhe
[165] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Häufigkeiten\Grundgesamtheit.xls\Mittel betonte unbetonte
[166] Proband 17.
[167] 6, 10, 14, 15, 18, 21.
[168] Dieser Wert korrespondiert annähernd mit Ergebnissen von van Noorden und Moelants (1999). Sie ermittelten unter 12.148 Musikstücken verschiedener Stile und Epochen eine leicht schiefe, nach rechts (Dauer der Zählzeit) flach auslaufende Normalverteilung für die Häufigkeiten gewählter Tempi. Das Mittel für die Dauern lag bei 525ms für polyphone Musik, 418 für Barock, 400 für Romantik, 332 für Jazz und 440 für Musik aus den Charts. Noorden 1999, S. 63. Über alle Stücke und Stile gerechnet lagen die häufigsten Tempi bei Zählzeitdauern zwischen 460 und 480ms.

Ausnahme von Proband 14. Probandin zwölf beschleunigt ihre Anschläge jeweils in der Klausel, Proband 17 spielt ein ausgeprägtes Ritardando in diesen vorletzten Takten.
Im Übergang zu Takt sechs ist bei den meisten Teilnehmern eine Abschwächung der metrischen Stabilität zu beobachten. Dies kann mehrere Ursachen haben. Zum einen bildet Takt sechs den Übergang in das zweite Liniensystem. Jedoch erscheint die Annahme, die Pianisten würden hierdurch irritiert, wenig plausibel. Denn die Teilnehmer spielten im Mittel über zwölf Jahre Klavier und hatten durchschnittlich mehr als neun Jahre Unterricht[169]. Zudem hat die Notenvorlage einen geringen Schwierigkeitsgrad. Überdies beurteilten die Probanden im Fragebogen ihre Fähigkeit zum Spiel vom Blatt mit einem Wert von gemittelt 2,26 auf einer Skala von eins bis fünf. Damit stuften sie diese Fertigkeit vor allen anderen erfragten Fähigkeiten ein.
Die Unterstimme zeigt eine Pause im besagten Takt und zudem sind die Zählzeiten 21 und 23 Position für Störstellen. Auch erfolgt hier der Wechsel der Melodie in die linke Hand. Das wohl gravierendste Argument ist der einhergehende Wechsel der Notenlängen. Die Rechte spielt nun Halbe und führt daher keine Anschläge auf unbetonter Zählzeit aus. Da sich die Probanden nach Auswertung der Fragebögen überwiegend als Rechtshänder mit wenig Tendenz zur Beidhändigkeit darstellten, mag dies die plausibelste Erklärung für die deutlich abnehmende Ausprägung der Periodizität sein.

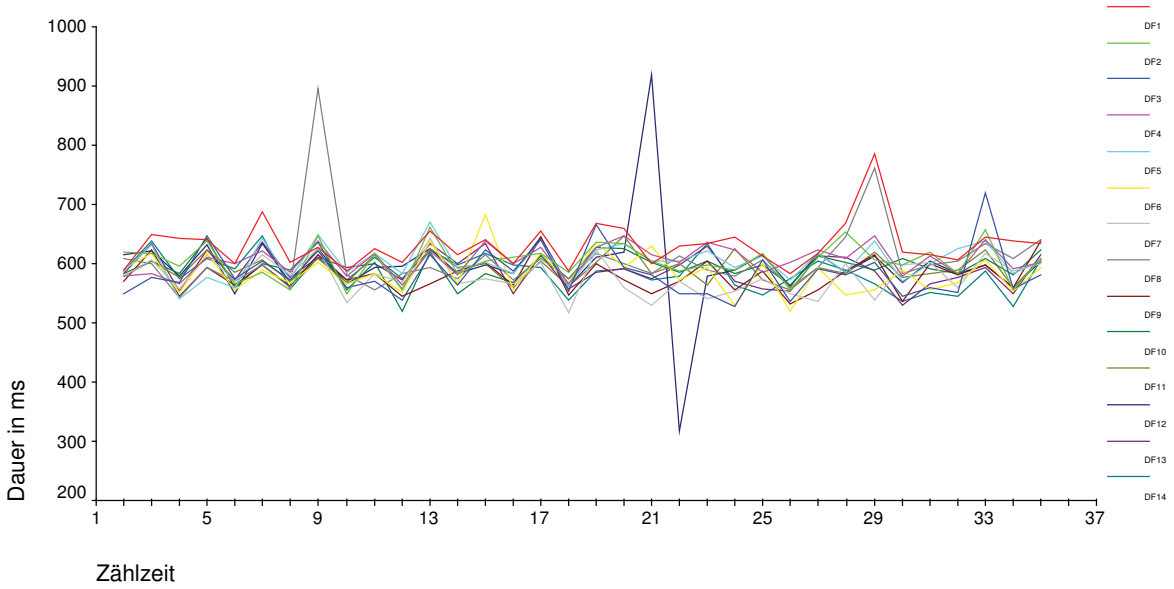


Abb. 9:Dauer der Zählzeiten der Durchläufe von Probandin eins.

[169] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Allgemeine Beobachtungen\Teilnehmer.xls\Persönliche Daten

In Abbildung neun ist der Wechsel betonter und unbetonter Zählzeiten gut zu erkennen. Die rote Linie zeigt den ersten Durchlauf. Anschaulich wird auch die geringere metrische Stabilität nach Zählzeit 20. Die graue Linie (Durchlauf acht) schlägt auf Zählzeit neun deutlich nach oben aus. Hier geht zwei Zählzeiten zuvor eine 50er Störstelle in der Rechten voraus, in der Linken ereignet sich ebenfalls eine 50er Störstelle. Die Probandin verspielt sich zudem in der Tonhöhe. Auch die Ausschläge der dunkelblauen Linie (Durchlauf zwölf) führen auf Verspieler in der Tonhöhe zurück, die die Probandin korrigierte und dabei über die Zählzeit hinaus spielte.

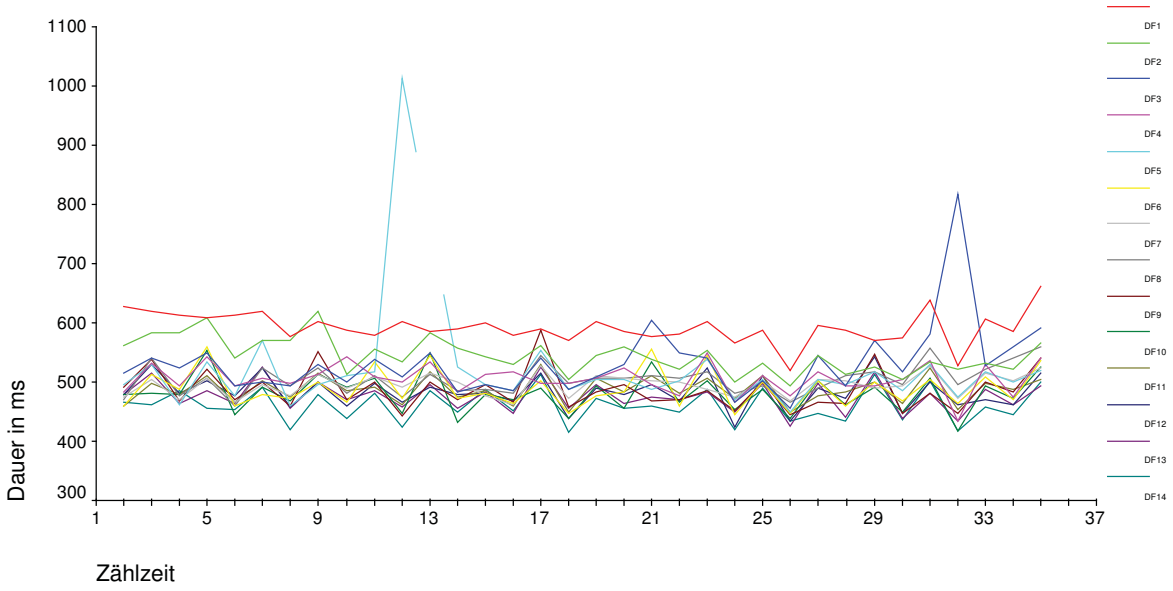


Abb. 10: Proband vier zeigt eine stabilere metrische Gestaltung als die meisten anderen Probanden ab Takt sechs (Zählzeit 21 ff.). DF1 und DF 2 sind etwas langsamer als die nachfolgenden Durchläufe.

Einige Probanden gestalteten das Tempo in Durchlauf eins und zwei ein wenig langsamer als in den übrigen Durchgängen. Gleichzeitig ist das Metrum weniger stark ausgeprägt, so zum Beispiel bei Proband vier (Abbildung zehn). Einheitlich stabilisieren sich beide Faktoren in Durchlauf drei bei allen Probanden. Dies wirkt umso interessanter, da die ersten größeren Störstellen von 100ms mit Durchlauf drei auftreten. Zwar birgt diese augenscheinliche Parallelität der Phänomene nicht zwingend einen Zusammenhang. Jedoch nötigt der Umkehrschluss zur Negation einer Annahme, der Einsatz größerer Störstellen gefährde unwiederbringlich die Stabilität metrischer Gestaltung wie auch des Tempos.

3.2.3. Autokorrelationen und partielle Autokorrelationen

Wie in Kapitel 2.5.1.1. erläutert, misst die Autokorrelation den Zusammenhang zwischen den zu unterschiedlichen Zeitpunkten beobachteten Werten in einer Zeitreihe. Besteht ein Zusammenhang zwischen unmittelbaren Beobachtungen einer Zeitreihe, spricht man von Autokorrelation erster Ordnung. Ebenso können sich Autokorrelationen größerer Abstände ergeben. Dabei lässt sich zugleich die Stärke des Zusammenhangs identifizieren.

Rund ein Drittel der Durchläufe zeigt eine belastbar negativ korrelierte Gewichtung benachbarter Noten[170]. Noten im Abstand von zwei Zählzeiten wurden in annähernd 37 Prozent der Durchläufe signifikant ähnlich gestaltet. In Summe verteilen sich beide Ergebnisse auf mehr als ein Drittel der Durchläufe, da sie in vielen Fällen nicht miteinander auftreten, sondern mit tendenziellen (nicht signifikanten) Korrelationen der jeweils anderen Ordnung. So sind die Korrelationen zweiter Ordnung von Proband elf signifikant positiv, während jene erster Ordnung nur tendenziell negativ sind, zum Teil positiv oder nicht ausgeprägt.

Proband 17 hingegen zeigt keine signifikanten Zusammenhänge. Mit Ausnahme des starken Ritardandos in der Klausel spielt er ohnehin ein äußerst stabiles und überdies unmetrisches Tempo[171]. Probandin sechs gestaltet ihre Durchläufe – zumindest metrisch betrachtet – uneinheitlich. In seltenen Fällen, wie bei Proband 14, ist die Periodizität insgesamt positiv ausgeprägt und benachbarte Noten werden positiv korreliert gespielt wie auch Übernachbarn[172]. Proband fünf zeigt in den ersten Durchläufen positive aber nicht signifikante Korrelationen erster und zweiter Ordnung. Erstmals in Durchlauf vier bildet sich die Abfolge betonter und unbetonter Zählzeiten aus, schwächt sich jedoch in weiteren Durchläufen wieder ab. Der Proband spielt ein stabiles Tempo, grobe Ausreißer sind nicht zu beobachten.

Insgesamt aber wird die dominante Akzentuierung starker und schwacher Zählzeiten im Gruppenverhalten auch durch das Verfahren der Autokorrelation bestätigt. Denn signifikant positiv korrelierte Nachbarnoten und negative im Abstand zweier Zählzeiten finden sich nur in verschwindend geringem Maß[173] und entfallen maßgeblich auf den genannten Probanden 14.

---

[170] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Korrelationen\Zählung Häufigkeiten AK und PAK.xls
[171] Wie zuvor beschrieben hält er als einziger die unbetonten Zählzeiten länger als die betonten.
[172] Indes liegt dies wohl an der bei Proband 14 vergleichsweise stark ausgeprägten linearen Tempoveränderung in seinen Durchläufen. Hierdurch gleichen benachbarte Zählzeiten einander stärker, als weit entfernte typengleiche Zählzeiten.
[173] 1,7 und 0,3 Prozent aller Durchläufe.

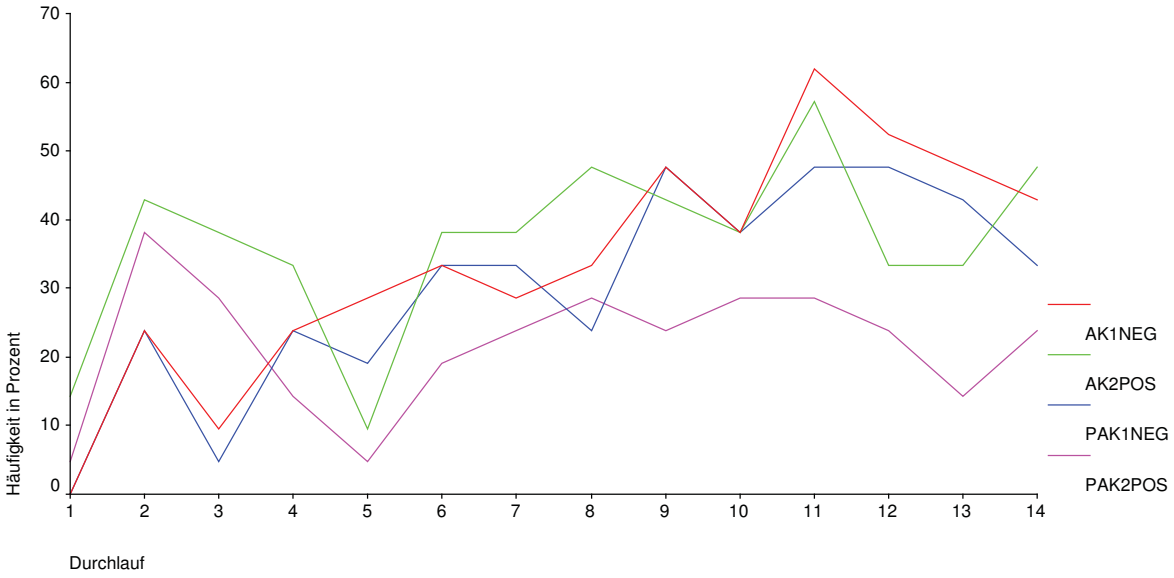


Abb. 11. Prozentuale Häufigkeit signifikanter Autokorrelationen und signifikanter partieller Autokorrelationen erster und zweiter Ordnung im Lauf des Versuchs über alle Probanden

Allgemein schlägt sich die Metrik der Notenvorlage mit zunehmender Versuchsdauer stärker in der motorischen Gestaltung nieder[174]. Während kein Proband in Durchlauf eins die Dauern benachbarter Noten signifikant gegenteilig korreliert gestaltet, sind dies in Durchlauf sechs bereits sieben von 21 Teilnehmern, in Durchlauf elf gar 13. Dies gilt auch für partielle Autokorrelationen erster Ordnung. Für jene zweiter Ordnung ist indes kein Trend erkennbar (pinkfarbene Linie). Einzig der starke Rückgang ab Durchlauf drei ist ein Zeichen für eine schwindende Stabilität gleichgestalteter zweiter Ordnungen. In Durchlauf drei treten die ersten großen Störstellen von 100ms auf. Die Abnahme auch der signifikant negativ korrelierten Nachbarnoten ist hier besonders deutlich.

Zum Beispiel zeigt Probandin neun im dritten Durchgang große Schwierigkeiten ab dem Oktavsprung vom a' zum a'' (Takt acht)[175], den sie in den ersten Durchläufen ohne Probleme spielte. Ansonsten zeigt Probandin neun ein stabiles Tempo. Dies in Betracht scheint die 100er Störstelle im a' der Grund für ihre Schwankungen zu sein. Wie häufiger zu beobachten verändert sich das Tempo anschließend in der anderen Hand. Ursache und Wirkung wandern sozusagen[176], wie schon bei den Tonhöhenfehlern.

Wahrscheinlich wurde der Oktavsprung durch die Irritation der Störstelle vorgezogen, und zwar noch vor die eigentlich folgende Zählzeit, das große H. Dieses spielt die Probandin dann auch, wechselt korrekt zum kleinen c, nicht aber zum anschließenden d. Das a''

[174] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Korrelationen\Zählung Häufigkeiten AK und PAK.xls
[175] Experiment\Einzelanalysen\Proband 09\Schritt 3 Datenaufbereitung Excel\PR 09.xls\09 Fehler markiert+kommentiert. Dort Spalten J bis M 42ff.
[176] Das Phänomen wird später eingehender geschildert.

lässt sie unentwegt gedrückt bis zu dessen notiertem Ende: Das zeitliche Verhältnis mittelbarer und unmittelbarer Notenpaare gerät mithin durcheinander, der Durchlauf ist so gut wie nicht autokorreliert. Interessanterweise wiederholt Probandin neun den Fehler im folgenden, unmanipulierten Durchlauf vier. Mit Durchlauf fünf kehren aber stabile metrische Strukturen ein, was sich in den Koeffizienten der Autokorrelationen wiederfindet.

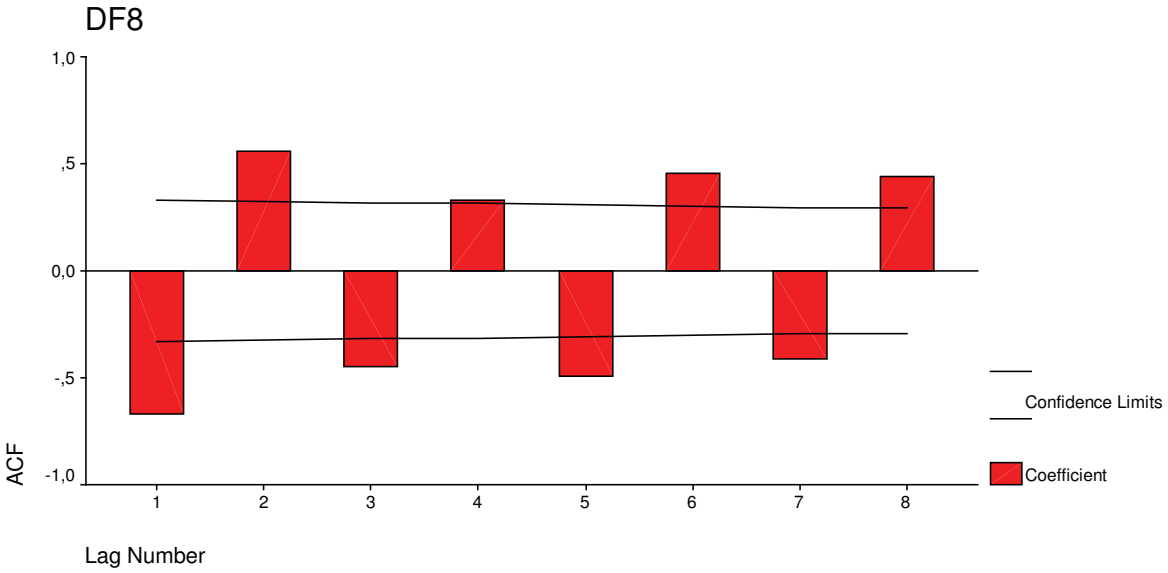


Abb. 12: Korrelogramm der ersten Anschläge von Proband 13, Durchlauf acht, der 50er Störstellen im a', D und A_1 enthält. AK = Autokorrelationskoeffizient zum Abstand 1 und 2ff. Zählzeiten. Die schwarzen Linien bilden die Grenzen der 95-prozentigen Vertrauensintervalle. Für Abstände, bei denen die ausgewiesene Korrelation über den Signifikanzgrenzen liegt, ist mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% eine Autokorrelation vorhanden. Korrelationen, die in die Signifikanzgrenzen fallen, schildern keinen gesicherten Zusammenhang.

In Durchlauf acht von Proband 13 sind geradzahlig voneinander entfernte Zählzeiten auf signifikantem Niveau schwach positiv bis positiv korreliert, ungeradzahlige negativ. Dies weist auf eine signifikant ähnliche Akzentgestaltung starker Zählzeiten unter sich und schwacher Zählzeiten unter sich hin. Für einen Durchlauf mit immerhin sechs Störstellen von 50ms Dauer ist das auffällig. Lässt das obige Korrelogramm doch auf eine hohe Stabilität in der metrischen Gestaltung schließen. Im vorliegenden Fall scheinen sich die Manipulationen also nicht auf die Motorik des Probanden ausgewirkt zu haben oder sie sind in der Gesamtheit nicht erkennbar. Damit ist auch empirisch dargelegt, dass die Autokorrelation keine quantifizierbare Aussage über die Abweichung eines einzelnen Störstellenbereichs gegenüber dem übrigen Notenfeld zulässt.

Beim ersten Durchlauf mit unterdrückten Noten verhält sich Proband 13 – der das Notenmaterial schnell und augenscheinlich sicher während aller Durchläufe spielte – dann

anders. Während er erste Ordnungen bei fast allen vorangehenden Durchläufen unterschiedlich und zweite ähnlich anschlägt, verliert er seine strenge metrische Gestaltung in Durchlauf zwölf. Durchlauf 13 ohne Unterdrückungen weist hingegen wieder ein periodisches Verhalten auf, Durchlauf 14 dann trotz Unterdrückungen eine markante Abfolge starker und schwacher Zählzeiten. Über alle Probanden gerechnet sinkt die Zahl signifikant autokorrelierter Durchläufe mit dem Auftreten erster Unterdrückungen in Durchlauf zwölf.

Dass selbst ein hoher Koeffizient keine hinreichende Aussage über die Lage und Anzahl korrelierter Zählzeiten ist, kann am Beispiel der erwähnten Probandin sechs veranschaulicht werden. Bis zum Durchlauf 14 spielt sie ein stabiles, periodisch völlig unausgeprägtes Tempo (Abbildung 13).

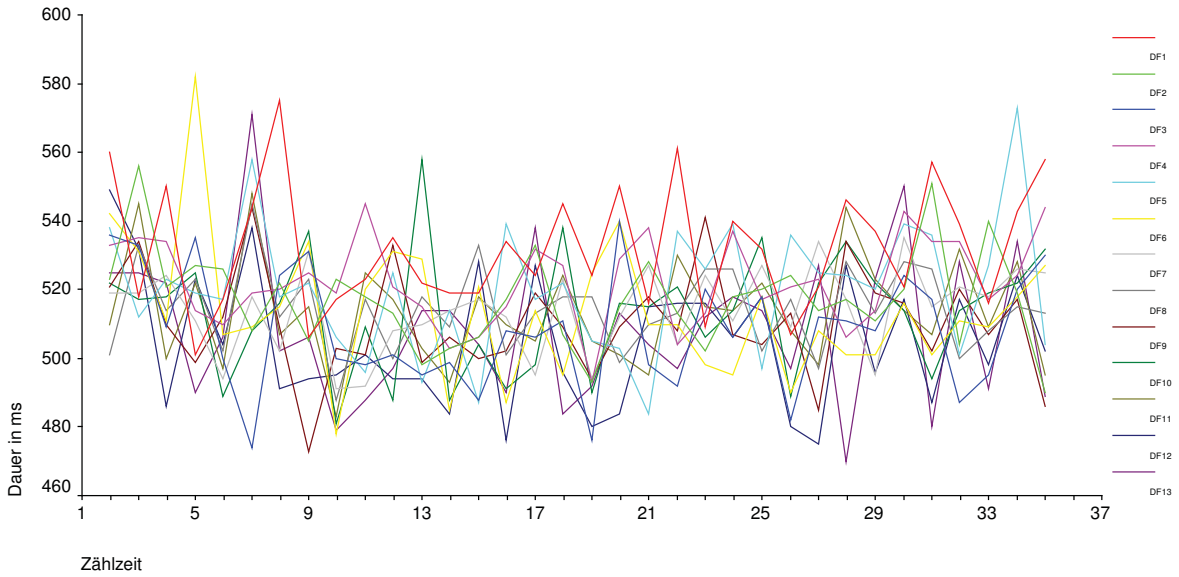


Abb. 13: Zählzeiten in ms der Probandin sechs ohne Durchlauf 14

In Durchlauf 14 hingegen verspielt sich die Probandin beim Sekundschritt zum ersten kleinen c in Takt acht. Gleichzeitig ereignet sich in der Oberstimme eine Störstelle von 100ms. Das folgende a" ist unterdrückt. Als Resultat dieser zwei Erschwernisse spielt die Probandin für über zwei Sekunden keine Note mit der Linken. Folgefehler in der anderen Hand sind ein in dieser Studie häufig beobachtetes Verhalten. Die hier nun ausbleibenden Viertel führen quasi zur Halbierung des Grundschlages. Entsprechend verdoppeln sich die Längen der Messwerte. Im Anschluss ereignen sich weitere Tonhöhenfehler, denen extreme Temposchwankungen einhergehen – eventuell bedingt durch die zweite Unterdrückung im g''. Schlussendlich gerät der Probandin, die bis dato und auch im

zwölften Durchlauf ein völlig stabiles Tempo spielte, dieser abschließende Durchlauf in den letzten Takten völlig aus den Händen (siehe Abbildung 14).

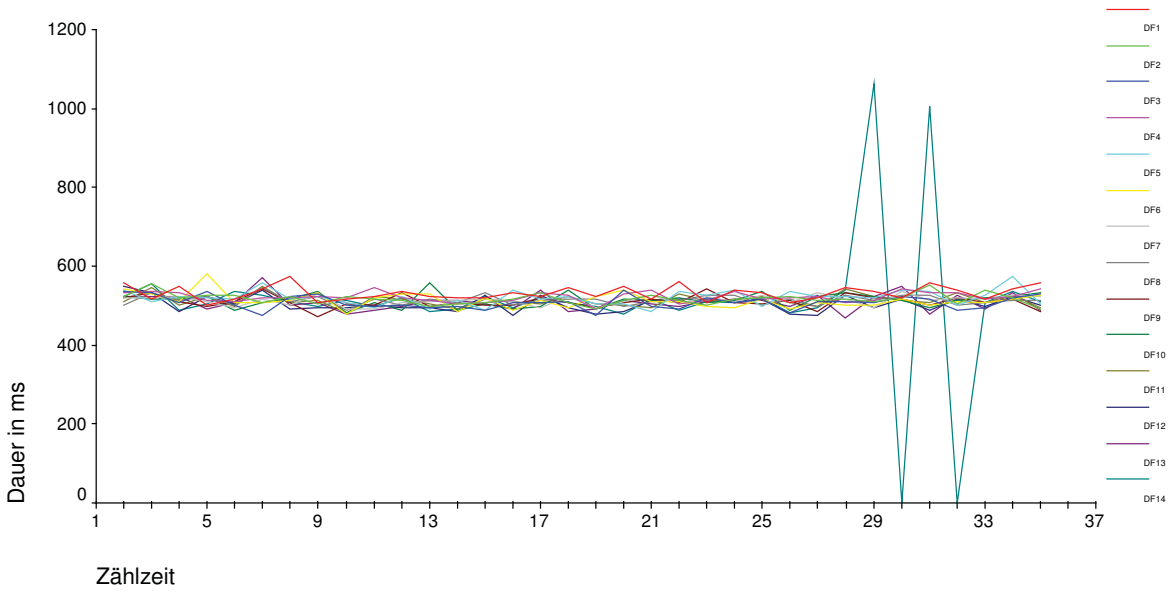


Abb. 14: Zählzeiten in ms der Probandin sechs mit Durchlauf 14 (türkise Linie)

Die Werte der zugehörigen Autokorrelationen aber verheißen einen problemlosen Durchlauf zumindest für eng benachbarte Zählzeiten (Abbildung 15).

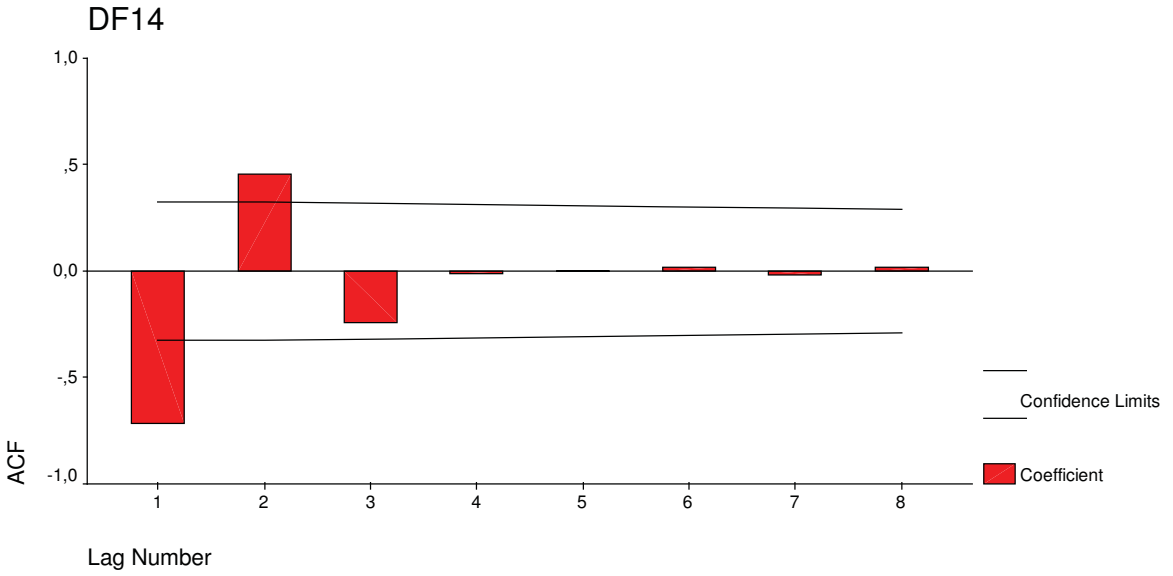


Abb. 15: Autokorrelationen in Durchlauf 14, Probandin sechs.

Die in der Versuchsgruppe (scheinbar) überwiegende Periodizität eng benachbarter Zählzeiten ist gut zu erkennen. Für Abstände über einen Takt hinaus verschwindet sie. Dass die starken Ausreißer die Werte der Autokorrelation beeinflussen, ist plausibel. Die

bisherigen Ergebnisse für Probandin sechs (ihr typisch unperiodisches, aber stabiles Tempo) ausgeblendet, liegt der Schluss nahe, dass die starken Ausreißer die Werte für die Autokorrelation über weite Abstände entscheidend drücken. Allerdings ist das Gegenteil der Fall:

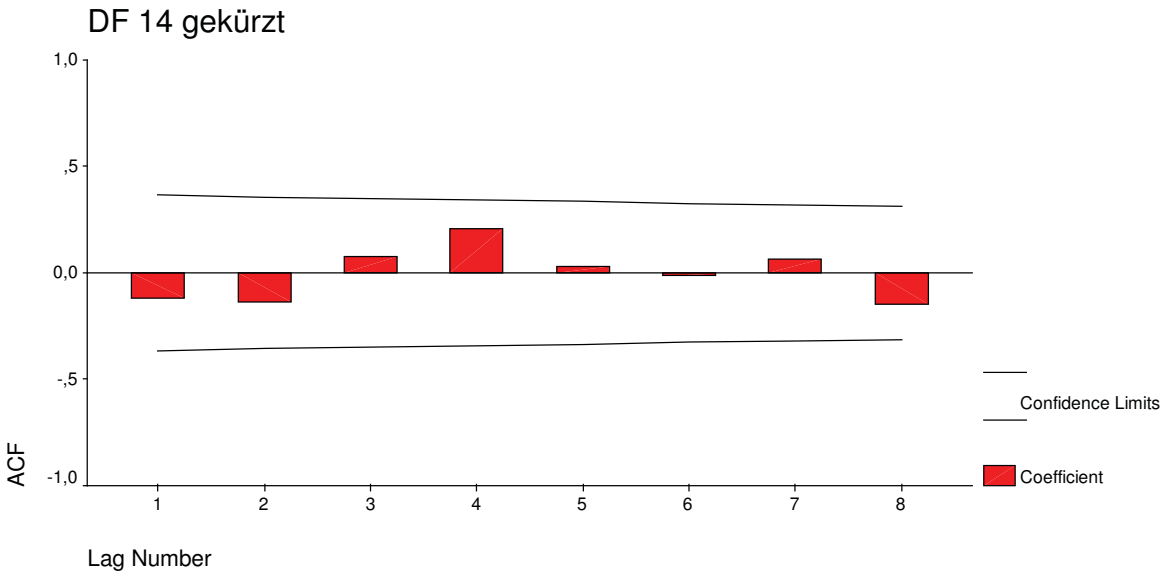


Abb. 16: Durchlauf 14 bei Probandin sechs, gekürzt ab Takt 29.

Wird der gleiche Durchlauf nur bis Zählzeit 28 erfasst, verschwinden auch noch jene signifikanten Korrelationen erster und zweiter Ordnung, die das Verhalten dieser Probandin in diesem Durchlauf dem Gruppen-Verhalten gleichen lassen. Zwar sind die Schwankungen im übrigen Notenteil vergleichsweise niedrig, Abbildung 16 bestätigt damit aber den augenscheinlichen Eindruck von Abbildung 13, dass im Grunde gar keine metrische Ordnung vorliegt. Damit wird deutlich, dass die extremen, aber periodischen Ausreißer in den letzten Zählzeiten von Durchlauf 14 sich so stark auf die Gesamtwerte des Durchlaufs auswirken, dass die Autokorrelation irrtümlich eine stabile Metrik für den gesamten Durchlauf suggeriert.

Dass die Autokorrelation auf ganze Durchläufe angewendet nur bedingte Aussagen treffen kann, zeigt ein Eingriff in den Datensatz des zuvor diskutierten Durchlaufs 14 der Probandin sechs. Der rote Graf in Abbildung 17 zeigt gut, wie die Teilnehmerin in Zählzeit 14 die vorherige Abfolge lang/kurz unterbricht und sie versetzt in 15 kurzfristig fortsetzt. Ab Zählzeit 17 sinkt das Tempo für eine kurze Zeit ab.

Wird nun eine Autokorrelation über den veränderten Datensatz (grüner Graf) gerechnet, unterscheiden sich dessen Koeffizienten trotz der massiven Eingriffe wenig von dem des

roten Verlaufs. Einzig Abstände vierter Ordnung weisen nun einen markant veränderten Pearson-Wert oberhalb der Signifikanzgrenzen auf, bei allerdings gleicher Richtung[177].

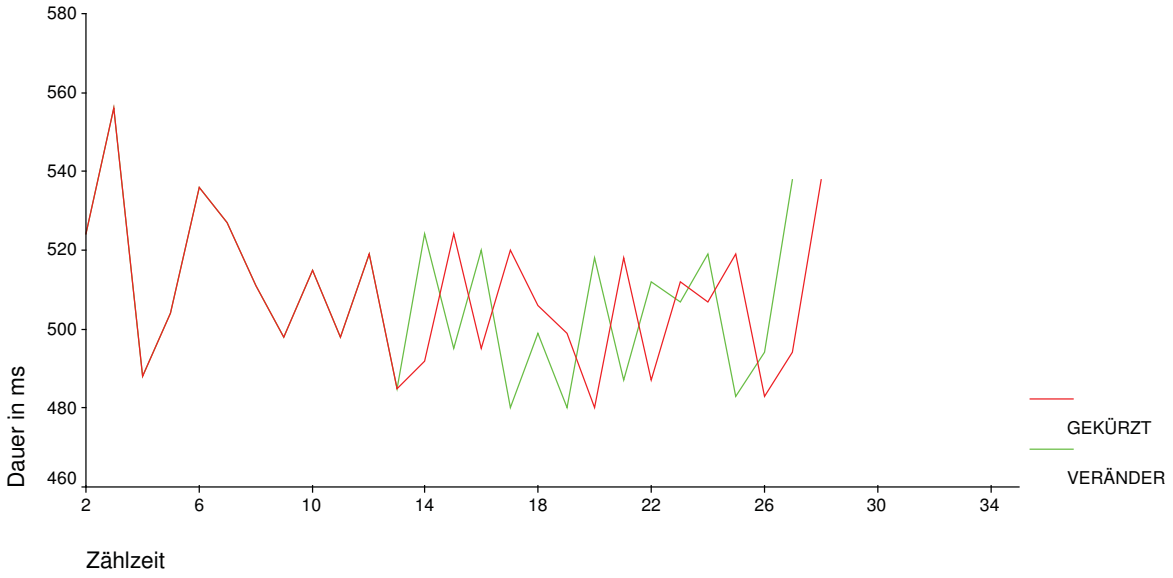


Abb. 17: Durchlauf 14 von Probandin sechs bis Zählzeit 29. Dem grünen Grafen wurde Zählzeit 14 entfernt und die ursprüngliche Zählzeit 18 um 26ms Dauer reduziert, wodurch ein annähernd periodischer Verlauf zwischen Takt neun und 26 entsteht.

Damit wird klar, dass die extremen Ausreißer ab Takt 29ff. nicht nur eine Periodizität vortäuschen. Vielmehr können Sie sogar eine verschobene – also in Phasen gegenteilige – Abfolge unkenntlich machen. Zunächst bleibt festzuhalten, dass die Autokorrelation auf gesamte Durchläufe angewendet zur Lage von Schwankungen keine Aussage treffen kann. Zusätzlich muss geprüft werden, ob sich versteckte Korrelationen ersten Grades fortpflanzen. Dazu kann die partielle Autokorrelation die zwischen den zu betrachtenden Noten liegenden Werte ausschalten.

Wie in Abbildung 18 zu erkennen ist, reduziert die partielle Autokorrelation die Werte des Zusammenhangs deutlich für Abstände größer eins. Die Werte überschreiten die Grenzen des Vertrauensintervalls bei fünfprozentiger Irrtumswahrscheinlichkeit nur noch für benachbarte Noten sowie identische Zählzeiten (fünfte Ordnung). Beim Blick auf alle Probanden wird die Wirkung der partiellen Autokorrelation an den Häufigkeiten in zweiter Ordnung signifikanter Korrelationen deutlich: Das Niveau der pinkfarbenen Linie (Abbildung elf) ist niedriger. Annehmbar existieren also kaum Zusammenhänge zwischen entfernt gelegenen Noten. Vielmehr ergeben sich die berechneten Autokorrelationen aus

[177] 0,426, vormals 0,207 bei Standardfehlern von 0,174 bzw. 0,171. Experiment\Einzelanalysen\Proband 06\Schritt 4 Auswertung in SPSS\Autokorrelationen und PAC\Manipulierter DF 14 PR 06.spo

Beziehungen erster Ordnung, die sich fortpflanzen. Ihre Wirkung nimmt im Lauf des Versuchs zu, wie der nicht gegebene Trend (pinkfarbene Linie, Abbildung elf) gegenüber dem steigenden Grafen der Autokorrelationen zeigt.

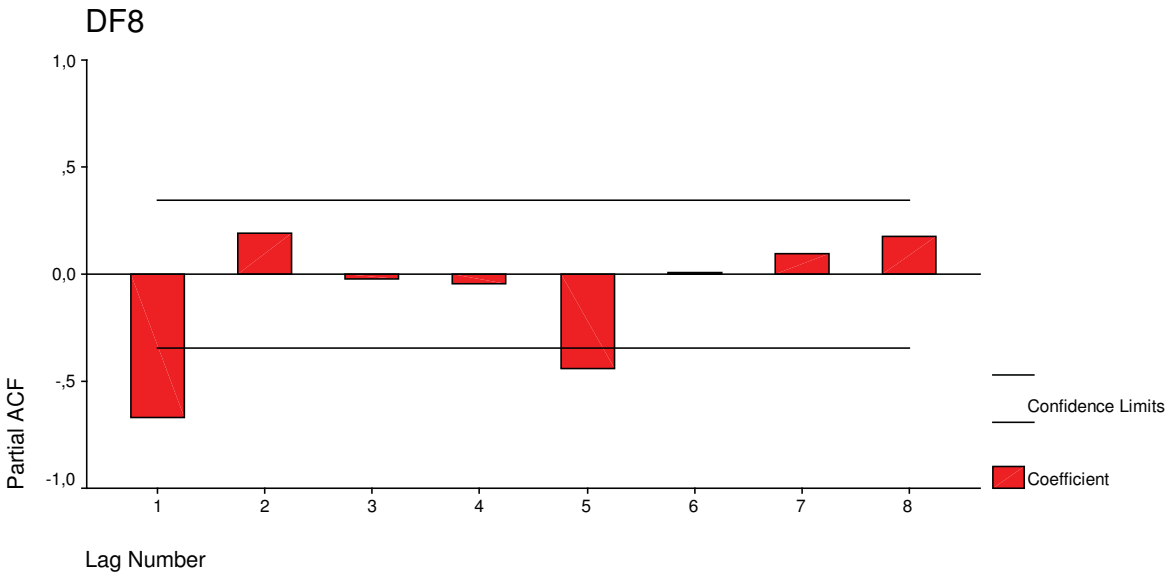


Abb.18 Korrelogramm wie Abbildung zwölf nur als Partielle Autokorrelation. Wie zu erwarten liefert die PAK deutlich niedrigere Werte für die Abstände 2ff.

Die Koeffizienten beider Verfahren liefern keine maßzahlige Aussage über die Wirkung von Störstellen auf das folgende Tempo. Zudem kann auch in der partiellen Autokorrelation eine starke Abweichung nach einer einzelnen Note (im einzelnen Durchlauf eines Probanden) in der Summe aussehen wie eine Summe kleinerer Abweichungen, die sich über mehrere Takte verteilen. Auch können wenige Ausreißer eine stabile metrische Gestaltung des gesamten Durchlauf suggerieren, wie es exemplarisch im 14. Durchlauf von Probandin neun belegt werden konnte.

Die unterschiedlichen Ergebnisse von Autokorrelation und partieller Autokorrelation liefern aber den Nachweis für die im Kapitel Methoden postulierte Notwendigkeit, periodische Mittelwertsabweichungen als Mittel der Analyse einzusetzen. Erst dieses manuelle Verfahren – das der partiellen Autokorrelation nahe steht – macht individuelle Passagen, gesamte Durchläufe oder Ausführungen verschiedener Probanden maßzahlig vergleichbar.

3.2.4. Test der Gesamtheit auf Normalverteilung

Der weiteren Auswertung dienen ausschließlich die in Kapitel 2.5.2.5. eingeführten Abweichungen in Millisekunden vom periodischen Mittelwert der jeweiligen Zählzeit. Um diese mit varianzanalytischen Methoden auswerten zu dürfen, müssen die Daten annähernd normalverteilt sein. Die Gesamtverteilung entspricht dieser Voraussetzung in eingeschränktem Maße: Zwar bescheinigen bei sehr strengen Kriterien sowohl der Chi-Quadrat-Anpassungstest als auch der Kolmogoroff-Smirnoff-Test der Gesamtheit aller Messwerte hoch signifikante Abweichungen von der Normalverteilung[178]. Indes entstehen an den Rändern dann Klassen von 1.000ms Spanne bei einmaliger Besetzung, während nahe am Mittelwert Klassen von weniger als 10ms Spanne einmalig besetzt sind. Überdies sind Klassen in der Mitte der Verteilung per Augenschein rein zufällig stark unterschiedlich besetzt: So ist die Klasse von 20ms Abweichung 23-mal besetzt, die von 20,11 nur viermal, die von 20,13ms wiederum 13-fach[179]. Dass die Strenge dieser Kriterien eine sinnvolle Aussage zuließe, Probanden wichen unzufällig seltener um 20,11 ms ab, statt um 20ms, darf bezweifelt werden.

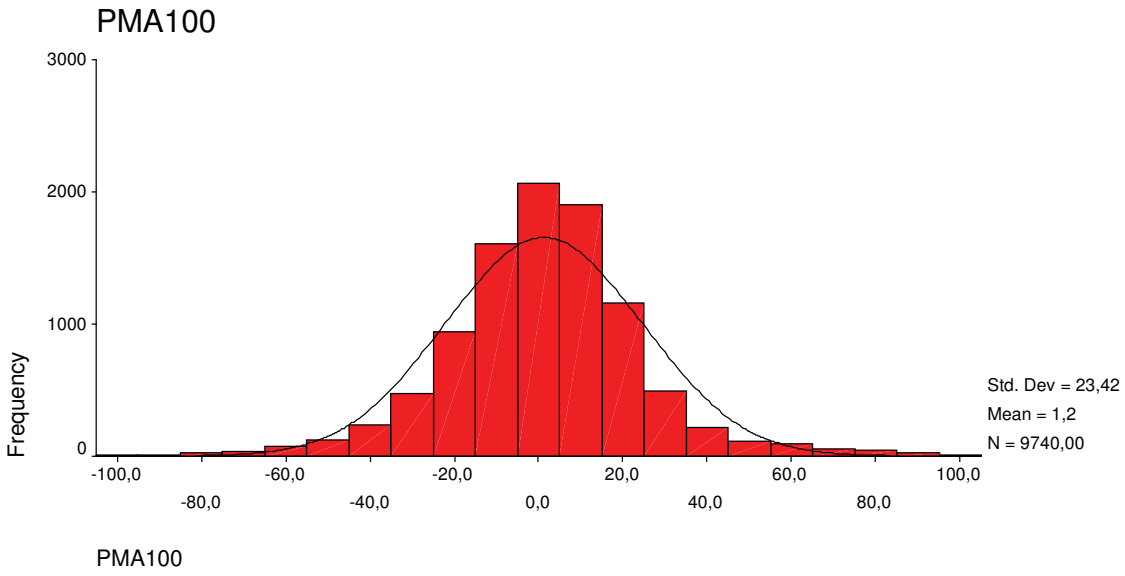


Abb. 19: Häufigkeiten der periodischen Mittelwertsabweichungen sämtlicher Probanden in allen Durchläufen im Ausschnitt -100 bis +100ms Differenz vom Erwartungswert der jeweiligen Zählzeit. Gegenüber N_{max} = 10.878 sind die Zählzeiten 1, 36 und 37 eliminiert (882 Werte) sowie 222 Ausreißer größer ± 100ms. Zudem fehlen die 34 Werte des Durchlaufs eins von Proband zwölf, die versehentlich nicht mitgeschnitten wurden.

[178] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Häufigkeiten Gesamt\Grundgesamtheit.spo: Im Chi-Quadrat-Test auf einem Niveau von von alpha = 0,000 bei erwartet mindestens 4,9-maliger Besetzung der gebildeten Klassen.
[179] Ebda.

Sind die Klassen großzügiger eingeteilt, kann die Nullhypothese – es wirkten beim Zustandekommen der empirischen Verteilung ähnliche Gesetze wie bei der theoretischen Normalverteilung – sehr wohl beibehalten werden. Bei elf Freiheitsgraden übersteigt der Chi-Wert die kritische Marke des 0,95-Quantils nicht[180]. Die erwartete Häufigkeit liegt bei 209,2 Werten je Klasse bei insgesamt 9.962 Messwerten. Dabei wird zweierlei deutlich: Werden die ursprünglich absoluten Dauern dem Chi-Quadrat-Test unterzogen, ergeben sich auch bei diesen Kriterien signifikante Werte. Dies ist ein deutlicher Hinweis auf die zuvor postulierte Normalisierung der Datenstruktur durch die Bildung periodischer Mittelwertsabweichungen.

Dies gilt auch, wenn die Verteilung um Ausreißer bereinigt wird[181]. Werden nur periodische Mittelwertsabweichungen der Spanne ±100ms betrachtet, fließen mit 9.740 rund 98 Prozent der Werte ein (siehe Abbildung 19). Die Daten bilden eine leicht überspitzte Normalverteilung[182]. Zudem deutet der Mittelwert von 1,2 Millisekunden eine gegenüber der Gesamtverteilung kaum veränderte Lage an. Denn der Mittelwert periodischer Mittelwertsabweichungen ist in der Gesamtverteilung sinngemäß null. Anders sieht die Verteilung ohne die extremsten Ausreißer bei den absoluten Dauern aus. Hier verteilen sich die 9.740 um den Mittelwert liegenden Ergebnisse deutlich abweichender von der Normalverteilung:

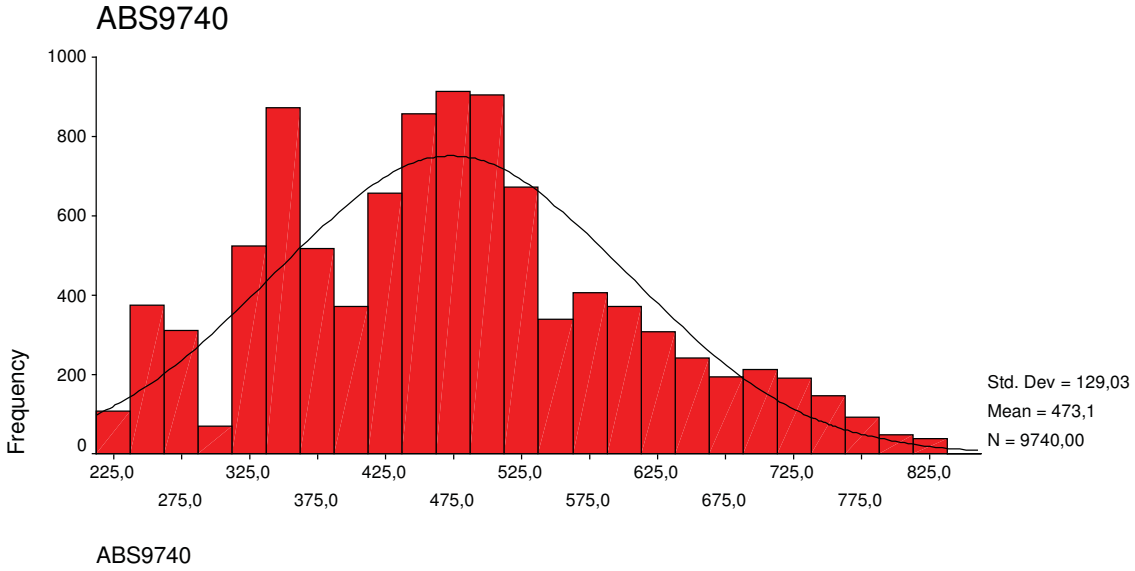


Abb. 20: 98 Prozent der um den Mittelwert rangierenden absoluten Dauern zeigen bei Besetzungsklassen von 25ms Spanne ein unregelmäßigeres Bild zur theoretischen Normalverteilung als die in periodische Mittelwertsabweichungen transponierten Ergebnisse.

[180] Ebda.
[181] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Häufigkeiten\Grundgesamtheit.spo
[182] Schiefe (Skewness) bei 0,111, Wölbung (Kurtosis) bei 2,254. Ebda.

Die Normalisierung des Datenbestandes zeigt sich am stärksten in der regelhafteren (normalverteilteren) Besetzung von Klassen im Bereich des anderthalbfachen Wertes der Standardabweichung zu beiden Seiten des Mittelwerts[183]. Die Standardabweichung sinkt durch die eliminierten metrischen Periodizitäten deutlich ab: Während die 9.740 absoluten Werte eine Spanne von 600ms – und damit für manch schnellen Probanden über zwei Zählzeiten – einnehmen, sammelt sich die gleiche Zahl von Messwerten bei den periodischen Mittelwertsabweichungen nur in einem Bereich von ±100ms[184].

Indes reagiert das System der periodischen Mittelwertsabweichungen wesentlich sensibler auf starke Ausreißer. Ursache ist die Notwendigkeit, fehlende Anschläge bei der Umwandlung nicht als Abweichung von null Millisekunden würdigen zu dürfen. Denn dies bedeutete eine ideale Übereinstimmung des empirischen mit dem erwarteten Tempo. Die Transformation von nicht vorhandenen Anschlägen in periodische Mittelwertsabweichungen führt aber zur Verlängerung der vorangegangenen Note, da ein diese Zählzeit beendender Anschlag erst später (nach der ausgelassenen Note) folgt. So erhöhen zwei nacheinander ausgelassene Zählzeiten die Häufigkeit in der Klasse null Millisekunden bei absoluten Dauern lediglich um den Wert zwei und fallen damit kaum ins Gewicht. Hingegen entstehen bei periodischen Mittelwertsabweichungen (je nach Grundtempo) Differenzen von teilweise über 1.000ms und mehr, je nachdem, wie viele Anschläge nacheinander ausgelassen wurden.

An ihren Rändern besitzt die empirische Verteilung periodischer Mittelwertsabweichungen möglicherweise andere Erwartungswerte als die theoretisch angenommene. Dies entspricht der allgemeinen Beobachtung empirischer Tests aus ganz unterschiedlichen Testumfeldern: Demnach sind Werte zu Prozessen und Merkmalen der Natur meist nur im mittleren Bereich annähernd normalverteilt[185]. Die maßgebliche Voraussetzung für die Anwendung varianzanalytischer Methoden – die annähernde Normalverteilung der Daten – ist aber erfüllt.

3.2.4.1. Test einzelner Streuungen auf Normalverteilung

Der Blick auf einzelne Probanden ist uneinheitlicher. Zwar schwanken alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer – bei zunächst grafischer Analyse – im Tempo eher

[183] Entsprechend ist die Kurtosis der Gesamtverteilung der periodischen Mittelwertsabweichungen mit einem Wert von 275,39 viel zu hoch. Die absoluten Dauern weisen nur einen Wert von 15,04 auf.
[184] Standardabweichung 23,42 gegenüber 129,03ms.
[185] Sachs 2006, S. 335.

normalverteilt um den Mittelwert von null Millisekunden als vergleichsweise lognormal-, linear- oder gleichverteilt. Dennoch sollten alle Verteilungen geprüft werden. Erneut dient dazu der Chi-Quadrat-Anpassungstest in SPPS. Es wurden zehn Klassen von Erwartungswerten gebildet. Geprüft wurde über alle Durchläufe probandenweise auf Basis periodischer Mittelwertsabweichungen. Es ergeben sich neun Freiheitsgrade. Der kritische Wert für Chi-Quadrat liegt bei 16,92.

Lediglich Probandin elf und Proband 14 wiesen auffällig unterfrequentierte Klassen auf: Zehn waren weniger als fünfmal aber zumindest dreimal besetzt[186]. Alle anderen Klassen waren häufiger als fünfmal besetzt. Zum Teil lagen die Werte niedrigster Besetzung bei den anderen Probanden bei zehn und darüber. Kein Proband überschreitet den kritischen Wert für Chi-Quadrat von 16,92. Die zusammengefasste Streuung der Messwerte aus 14 Durchläufen folgt bei jedem Probanden also in ausreichendem Maße einer Normalverteilung.

Indes bleibt zu berücksichtigen, dass ein umfangreicher Datenbestand vorliegt. Einzelne Durchläufe oder Paare von Durchläufen können durchaus erkennbar von der Masse annähernd normalverteilter Werte abweichen. Insbesondere ist zu klären, ob die beobachteten Ausreißer systematisch einem bestimmten Umfeld, also bestimmten Zählzeiten, bestimmten Durchläufen oder Probanden mit ähnlichen Merkmalen entstammen. Dies geschieht anhand der parametrischen Blockvarianzanalyse, die mit dem nichtparametrischen Friedman-Test kontrolliert wird. Dieser bedient sich ebenfalls zum Test auf Normalverteilung der Chi-Quadrat-Anpassung. So werden auch künftig ausgewählte Datenausschnitte auf ihre Verteilungsform hin geprüft.

3.2.5. Temposchwankungen allgemein

Das arithmetische Mittel der Gesamtverteilung oder ganzer Durchläufe ist bei periodischen Mittelwertsabweichungen sinngemäß null. Dem Blick auf das Gesamtverhalten dienen daher richtungslose Schwankungen (Quadratwurzel des quadratischen Mittels). Mehr als zwei Drittel der Probanden weichen alle Durchläufe und Zählzeiten betrachtet durchschnittlich um weniger als 20ms von den erwarteten Dauern der jeweiligen Zählzeiten ab[187]. Der Mittelwert aller Probanden liegt bei 22,29ms. Die Schwankungen von 15 der 21 Teilnehmer haben eine Standardabweichung zwischen 15

[186] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Häufigkeiten\Grundgesamtheit nach Probanden.spo

und 50ms[188], zwölf unterhalb von rund 30ms[189]. Die Tempopräzision der Probanden liegt damit im Bereich der von Rasch 1988 gemessenen Abweichungen bei Einsatzzeiten im Orchesterspiel[190], zum Teil darunter[191].

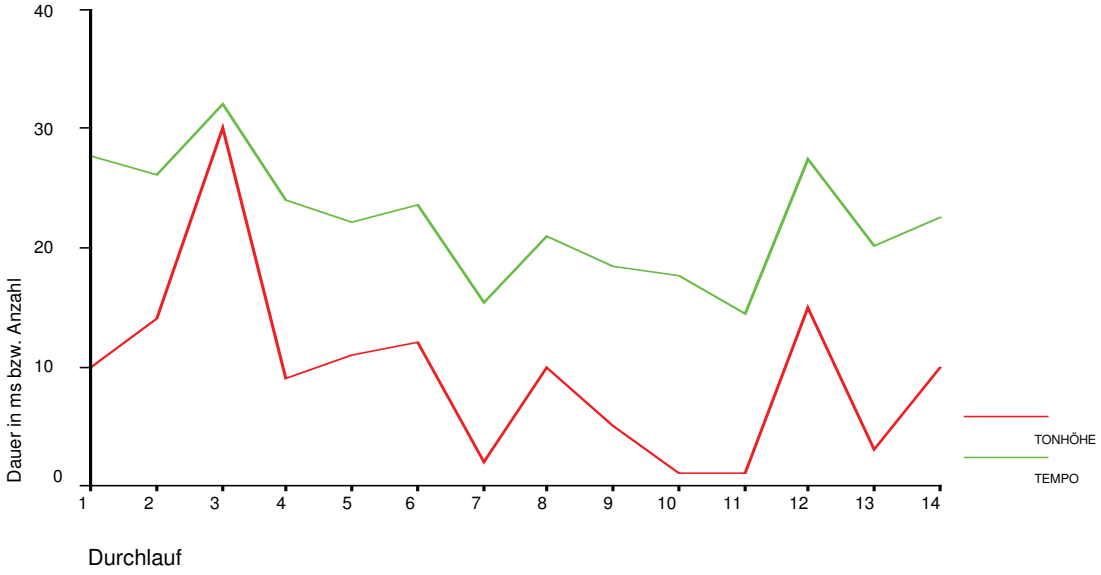


Abb. 21: Zahl aller Tonhöhenfehler sowie mittlere Tempoabweichungen in ms: richtungslose Mittel (Wurzel des quadratischen Mittels) aller periodischen Mittelwertsabweichungen aller Probanden im jeweiligen Durchlauf.

Vielfach konnten in den einzelnen Durchläufen richtungslose Abweichungen von im Mittel weniger als zehn Millisekunden beobachtet werden. Proband zehn erreicht im unmanipulierten Durchlauf elf sogar einen Wert von lediglich 6,79ms. Die Spitze markiert Probandin zwölf mit einem Wert von 92,18ms über all ihre Durchläufe gerechnet. Ihre im Vergleich zu den anderen Probanden in allen Durchläufen höheren Werte zeigen dennoch den typischen Verlauf mit Höhen in den Durchläufen drei, zwölf und 14 sowie abnehmende Schwankungen im Lauf des Versuchs.

Über alle Probanden gerechnet korrespondieren die Schwankungen deutlich mit der Zahl an Tonhöhenfehlern im jeweiligen Durchlauf[192]. Die Schwankungen schwinden nach dem

---

[187] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Ungerichtete Mittel Abweichungen.xls\gesamt quadriert

[188] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Häufigkeiten\Grundgesamtheit nach Probanden.spo

[189] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Häufigkeiten\Gesamtheit nach Probanden.spo

[190] Rasch 1988. Siehe dazu Kapitel 2.3.1. Zwar beobachtet Rasch die Einsätze von Blas- und Streichinstrumenten. Der zeitliche Aufbau des charakteristischen Klangbildes von Klaviertönen unterscheidet sich jedoch nur gering von den Flankenzeiten für Streichinstrumente. Insofern ist eine besondere auditive Wahrnehmungsgrenze für Pianisten – zumindest auf Basis dieser instrumental-akustischen Schulung – nicht anzunehmen.

[191] Siehe dazu auch Kapitel 3.2.6.2.

[192] Pearson-Wert bei zweiseitiger Fragestellung mit einem Wert von 0,9 bei 1-prozentiger Irrtumswahrscheinlichkeit hoch signifikant. Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Korrelationen\Korrelation Tonhöhenfehler Schwankung.spo

Spitzenwert von 32,04ms des dritten Durchlaufs, der die ersten großen Störstellen mit 100ms enthält. Die ungestörten Durchläufe sieben und elf bergen geringste Abweichungen von lediglich 15,30 und 14,43ms. Ehe die ersten Unterdrückungen im zwölften Durchlauf auftreten, haben die Probanden sich soweit an die manipulierte Situation gewöhnt (mutmaßlich ein Lerneffekt), sodass gestörte und unbeeinflusste Durchläufe tatsächlich ähnlich gespielt werden, etwa im Vergleich der Durchläufe zehn und elf.

Die mit Unterdrückungen versehenen Durchläufe zwölf und 14 durchbrechen wie bei den Tonhöhenfehlern den im Lauf der Versuchsreihe abnehmenden Trend. Die Vermutung aus der Analyse der Tonhöhenfehler könnte sich also bestätigen: dass motorisches Handeln nach Störstellen nicht zweifelsfrei unabhängig von der akustischen Rückmeldung auf eine dafür ursächlich motorische Handlung ist.

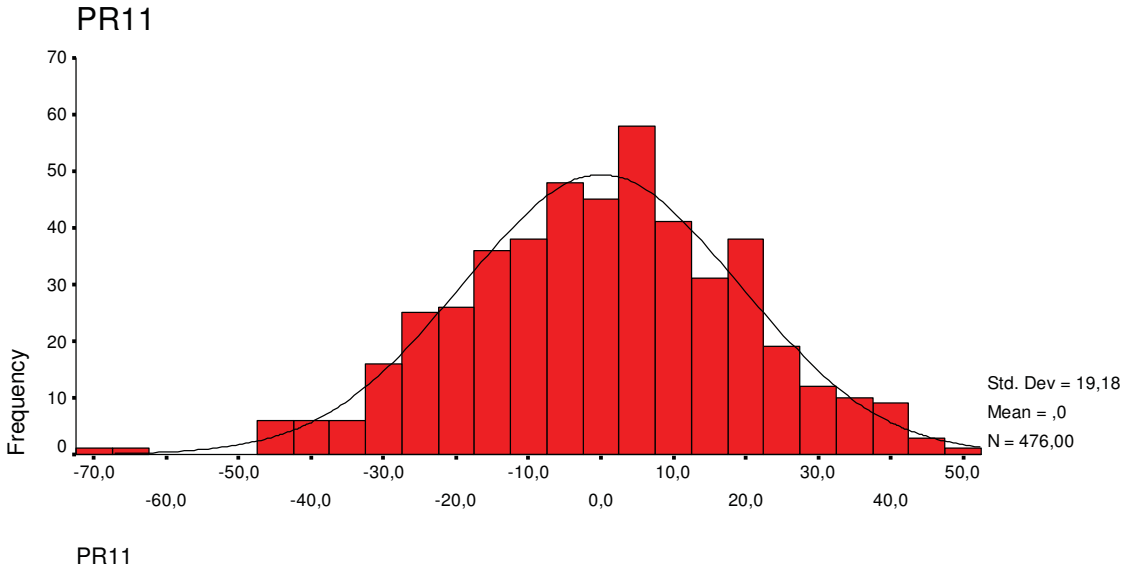


Abb. 22: Periodische Mittelwertsabweichungen mit Vorzeichen betrachtet: Probandin elf zählt zu jener Gruppe mit schwach linkssteilen, annähernd normalverteilten Schwankungen bei geringer Standardabweichung. Schiefe -0,169ms.

Bei zehn Probanden bilden die Schwankungen eine überspitzte Normalverteilung. Die anderen sind normal- oder flachgipfelig normalverteilt. Dass der tatsächliche Schwerpunkt der Schwankungen bei den Probanden zum Teil leicht vom arithmetischen Mittelwert null abweicht, zeigen die Werte der zugehörigen Mediane[193]: Um 0,33 bis 3,62 Millisekunden

[193] Während der Mittelwert die Summe der Abweichungsquadrate minimiert, reduziert der Median (das zentrale Lagemaß) die absolut genommene Summe der Abweichungen. Es entstehen ausschließlich positive Werte. Extremwerte (Ausreißer) beeinflussen den arithmetischen Mittelwert bei der Bewertung der zentralen Lage erheblich. „Man sagt, der Mittelwert ist ein empfindliches Lagemaß." Hingegen ist der Median ein robustes Lagemaß. Siehe Sachs 2006, S. 69.

weichen sie vom Mittelwert ab. Die Abweichungen der Probandin zwölf sammeln sich tendenziell bei 15,10 Millisekunden. Ihr Verhalten unterscheidet sich hier von anderen Teilnehmern. Maßgeblich ist der abweichende Schwerpunkt durch starke Ausreißer begründet. Wird das Vorzeichen betrachtet, ist zu erkennen, dass es erheblich zu spät angeschlagene Zählzeiten sind.

Diese führen zu schwach asymmetrischen Verteilungen[194]. Ein bei Sachs (2006) erwähntes Phänomen konnte auch in dieser Studie beobachtet werden: Linkssteile Verteilungen sind in der Biologie und Medizin wesentlich häufiger zu finden als rechtssteile[195]. Hier weisen 20 der 21 Probanden linkssteile Verteilungen auf. Lediglich Proband 13 zeigt eine allerdings mit verschwindenden 0,002ms rechtssteile Verteilung. Er ist derjenige, der das höchste Tempo spielt. Merkmale verteilen sich laut Sachs dann asymmetrisch normal, wenn das Merkmal einen Schrankenwert nicht unter- oder überschreiten kann[196].

Abbildung 22 offenbart, dass diese Linkssteilheit nicht wie etwa bei Probandin 15 allein durch extreme Ausreißer verursacht werden muss. Bei Probandin elf sind es vielmehr Schwankungen von -70 und -65ms, die Überspitzungen in den Klassen fünf und 20ms ausgleichen. Bei nahezu allen Teilnehmern ist generell zu beobachten, dass den Überspitzungen bei geringen positiven Abweichungen – schwach gedehnten Zählzeiten – eine geringere Zahl größerer oder gar einzelner extremer Verkürzungen gegenüberstehen[197].

Ein Schrankenwert wie von Sachs benannt kann daraus nicht eindeutig bestimmt werden. Zwar laufen fast alle Verteilungen rechts bei plus 100ms aus. Dennoch gibt es ganz wenige einzelne Ausreißer mit Werten von bis zu plus 811ms. Dieser Wert stammt von Probandin drei und markiert zugleich etwa die mittlere Dauer ihrer Zählzeiten. Ähnliches ist bei den Probanden neun, zwölf und 16 zu beobachten. Insofern könnte interpretiert werden, dass die von Sachs genannte Schranke die Vorverlagerung mit der Dauer einer Zählzeit ist: Die Pianisten ziehen Noten, wenn sie diese falsch anschlagen, nicht um mehr als eine Zählzeit vor. Unter den ohne die Zählzeiten eins, 36 und 37 insgesamt 9.962 berücksichtigten Messwerten finden sich nur sechs Anschläge, die stärker als die mittlere Zählzeitdauer von rund 477ms nach vorn verlagert sind. Hingegen gibt es 21 Anschläge, die länger als eine mittlere Zählzeit verschleppt wurden[198].

---

[194] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Häufigkeiten\Grundgesamtheit nach Probanden.spo
[195] Sachs 2006, S. 155.
[196] Sachs 2006, S. 204.
[197] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Häufigkeiten\Grundgesamtheit nach Probanden.spo
[198] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Häufigkeiten\Grundgesamtheit.spo

Ein valider Nachweis wäre indes über eine eigenständige Versuchsanordnung zu prüfen. Allgemein bleibt festzuhalten, dass die Teilnehmer nicht erheblicher im Tempo schwankten als Rasch dies 1988 im Orchesterverband beobachtete, dass zudem hoch signifikante Zusammenhänge mit dem Auftreten von Tonhöhenfehlern vorliegen und dass das Tempo im Lauf des Versuchs präziser wird, wobei der Lerneffekt von Durchlauf zwölf mit Unterdrückungen negativ durchbrochen wird.

3.2.6. Gruppenverhalten (paarweise)

3.2.6.1. Kreuzkorrelationen

Kreuzkorrelationen sollen einen ersten Eindruck über Zusammenhänge verschiedener Durchläufe geben, und dies auch im interindividuellen Vergleich. Gerechnet wird erneut mit periodischen Mittelwertsabweichungen. Alle 14 mal 21 Durchläufe werden paarweise auf Kreuzkorrelationen ihrer periodischen Mittelwertsabweichungen bei identischen Zählzeiten überprüft (Abstand null). Die Signifikanz der Koeffizienten nach Pearson wurde wiederum bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von fünf Prozent getestet[199].

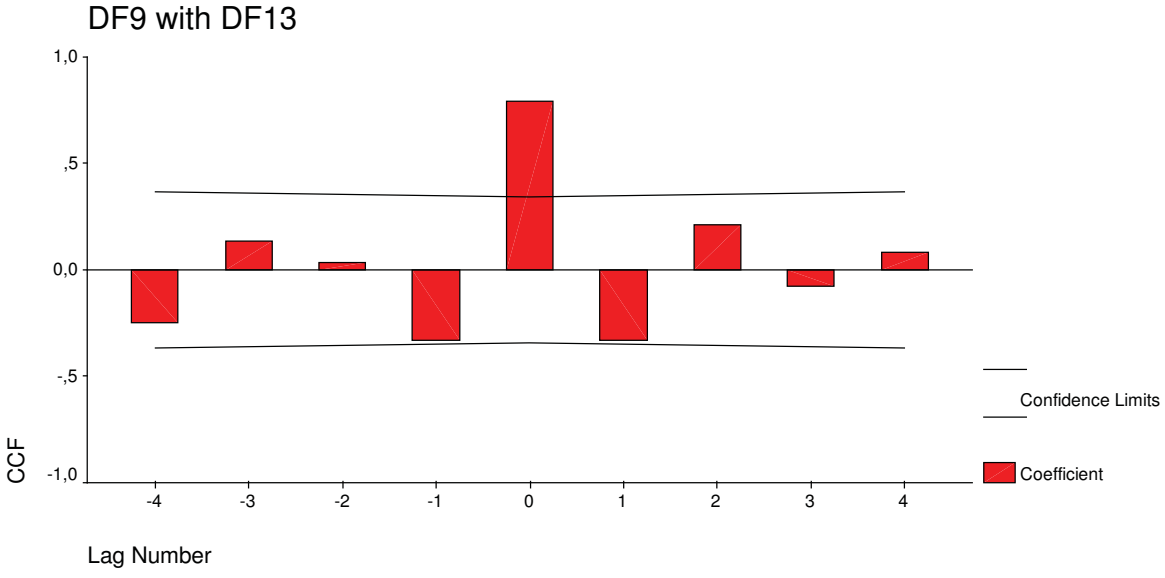


Abbildung 23 zeigt einen typischen Befund: Proband 13 gestaltet die Zählzeiten des 120er Durchlaufs signifikant ähnlich zum Durchlauf 13 mit 100er Störstellen. Der Pearson-Koeffizient liegt bei 0,791, der Standardfehler beträgt 0,171, die Signifikanzgrenzen liegen damit bei einem Wert von ± 0,342. Die Störstellen beider Durchläufe liegen auf identischen Zählzeiten.

[199] Nach Ljung/Box.

Von den 91 Vergleichspaaren spielten die 21 Probanden 957 der maximal 1.911 Kombinationen[200] in signifikant positiv korreliertem Verhältnis[201], also oberhalb des zweifach positiven Wertes für den Standardfehler. Lediglich acht verglichene Durchläufe zeigten signifikant negative Zusammenhänge, wovon Probandin drei allein vier spielte. Mit 0,42 Prozent am gesamten Datenbestand sind sie gegenüber den 50,08 Prozent positiv korrelierter Gänge zu vernachlässigen.

In einem zweiten Schritt wurden für jeden der Durchläufe eins bis 14 die signifikanten Korrelationen zu Durchläufen mit 50er, 80er, 100er und 120er Störstellen, jenen mit Unterdrückungen sowie unmanipulierten Durchläufen gezählt. Zudem wurde das prozentuale Auftreten positiver Korrelationen bei jeder Kombination ermittelt.

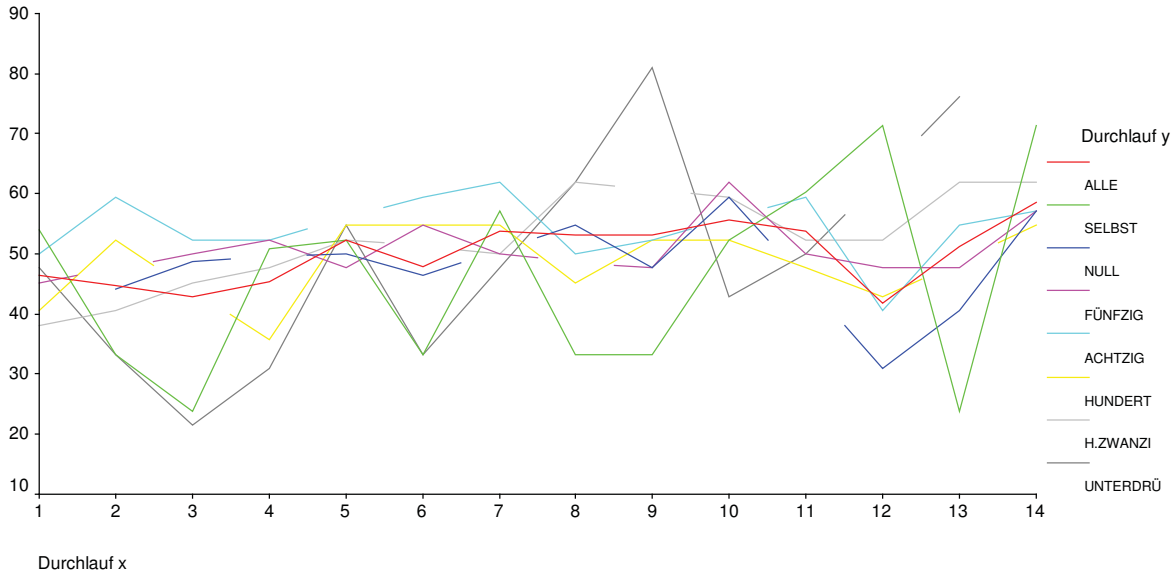


Abb. 24: prozentuale Häufigkeit, mit der ein Durchlauf x in signifikanter Korrelation zu anderen – nach Beschaffenheit klassifizierten – Durchläufen y gespielt wurde.

Abbildung 24 zeigt die 14 Durchläufe in ihrer Ähnlichkeit zu anderen Durchläufen definierter Beschaffenheit[202]. Die Korrelationen[203] zwischen Durchläufen identischer Störgröße (grün) sowie zwischen Durchgängen mit Unterdrückungen (dunkelgrau) verlaufen in den ersten sieben Durchläufen ähnlich, wobei sie bereits im zweiten, dritten

[200] Bei n=21, k=14: n * k *((k-1)/2))
[201] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Kreuzkorrelationen\Zählung Häufigkeiten Kreuzkorrelationen.xls\Mittlere Häufigkeit
[202] Um die prozentualen Häufigkeiten der signifikanten Kreuzkorrelationen des Durchlaufs x mit anderen zu ermitteln, wurde die absolute Häufigkeit der belastbaren Korrelationen durch die Kombinationshäufigkeit des Durchlaufs geteilt. Beim Vergleich mit allen anderen (rote Linie) muss seine absolute Häufigkeit durch 13 dividiert werden, beim Vergleich mit gleichgestalteten durch zwei oder vier, je nachdem wie viele identische Durchläufe es im Versuch gibt. Entspricht der Durchlauf x selbst einer dieser Kategorien, wird kein y-Wert dargestellt, da er bereits durch die Kurve SELBST erfasst ist.
[203] Positive.

und sechsten Gang von den übrigen, eher unauffälligen Grafen abweichen[204]. Durchlauf drei und sechs mit den ersten großen Störstellen korrespondieren also seltener mit identischen und unterdrückten Durchgängen als mit anderen, zum Beispiel mit den unmanipulierten Vorlagen (blaue Linie bei 48,8 Prozent[205]).

Spätestens mit Durchlauf neun korrespondieren die Verläufe der grünen und dunkelgrauen Linien nicht mehr. Während die Zählzeiten von Durchlauf neun zu 80,95 Prozent der Durchgänge mit Unterdrückungen signifikante Beziehungen aufweisen, ist ihre Ähnlichkeit zum identisch aufgebauten Durchlauf sechs nur bei einem Drittel aller Vorträge belastbar gegeben. Lediglich ein Drittel der neunten Durchläufe ähnelt damit zugleich seinem Pendant und den unterdrückten Durchläufen. 47,62 Prozent weisen hingegen eindeutig nur Beziehungen zu den unterdrückten auf. Es ist also wahrscheinlicher, dass die Ähnlichkeit des Durchlaufs neun zu den unterdrückten Gängen von jenen Probanden ausgeht, deren Spiel nicht mit Durchlauf sechs korreliert.

Das Ergebnis wirkt umso interessanter, da eine Analogie bei den 100er Durchläufen vorliegt: In Durchlauf 13 zeigt die dunkelgraue Linie der Vorlagen mit Unterdrückungen einen deutlichen Ausschlag mit 76,2 Prozent. Der Pearson-Koeffizient erreichte bei einem Standardfehler von 0,171 auf 95-prozentigem Signifikanz-Niveau zahlreiche Werte über 0,6, bei einem Probanden sogar von mehr als 0,9[206]. Hingegen zeigen wenige 23,8 Prozent der dreizehnten Gänge signifikante Ähnlichkeit zum eigenen Pendant, dem Durchlauf drei. Diese Ergebnisse sind markant, zeigen sie doch, dass die meisten Probanden den 13. Durchlauf wesentlich anders gestalten als das Pendant Durchlauf drei. Werden die übrigen Durchläufe mit ihren Gegenstücken verglichen, ist die Ähnlichkeit höher.

Betrachtet man zusätzlich den bis zur Mitte des Versuchs gleichförmigen Verlauf beider Kurven sowie die bei allen Durchläufen recht gleichmäßig um den Wert von 50 Prozent gestaffelten Verhältnisse zu Gängen mit 50er und 80er Störstellen sowie zu allen übrigen 13, so liegt der Schluss nahe, dass ein mutmaßlich veränderliches Verhalten der Probanden im Lauf des Versuchs maßgeblich von den Durchläufen mit großen Störstellen

---

[204] Die Zahlen korrelierter Paare für Durchläufe mit niedriger und mittlerer Störstellen bis 80ms verändern sich kaum im Verlauf des Versuchs.

[205] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Korrelationen\Zählung Häufigkeiten Kreuzkorrelationen.xls\Mittlere Häufigkeit

[206] Probandin 17 im Vergleich der Durchläufe 13 und 14. Siehe dazu: Experiment\Einzelanalysen\Proband 17\Schritt 4 Auswertung in SPSS\Kreuzkorrelationen\Restkomponente PR 17 Erste Hand.txt

ausgeht, und zwar ab Mitte des Versuchs und tendenziell hin zu einer Gestaltung, die 100er, 120er und Durchläufe mit Unterdrückungen einander ähnlicher werden lässt[207].
Spätestens der 120er Durchlauf neun scheint diese Veränderung zu bringen. Die Kreuzkorrelationen konnten indes keine Aussage dazu treffen, ob die signifikanten Übereinstimmungen Resultat gleichen Tempos ohne Schwankungen oder gleicher periodischer Mittelwertsabweichungen sind. Offen bleibt die Frage, ob die einer idealen Korrelation abträglichen Unterschiede gleich über das Notenbild verteilt sind oder konzentriert auf bestimmte Bereiche. Wäre letzteres der Fall, müsste präzisiert werden, ob die Bereiche eher auf Störstellen fallen oder in deren Nachfeld.
Überdies kann eine länger oder kürzer als erwartet dauernde Zählzeit durch vor- respektive nachzeitigen Anschlag entstehen oder durch nach- respektive vorzeitigen Anschlag der Folgezählzeit. Die Dauern der vorausgehenden, insbesondere aber der nachfolgenden Zählzeiten sind daher in Einzelauswertung zu begutachten, weil Kreuzkorrelationen keine Aussage über die exakte Lage der Ähnlichkeiten im Notenbild treffen können. Die Kreuzkorrelationen deuten jedoch an, dass die Probanden in Durchlauf 13 möglicherweise noch unter dem Einfluss des vorangegangenen mit Unterdrückungen stehen. Dies könnte die ähnliche Gestaltung wie auch seine Verschiedenheit vom eigenen Pendant Durchlauf drei erklären. Es zeigt aber nicht, ob auch die Noten mit Unterdrückungen so gespielt werden wie in Durchlauf 13, wo sie wieder erklingen.

3.2.6.2. Typisierung der Zählzeiten

Soll eine allgemeine Aussage getroffen werden können, wie die Probanden sich in bestimmten Spielsituationen verhalten, reicht es nicht aus, auf die jeweilige Zählzeit eines einzelnen Durchlaufes zu verweisen. Denn ein Befund, die Teilnehmer dieses Experimentes wichen beispielsweise nach einer 100er Störstelle im zweigestrichenen E des vierten Taktes von Durchlauf drei im Mittel um y Millisekunden ab, ist nicht allgemein übertragbar. Um diese Aussagefähigkeit der Daten zu erzielen, wurden Zählzeiten typisiert und für jeden Teilnehmer einzeln sowie gruppenweise verglichen.
Typen bildeten jeweils Zählzeiten, die keine Störstelle enthielten, jene die gestört waren sowie die ersten, zweiten und dritten Folgezählzeiten nach Störstellen und unterdrückte

[207] Der Einbruch der grünen Linie in Durchlauf 13 zeigt die Korrelation zum Pendant im dritten Durchlauf. Die Anzahl korrelierter 13. Durchläufe zu 120ern und unterdrückten ist hingegen hoch. Auch Durchlauf zwölf und 14 zeigen

Zählzeiten. Gerechnet wird zunächst mit Beträgen periodischer Mittelwertsabweichungen, indem Differenzen vom Erwartungswert quadriert und im Anschluss deren Quadratwurzeln gezogen wurden[208]. Ungestörte Zählzeiten weichen in ihrer zeitlichen Gestaltung unwesentlich von den mittleren Schwankungen der gesamten Verteilung ab, nämlich um 22,49 gegenüber 22,29ms[209]. Der Pearson-Wert in zweiseitiger Fragestellung bestätigt den engen Zusammenhang zwischen den ungestörten und allen Zählzeiten mit einem Wert von 0,907, getestet bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von nur einem Prozent[210].

Indes war nicht zu erwarten, dass die Ungestörten sich erheblich unterschieden, da sie die größte Teilmenge aller Zählzeittypen bilden[211]. Nur Durchlauf drei lässt geringfügig höhere Instabilitäten der ungestörten Zählzeiten gegenüber der Gesamtheit (Gesamtverteilung) erkennen. Hingegen verzeichnen die Durchläufe neun, zwölf und 14 mit hohem Schwierigkeitsgrad in den Ungestörten geringere Beträge bei den Abweichungen als die Gesamtheit. In diesen Durchläufen fallen Schwankungen also noch stärker auf die Störstellen selbst. Im 13. hingegen ist kaum ein Unterschied festzustellen.

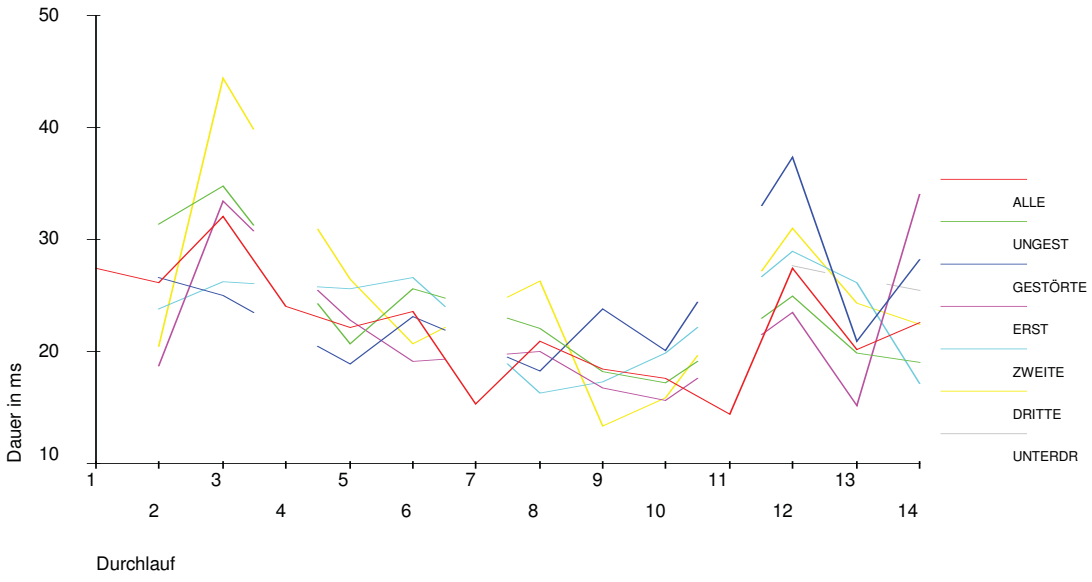


Abb. 25: Gemittelte Beträge der residualen Schwankungen sämtlicher Probanden während der Durchläufe eins bis 14

---

zahlreiche mit den 120ern korrelierte Gänge.

[208] Der Korrelationsquotient nach Pearson weist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von einem Prozent für alle Zählzeittypen hoch signifikant positive Zusammenhänge in der Gestaltung der Probanden auf: Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Korrelationen\Zählzeittypen quadriert.spo

[209] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Ungerichtete Mittel Abweichungen.xls\Ungestörte. Durchlauf eins des Probanden 13 wurde dabei versehentlich nicht mitgeschnitten, verändert bei Nichtberücksichtigung (n-1) aber das Verhältnis zwischen X, Xi. und X.j. Flössen nur DF 2 bis 14 von PR13 in die Mittelwertsberechnung ein, ergäben sich X=22,21, Xi.=22,31 und X.j=22,26. Soll diese Unstimmigkeit umgangen werden, kann nicht wie bei arithmetischen Mitteln der Wert =0 gesetzt werden, sondern das (dieses Xi selbst einbezogene) dem Gesamtmittel entsprechende Xi. Der gesetzte Wert wurde auf 13 Nachkommastellen bestimmt.

[210] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Korrelationen\Zählzeittypen quadriert.spo

[211] 290 von 476 für jeden Probanden: Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Häufigkeiten\Grundgesamtheit.xls\ungestörte

Unterdrückte Zählzeiten besitzen das instabilste Tempo mit 26,53ms mittlerer Schwankung[212]. Neben den unterdrückten liegen die dritten Folgezählzeiten mit 24,54ms ebenfalls erkennbar über dem Durchschnitt. Dennoch weisen sie eine hoch signifikante Ähnlichkeit zur Gesamtheit aller Zählzeiten und Durchläufe auf[213]. Das heißt, die Größe der Schwankungen der dritten Folgezählzeiten verändert sich im Verlauf des Versuchs ähnlich wie das Mittel aller Messwerte. Auch haben die dritten Folgezählzeiten eine signifikante Beziehung zu den ungestörten Zählzeiten[214] sowie zu den ersten Folgezählzeiten[215] und diese wiederum zur Gesamtheit[216].
Insgesamt zeigen die Durchläufe drei, zwölf und 14 die markantesten Ergebnisse. In Durchlauf drei unterscheiden sich die Typen am deutlichsten: Ihre mittleren Schwankungen liegen hier um 19,33ms auseinander und damit um fast zwei Drittel der Schwankungsbreite der Gesamtheit in diesem Durchlauf[217]. Durchlauf zwölf und 14 durchbrechen erneut den Trend der Versuchsreihe: So steigen die Abweichungen im zwölften Gang bei allen Zählzeittypen an. Ob Zählzeiten nach Störstellen verlängert oder gekürzt werden – dem Notenbild immanente metrische Strukturen eventuell verstärkt – oder Probanden sich gegenteilig verhalten oder gar kein Zusammenhang mit der Metrik vorliegt, kann bislang nicht gesagt werden. Indes ist diese Unterscheidung im Rahmen der Studie nicht notwendig, wie das folgende Kapitel verdeutlicht.

3.2.6.3. Exkurs: Nichtlineare Tempofunktion

Die Abweichung einer einzelnen Zählzeit von ihrem Erwartungswert zeigt das lokale Tempo in Abweichung vom erwarteten lokalen Tempo (periodisches Mittel). Die Summe sowie das Mittel aller Abweichungen gleicher Zählzeiten von ihrem periodischen Mittel im Durchlauf ergeben mit Betrachtung des Vorzeichens sinngemäß null.
Die bewusst gewählte Notenvorlage und technische Bedingungen der Software haben zusammen mit den Alternativhypothesen dieser Arbeit nur wenige Positionen für Störstellen zugelassen. Im Ergebnis fallen Störstellen einzig auf starke Zählzeiten. Es muss bedacht werden, dass den definierten Zählzeittypen[218] trotz Umrechnung in

[212] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Ungerichtete Mittel Abweichungen.xls\Vergleich Durchläufe
[213] Pearson-Wert von 0,836 bei einprozentiger Irrtumswahrscheinlichkeit (zweiseitige Fragestellung).
[214] Pearson-Wert 0,675, alpha = 0,05.
[215] Mittel bei 21,89ms, Pearson-Wert 0,658, alpha = 0,05.
[216] Pearson-Wert von 0,646, alpha = 0,05.
[217] 32,04ms. Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Ungerichtete Mittel Abweichungen.xls\gesamt quadriert. Dort Zeile 25.
[218] Gesamtheit, ungestörte, gestörte sowie erste bis dritte Folgezählzeiten und unterdrückte.

periodische Mittelwerte dennoch Akzente innewohnen. Mit einem Vergleich aus der Analysis formuliert: Die periodischen Mittel definieren zwar Erwartungswerte y in ms für die Zeitpunkte x (Zählzeiten). Deren Periodizität im Koordinatensystem zwingt aber zu der Annahme, dass der Folge an Punktwerten eine nichtlineare, globale Tempofunktion zu Grunde gelegt werden kann. Woraus folgt, dass dem Grafen dieser nichtlinearen Funktion zu unterschiedlichen Zeiten x verschiedene Steigungen innewohnen.
Im Notenbild müsste jeder Zählzeit somit zum Erwartungswert einer Dauer in Millisekunden auch eine Tempoveränderung (Steigung) zugeordnet werden. Und wenn externe Ereignisse wie Störstellen Auswirkungen auf absolute Dauern haben, müsste auch geprüft werden, ob das Tempo zum Zeitpunkt der Beobachtung steigt oder sinkt und in welchem Maße dies der Fall ist. Denn auszuschließen ist nicht, dass Störstellen identischer Größe unterschiedliche Wirkungen erzeugen, je nachdem, welche Zählzeit und damit Tempoveränderung hin zur nächsten Zählzeit folgt.
Da diese Versuchsanlage jedoch identische Notengruppen besitzt (auf eine Störstelle folgt immer eine schwache Zählzeit, gefolgt von einer starken) und Störstellen nur auf starke entfallen, kommt dieser Aspekt nicht als unterscheidendes Merkmal in Betracht. Dies wäre bei künftigen Versuchen zu bedenken.

3.2.6.4. Unterschiede in den Zählzeittypen

Werden nicht allein die Beträge der Schwankung sondern auch ihre Vorzeichen einbezogen, präzisiert sich der Eindruck über die Eigenschaften der Zählzeittypen[219]. Über alle Probanden und Durchläufe gemittelt weichen die ungestörten Zählzeiten mit 0,64ms nur geringfügig von der Gesamtheit ab[220]. Gestörte Zählzeiten hingegen sind im Mittel um 7,43ms kürzer[221]. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von einem Prozent weist der Korrelationskoeffizient nach Pearson mit einem Wert von -0.886 einen extrem gegenteiligen Zusammenhang gestörter und ungestörter Zählzeiten auf[222].
War schon bei den ungerichteten Mitteln eine Paarung erster und dritter Folgezählzeiten zu finden, bei gestörten und zweiten Folgezählzeiten indes mit einem Pearson-Wert von

[219] Anzumerken ist, dass der arithmetische Mittelwert der Verteilung nach Zählzeittypen nicht mit dem Gesamtmittel von 0,00ms gleichzusetzen ist, da Mittelwerte von Zählzeittypen nicht gewichtet nach deren Anzahl im Notenbild einfließen.
[220] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Arithmetische Mittel Abweichungen.xls\Vergleich Durchläufe
[221] Auch hier wird wie bei allen Werten dieser Studie als Ende einer Zählzeit stets der Anschlag der nächsten (gleich durch welche Hand) gewertet.
[222] alpha = 0,01 bei zweiseitiger Fragestellung: Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Korrelationen\Zählzeittypen unquadriert.spo

0,21 nicht, wird nun der Hintergrund deutlich: Die ersten Folgezählzeiten zeigen arithmetisch einen gegenteiligen Zusammenhang zu den dritten[223]. Die zweiten Folgezählzeiten zeigen belastbare, negative Korrelationen zu den ungestörten sowie einen mit 0,698 hohen Pearson-Koeffizienten bei 5-prozentiger Irrtumswahrscheinlichkeit für das Verhältnis zu den gestörten. Dieser positive Wert verblüfft zunächst, liegen ihre arithmetischen Mittel X.j über alle Durchläufe doch weit auseinander[224].

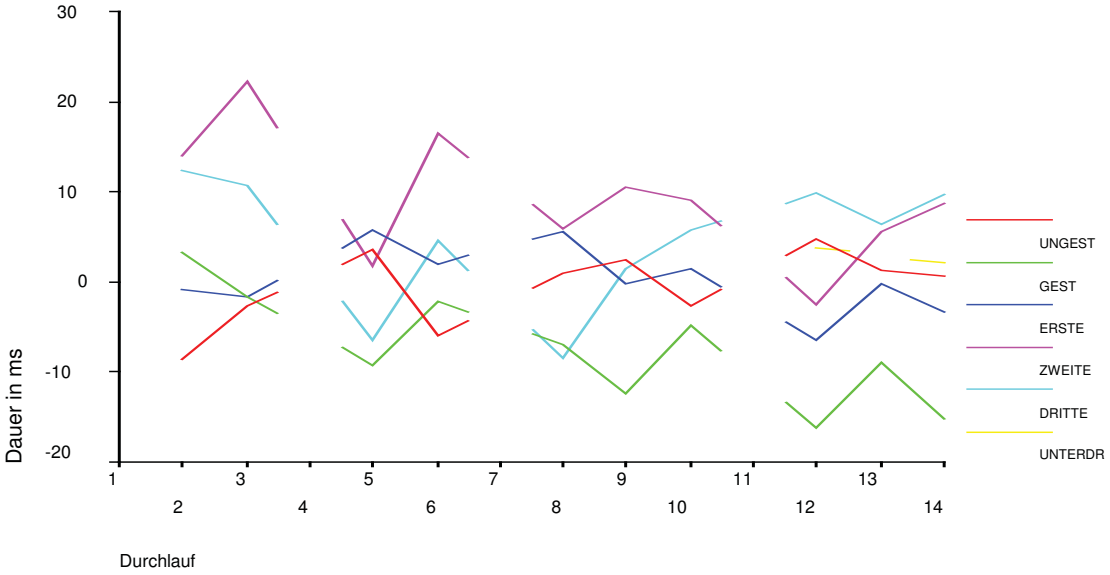


Abb. 26: Gerichtete periodische Mittelwertsabweichungen der Probanden im jeweiligen Durchlauf

Abbildung 26 visualisiert die signifikante Aussage eines Zusammenhanges zwischen gestörten Zählzeiten und zweiten Folgezählzeiten: Mehr als alle anderen Grafen zueinander verlaufen ihre Kurven (grün und pink) annähernd parallel und dies wechselseitig vom Mittelwert. Die bei den ungerichteten Mitteln erkennbare Periodizität der Zählzeiten ist bei näherer Betrachtung also auch hier vorhanden: für gestörte und zweite Folgezählzeiten, nur unter anderem Vorzeichen: Es scheint, als glichen gestörte und zweite Folgezählzeiten einander aus. Über alle Durchläufe betrachtet beträgt ihre Bilanz 1,75ms[225].

Naheliegend wäre zu denken, die Probanden glichen die vorzeitig beendeten, gestörten Zählzeiten durch verlängerte Zählzeiten in den zweiten Folgezählzeiten wieder aus. Indes ist das Gegenteil der Fall: Zweite und dritte Folgezählzeiten werden schon in den

[223] Pearson-Wert bei -0,835, alpha = 0,01. Mittelwerte bei 0,19ms für die ersten und 4,52ms für die dritten Folgezählzeiten.
[224] -7,43ms gegenüber 9,18ms bei den zweiten.
[225] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Arithmetische Mittel Abweichungen.xls\Vergleich Durchläufe: Dort Zeile 32.

Durchläufen zwei und drei um 14,05 bis 22,24ms gedehnt[226], die gestörten indes schwanken hier unauffällig mit 3,30 und -1,69ms. Im Lauf des Versuchs werden sie zunehmend gekürzt, sodass die Dehnungen der zweiten Folgezählzeiten annähernd kompensiert werden, etwa in den Durchläufen acht bis zehn[227].

Erwiesen sich die hier in Mittelwertsabweichungen beobachteten Schwankungen auch in den Varianzanalysen als statistisch unzufällig, ließe sich belastbar sagen, dass ein Korrekturverhalten vorliegt: Nachdem die Probanden beim Auftreten erster Störstellen ihren Grundschlag um bis zu 30ms[228] verschleppen und dies als nicht im Einklang mit der Aufgabe eines konstanten Tempos empfinden, suchen sie nach einer Lösungsstrategie: Der verlässlichste Weg ist dabei der, eine unmittelbare Kürzung in der Zählzeit vorzunehmen, die den Probanden als Problem bewusst wird, nämlich die Störstelle selbst.

Insgesamt verlaufen die Grafen der arithmetischen Mittel bis zum elften Durchlauf insbesondere für gestörte und zweite Zählzeiten ähnlich wie jene der Beträge: Statt des summarischen Rückgangs mit Spitzen in Durchlauf drei und sechs dort verlagern sich die Schwankungen hier von positiven in negative Bereiche. Aber der Verlauf für die letzten drei Gänge weicht erneut ab. Positive und negative Schwankungen kompensieren sich hier nicht nur. Vielmehr ist hier kein Durchbruch eines Trends wie bei den Beträgen erkennbar. Dabei ist zunächst unklar, ob wenige große Veränderungen zahlreiche kleine ausgleichen oder gleich viele einander.

Zudem muss erklärt werden, ob die Schwankungen von wenigen oder vielen Probanden ausgehen und von welchen. Zu untersuchen ist auch, ob Zusammenhänge mit den Größen der Störstellen erkennbar sind. An dieser Stelle rücken die Hypothesen A und B dieser Studie wieder in den Blick:

> Ab einer Entkopplungsdauer (Störstelle) von 50 bis 80ms weisen die Pianisten eine verzögerte Folgemotorik beim nächsten Tastenanschlag auf: Jedoch wird ihnen dieses nicht bewusst. Die Probanden empfinden Handlung und resultierende Perzeption im Einklang. Es kommt weder zu einer dauerhaften Tempoveränderung, noch zu einem kurzfristigen Korrekturverhalten. Lediglich der feste Grundschlag verschiebt sich auf der Zeitleiste nach hinten.
>
> **Hypothese A**

[226] Ebda., Zeile 5.
[227] Ebda., Zeile 32.
[228] 28,85ms in Durchlauf zwei und 29,49ms in Durchlauf drei. Ebda., Zeile 35.

Zur Hypothese B wurde die Frage formuliert, ob sich bei größeren Entkopplungen auch in der zweiten oder gar dritten Folge nach der Manipulation noch Effekte zeigen und diese ein Ausgleichsverhalten zur Anschlagdauer der Störstellen ausmachten:

> Oberhalb von 80ms Manipulationsgröße zeigt sich ein anderes Verhalten. Wiederum wirkt die Verzögerung zunächst irritierend und die Teilnehmer schlagen die direkte Folgezählzeit zeitverzögert an. Die darauf folgenden Zählzeiten werden jedoch so lange in kürzeren Zeitintervallen gespielt (kurzfristig gesteigertes Tempo), bis die Tastenanschläge wieder auf den Grundschlag fallen, der dem Tempo vor der Störstelle innewohnte.
>
> **Hypothese B**

Sollten sich die allgemeinen Ergebnisse in den weiteren Analysen auch in Passagen nach Störstellen von mehr als 80ms wiederfinden, wäre Hypothese B grundsätzlich zu bestätigen, nicht aber in der Richtung des Korrekturverhaltens. Denn Hypothese B nimmt an, dass Störstellen von 100ms und mehr unmittelbar das Tempo verzögern und ein späteres Accelerando die Rückkehr in den Grundschlag ermöglicht. Das Gegenteil ist aber der Fall: Störstellen werden gekürzt und zweite Folgezählzeiten gedehnt.

3.2.7. Zusammenfassung

Insgesamt legen die bisherigen Ergebnisse nahe, dass die Teilnehmer eine hohe auditive Aufmerksamkeit im gesamten Versuchsdurchlauf besitzen. So steigen Tonhöhenfehler und Temposchwankungen in Durchlauf drei sprunghaft an, obgleich die Teilnehmer bereits zwei Durchläufe gespielt hatten und zudem bereits mit 50er Störstellen konfrontiert worden sind. Zwar ist im Weiteren ein Lerntrend zu beobachten, der mit einer Verlagerung der Aufmerksamkeit auf die sensomotorische Ebene begründet werden könnte. Indes durchbricht Durchlauf zwölf mit zum Teil unterdrückten Noten den rücklaufenden Trend, und dies, obgleich mehrere Teilnehmer äußerten, sie hätten dort verstärkt auf ihre Hände geachtet.
Für einen rein kognitiv-sensomotorischen Lösungsansatz dürfte die ausbleibende akustische Rückmeldung aber keinen Unterschied zu verzögerten oder ungestörten Tönen machen. Dass scheinbar keine vollständige Verlagerung auf kognitiv-sensomotorische Prozesse stattfindet, wird auch daran deutlich, dass unterdrückte Zählzeiten das instabilste Tempo mit ungerichteten 26,53ms mittlerer Schwankung besitzen. Die schließende Statistik wird zeigen, ob Hypothese C verworfen werden muss,

die besagt, dass keine akustische Rückmeldung erforderlich ist, um nach einer Störstelle von mehr als 80ms eine erfolgreiche Korrektur zu veranlassen.
Die sprunghafte Zunahme von Tonhöhenfehlern und Temposchwankungen in den Durchläufen zwölf und 14 ist ein Nachweis für die auditiven Einflüsse auch in diesem Versuchsstadium. Ohnehin korrelieren die Quoten der Tonhöhenfehler und Temposchwankungen über den gesamten Versuch in sehr hohem Maße. Ob ein kausaler Zusammenhang oder eine dritte ursächliche Größe vorliegt, muss durch Verfahren der schließenden Statistik in den nächsten Kapiteln ermittelt werden. In Durchlauf zwölf und 14 werden die sprunghaft steigenden Tonhöhenfehler maßgeblich von der linken Hand verursacht. Hier wie im übrigen Versuch geht ihnen meistens eine Störstelle zwei Zählzeiten zuvor in der anderen Hand voraus. Der Fehler wandert sozusagen im doppelten Sinn: von der einen in die andere Hand und vom zeitlichen in ein räumliches Maß (Positionssinn).
Allgemein formuliert schwanken die Probanden in ihrem Tempo nicht stärker als Rasch dies 1988 für Trios beobachtete. Gestörte Zählzeiten werden im Mittel um 7,43ms gekürzt. Sie unterscheiden sich signifikant von ungestörten Zählzeiten. Wie schon angedeutet, stehen die gekürzten gestörten Zählzeiten dabei im hohen Zusammenhang mit den zweiten Folgezählzeiten. Hier legen die Lageparameter nahe, dass eine motorische Korrektur – der Versuch, den Grundschlag beizubehalten – unternommen wird. Die schließende Statistik muss zeigen, ob diese Annahme begründet ist.

3.3. Schließende Statistik

Die Blockvarianzanalysen bestätigen weite Teile der bislang formulierten Ergebnisse. Zunächst wurde die gesamte Verteilung auf etwaig verschiedene Erwartungswerte für Temposchwankungen sowie probandenweise und je Durchlauf geprüft. Da das arithmetische Mittel Basis varianzanalytischer Methoden ist und die periodische Mittelwertsabweichung der gesamten Verteilung sinngemäß null beträgt, dienten ausnahmsweise wieder ungerichtete Mittel (Beträge)[229] zur Untersuchung der Gesamtverteilung. Andernfalls ergäbe der Nenner des Terms null.
Der Varianzquotient für den Vergleich aller 14 Messwiederholungen bei allen 21 Probanden liegt mit einem Wert von rund 0,53 deutlich unter der kritischen 5-Prozent-

[229] Wurzel des quadratischen Mittels. Für alle anderen Verteilungen wurden arithmetische Werte herangezogen. Grundsätzlich wurde für jeden Probanden die mittlere Abweichung eines jeden Durchlaufs verwendet.

Schranke der zugehörigen F-Verteilung[230]. Auch der Friedman-Test via SPSS lieferte kein signifikantes Ergebnis[231]. Der kritische Wert[232] wurde nicht erreicht. In der Gesamtverteilung liegen also keine unterschiedlichen Erwartungswerte vor. Das heißt: Weder ein Proband unterschied sich über alle 14 Durchläufe gerechnet in seinen residualen – von individueller Metrik, dem Grundtempo und der individuellen Tempopräzision befreiten – Schwankungen signifikant von anderen Probanden noch unterschieden sich die Durchläufe in Gänze bedeutsam voneinander[233].

Dies schließt nicht aus, dass etwa in Durchlauf zwölf bestimmte Notenpassagen im stabilen Gruppenverhalten erheblich anders gespielt wurden als andere Bereiche. Auch zeigt dieser Befund nicht, ob sich Störstellen generell auf folgende Zählzeiten auswirken oder erst ab einer gewissen Größe (Hypothese A in Verbindung mit B) beziehungsweise gar nicht. Weiterhin ist nicht klar, ob fehlende akustische Rückmeldungen (Unterdrückungen) das Spielverhalten der Probanden beeinflussen oder nicht (Hypothese C). Überdies trifft dieser erste schließende Befund keine Aussage zu möglichen Unterschieden, die von persönlichen Merkmalen der Probanden abhängen.

Um diese Fragen in den folgenden Kapiteln zu klären, wurden der gesamten Verteilung nach den zuvor in der beschreibenden Statistik getroffenen Kriterien Datensätze entnommen: etwa geordnet nach Zählzeittyp (gestörte, ungestörte et cetera), nach Störgröße, in Form einzelner Zählzeiten oder unterteilt nach persönlichen Merkmalen der Probanden (Orgelspieler ja/nein). Zudem wurde der graduelle Einfluss eines einzelnen Probanden oder Durchlaufs auf die jeweilige Verteilung ermittelt, indem der zugehörige Datensatz aus der Blockvarianzanalyse entnommen und die resultierende Auswirkung auf den F-Wert betrachtet wurde.

Diese Entnahmen sind nicht mit der Entnahme probandentypischer Messwert-Bestandteile (Blöcke) bei jeder Blockvarianzanalyse zu verwechseln. Jene Entnahme über den Term MQ_{block} wird unverändert durchgeführt (siehe Kapitel 2.5.2.4.). Der Term MQ_{block} entnimmt jedem Messwert jedes Probanden die dem Probanden charakteristische Temposchwankung, die nicht auf äußeren Einflüssen beruht. Zuvor hatte das Verfahren

---

[230] rund 1,76. Wie alle künftigen Werte errechnet mit der Funktion FINV der Tabellenkalkulation MS-Excel 2000 Professional. Zudem geprüft nach Sachs 2006, S. 219 f. und Backhaus 2006, S. 810 f. Siehe auch Kommentare in Zelle B4 jedes Datenblattes unter: Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Blockvarianzanalysen.xls\BVA gesamt quadriert

[231] Chi = 19,06, Irrtumswahrscheinlichkeit 12,11 Prozent. Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Friedman Tests\Friedman gesamt quadriert.spo

[232] Das in SPSS standardgemäß voreingestellte Vertrauensintervall von 95 Prozent wurde beibehalten. Die kritischen Werte – nach der F-Verteilung approximiert – wurden entnommen bei Sachs 2006, S. 457. Für k=14 und n=20 ist die Schranke 22,0; für n=unendlich 22,36.

[233] Siehe dazu jeweils die Kommentare in Zelle B8 jedes Datenblatts ebda.

zur Ermittlung periodischer Mittelwertsabweichungen bereits die individuelle Metrik und das Grundtempo entfernt, die ebenfalls nicht extern begründet sind.
Die hier angesprochenen Entnahmen identifizieren, ob signifikante Ergebnisse nicht auf einzelne Probanden oder gar einzelne Zählzeiten eines Teilnehmers zurückgehen. Zum Beispiel durch einen der zuvor beschriebenen extremen Ausreißer, wenn eine Note ausgelassen wurde und die vorangehende gedrückt bleibt. Diese prüfenden, zusätzlichen Entnahmen wurden in jeder der folgenden Blockvarianzanalysen durchgeführt. Erwähnt werden nur signifikante oder aus anderen Gründen interessante Befunde.

3.3.1. Unterschiede bei Zählzeittypen

Verteilungen typisierter Zählzeiten haben kein arithmetisches Mittel von null[234]. Hier müssen keine ungerichteten Werte in die Blockvarianzanalyse eingesetzt werden, damit der Nenner im Term ungleich null bleibt. Indes gilt dies wiederum nicht für die Zählzeiten der ungestörten Durchläufe eins, vier, sieben und elf. Da diese Durchgänge allein aus ungestörten Zählzeiten bestehen und die periodische Mittelwertsabweichung eines oder auch aller Probanden in einem abgeschlossenen Durchlauf wiederum null beträgt, würde der diesen vier Durchläufen entnommene Wert ebenfalls null betragen und die Schwankung aller ungestörten Zählzeiten im Versuch fälschlich reduzieren. Deshalb ziehen die schließenden Verfahren nur ungestörte Zählzeiten der zehn Durchläufe (k Messwiederholungen) heran, in denen auch andere Zählzeittypen vorkommen. Ein Vergleich des Spielverhaltens mit den ungestörten Zählzeiten der vier genannten Durchläufe bleibt mit beschreibenden Verfahren gleichwohl möglich.
Die Verteilung ungestörter Zählzeiten liefert in der Blockvarianzanalyse ein signifikantes Ergebnis: Der Quotient von 2,04 für den Vergleich von zehn Messwiederholungen bei 21 Individuen liegt oberhalb des kritischen Werts der F-Verteilung beim 0,95-Quantil[235]. Der Friedman-Test bestätigt den Befund mit einem Wert ebenfalls oberhalb der kritischen 5-Prozent-Schranke: In den Gruppen liegen sehr wahrscheinlich mindestens zwei unterschiedliche Erwartungswerte vor. Wird Durchlauf zwölf entfernt, sinkt F auf 1,88 unter die sich dann ergebende Schranke von 1,99. Werden andere Durchläufe entfernt, fehlt dieser Effekt. Damit ist klar, dass die Tempo-Schwankungen der Probanden bei

[234] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Blockvarianzanalysen.xls\BVA Ungestörte
[235] gerundet 1,93.

ungestörten Zählzeiten der zwölften Durchläufe einem anderen Erwartungswert unterliegen als in den übrigen Durchläufen.

Dies korrespondiert mit Beobachtungen der beschreibenden Statistik, nach denen auch die Schwankungen der ungestörten Zählzeiten in Durchlauf zwölf wieder sprunghaft ansteigen. Die Annahme verdichtet sich, dass Durchlauf zwölf gegenüber dem folgenden Durchlauf 13 ohne Unterdrückungen eine Sonderrolle einnimmt. Ob sich Unterdrückungen – die mit mittleren 26,53ms die höchsten ungerichteten Schwankungen aller Zählzeittypen im Versuch aufweisen – im zwölften Durchlauf auch auf ungestörte Zählzeiten auswirken, die weiter als drei Folgezählzeiten entfernt liegen, ist damit noch nicht gesagt.

Bei den gestörten Zählzeiten fällt Durchlauf zwölf nicht auf. Der Wert des Blockvarianz-Quotienten für den Vergleich von zehn Messwiederholungen bei 21 Individuen liegt unterhalb des kritischen Werts der F-Verteilung: In den Gruppen liegen sehr wahrscheinlich keine unterschiedlichen Erwartungswerte vor. Indes steigt F bei der Entfernung einzelner Durchläufe nahe an die dann kritische Marke von 1,99 heran. Bei der Entfernung des 13. Durchlaufs übersteigt F mit 2,30 gar den dann kritischen Wert des 0,975-Quantils von 2,26. Diese Beobachtung einer Sonderrolle des 13. Durchlaufs bei den gestörten Zählzeiten wird vom Friedman-Test gestützt: Er zeigt ein signifikantes Ergebnis bei lediglich 0,3 Prozent Irrtumswahrscheinlichkeit[236].

Für die erste Zählzeit nach Störstellen korrespondieren beide Verfahren. Der Varianzquotient verfehlt die kritische Schranke (1,92) mit einem Wert von rund 0,31 deutlich. Auch die Friedman-Größe liegt klar unter der Grenze. Die ersten Folgezählzeiten werden also in allen Durchläufen ähnlich, und zwar unauffällig gestaltet. Diese Ergebnisse korrespondieren mit der Entwicklung der arithmetischen Mittel der ersten Folgezählzeiten im Verlauf des Versuchs[237]. Insgesamt liegen die Schwankungen bei lediglich plus 0,19ms. Damit kann belastbar gesagt werden, dass keine erkennbar systematische Reaktion der Probanden in den Dauern der direkt auf eine Störstelle folgenden Zählzeit stattfindet. Indes bleibt es möglich, dass sich ihr Verhalten abhängig von der Größe der Störstelle in diesen ersten Folgezählzeiten dennoch unterscheidet.

Die zweiten Folgezählzeiten enthalten laut Blockvarianzanalyse keine unterschiedlichen Erwartungswerte. Werden einzelne Datensätze entfernt, sind keine Effekte zu beobachten. Der Wert des Friedmann-Tests überschreitet den kritischen Wert ebenso nicht. Auch bei den dritten Folgezählzeiten stimmen das parametrische und das nichtparametrische Verfahren überein. Demnach besitzen die Daten keine

---

[236] Chi = 24,85. Kritischer Wert nach Sachs (2006), S. 457 für k=10 und n=20 ist 16,7; für n=unendlich 16,92.
[237] Vergleiche dazu Abbildung 26, blauer Graf im gleichmäßigem Verlauf.

unterschiedlichen Erwartungswerte. Auch für die unterdrückten Zählzeiten liefern die Verfahren stimmige Ergebnisse, sollten mit Blick auf den dort geringen Stichproben-Umfang (zwei Messwiederholungen k) aber zurückhaltend bewertet werden. So ist die Test-Statistik nach Sachs (2006) für zu kleine k auch unzureichend.

Werden die Zählzeittypen nun untereinander verglichen, bestätigt sich die Sonderstellung der gestörten Zählzeiten und der zweiten Folgezählzeiten. Der Wert des Blockvarianz-Quotienten für den Vergleich aller sechs Zählzeittypen bei 21 Individuen liegt klar über dem kritischen Wert der F-Verteilung für die obere 5-Prozent-Schranke[238]. Es liegen sehr wahrscheinlich mindestens zwei verschiedene Erwartungswerte vor. Der Friedman-Test bestätigt das Ergebnis.

Werden wechselweise die gestörten und zweiten Folgezählzeiten aus der Stichprobe entfernt, sinkt F unter den dann kritischen Wert des 0,95 Quantils[239]. Das Verhalten der Probanden unterscheidet sich in diesen Zählzeittypen im Vergleich zu den übrigen. Die beschreibende Statistik durch arithmetische Mittel wird also durch die schließenden Verfahren bestätigt: Die Probanden wissen um ihre Reaktion, nach Störstellen den Grundschlag um bis zu 30ms zu verschleppen. Um dies zu umgehen, kürzen sie die Störstellen im Lauf des Versuchs zunehmend. Erst Durchlauf zwölf durchbricht diesen Lösungsansatz.

3.3.2. Unterschiede nach Größe der Störstellen

Werden gestörte Zählzeiten nach Größe ihrer Verzögerung untersucht, zeigt sich zunächst ein uneinheitliches Bild: Der Varianzquotient unterschreitet die kritische Größe für alpha gleich fünf Prozent knapp, der Friedman-Test zeigt aber ein deutlich signifikantes Ergebnis[240]. In den Gruppen liegen möglicherweise unterschiedliche Erwartungswerte vor. Wird die Blockvarianzanalyse paarweise zwischen den Zählzeittypen durchgeführt, liefern die 100er Störstellen der Durchläufe mit Unterdrückungen signifikante Werte[241] oder zumindest erheblich höhere als die übrigen

---

[238] Der Wert des Blockvarianz-Quotienten für den Vergleich von zusammengefasst k=6 Gruppen (Zählzeittypen) bei n=21 Individuen liegt über dem kritischen Wert der F-Verteilung beim 0,975-Quantil (obere 2,5-Prozent-Schranke). In den Gruppen liegen also sehr wahrscheinlich mindestens zwei unterschiedliche Erwartungswerte vor.

[239] Werden wechselweise die gestörten und zweiten Folgezählzeiten aus der Verteilung entfernt, sinkt F deutlich (1,25 und 1,79) unter den dann kritischen Wert von 2,46 des 0,95 Quantils. Bei den anderen Zählzeittypen ist dies nicht zu beobachten.

[240] Der Friedman-Wert errechnet via SPSS zeigt ein signifikantes Ergebnis bei 2,56 Prozent Irrtumswahrscheinlichkeit (Chi: 11,087). Kritischer Wert nach Sachs (2006), S. 457 für k=5 und n=20 ist 9,37; für n=unendlich 9,49.

[241] 50 zu 100ms mit Unterdrückung: F=4,58 bei einem dann kritischen Wert von 4,08; 80 zu 100ms mit Unterdrückung: F=3,48; 100 zu 100ms mit Unterdrückung: F=2,26; 120 zu 100ms Unterdrückung: F=4,26. Aber auch der Vergleich von regulären 100er und 120er Störstellen erzielt einen Wert von 4,23.

Störstellen untereinander. Vermutlich reagieren die Probanden auf 100er Entkopplungen der Durchläufe zwölf und 14 erkennbar anders als bei den anderen Störstellen.

In Zeitdauern ausgedrückt kürzen die Probanden 100er Störstellen der Durchläufe zwölf und 14 im Schnitt um 15,72ms, während die sonstigen Störstellen um lediglich 1,84 bis 7,25ms gekürzt werden[242]. Allerdings ist weder der Friedman-Test noch die Blockvarianzanalyse ein stabiles Instrument für den paarweisen Vergleich. Entsprechend verzichtet Sachs (2006) auf die Angabe kritischer Werte zur F-Verteilung für n und k kleiner drei (siehe oben). Insofern bietet sich der Wilcoxon-Test als zusätzlich prüfende Instanz an. Tatsächlich zeigt er einzig für den Vergleich der 100er Störstellen der Durchläufe mit Unterdrückungen signifikante Werte im Test gegen die Anschlagdauern der Probanden bei anderen Störstellen[243]. Werden die anderen untereinander – etwa die 50er Störstellen gegen die 120er – verglichen, ergeben sich keine Unterschiede auf belastbarem Niveau.

Wie in den beschreibenden Analysen erwähnt, stiegen die ungerichteten Schwankungen des Tempos in Durchlauf zwölf sprunghaft an, die Fehler in Tonhöhen ebenso (siehe Abbildung 21). Hier nun ist nachgewiesen, dass Störstellen im zwölften und 14. Durchgang die Schwankungen der Pianisten auch in der Richtung beeinträchtigen: Bei keiner anderen Störstelle ist eine systematische Kürzung in dieser Größe zu beobachten.

Werden Störstellen in Abhängigkeit ihrer Größe mit ungestörten Zählzeiten verglichen, zeigen Blockvarianzanalysen und Friedman-Tests keine streng konformen Ergebnisse. Mit großer Sicherheit kann aber gesagt werden, dass 80er Störstellen mit 7,02ms Kürzung signifikant anders als ungestörte Zählzeiten mit -0,64ms gespielt werden. Der F-Wert dieser Gegenüberstellung liegt über der kritischen Marke zur fünfprozentigen Irrtumswahrscheinlichkeit[244]. Der Friedman-Test zeigt ein signifikantes Ergebnis bei lediglich 0,1-prozentiger Unsicherheit. Auch den Dauern anderer Störstellen attestiert der Rangdatentest auf ähnlich sicherem Niveau erhebliche Unterschiede zu den ungestörten Zählzeiten[245].

Nicht aber die Blockvarianzanalyse: Lediglich für die 120er Störstellen kann ein ausreichend belastbarer Unterschied formuliert werden, da hier neben dem Friedman-Test auch das parametrische Verfahren ein mit annähernd 95-prozentiger

---

[242] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Blockvarianzanalysen.xls\Störstellen nach Größe

[243] bei 0,3 (gegen 50er), 0,6 (gegen 80er), 0,5 (gegen die 100er Störstellen der Durchläufe drei und 13) sowie 1,9 Prozent Irrtumswahrscheinlichkeit.

[244] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Blockvarianzanalysen.xls\BVA 80er vs. Ungestörte

[245] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Friedman Tests\50er vs. Ungestörte.spv sowie 80er, 100er, 120er vs. Ungestörte.spv

Wahrscheinlichkeit sicheren Unterschied ermittelt[246]. Hingegen erreicht der Varianzquotient für die 50er Zählzeiten nur ein signifikantes Ergebnis bei 17,1 Prozent Fehlerwahrscheinlichkeit, die 100er bei 12,4 Prozent[247]. 80er und 120er Störstellen werden auf ähnlichem Niveau gekürzt. 50er entsprechen mit -1,84ms Schwankung eher den Ungestörten selbst, 100er liegen mit minus 5,35ms dazwischen[248].

Für Entkopplungen von 80ms kann deshalb belastbar eine systematisch motorische Reaktion – nämlich der vorzeitige Abbruch des Anschlages durch die Probanden – im Unterschied zu ungestörten Zählzeiten behauptet werden. Mit eingeschränkter Sicherheit kann dieses Verhalten zudem für 120er Störstellen angenommen werden. Auch sie werden im Mittel um rund sieben Millisekunden gekürzt. Die Frage schließt sich an, wie die Probanden die folgenden Zählzeiten in Abhängigkeit der Größe vorausgehender Störstellen gestalten.

3.3.3. Folgeverhalten in Abhängigkeit der Störgröße

Nach geringen Störstellen spielen Probanden die erste Folge schwach gedehnt[249], nach Störungen von mehr als 80ms Sekunden schwach gekürzt[250]. Die Spanne dieser Mittelwerte allein bietet keinen Anlass, unterschiedliche Erwartungswerte zu vermuten. Blockvarianzanalyse[251] und Friedman-Test[252] bestätigen das.

Die zweiten Folgezählzeiten werden im Mittel alle gedehnt, wobei die Spanne mit 3,13ms für die Folgezählzeiten der Durchläufe mit Unterdrückungen und 15,07ms für die 100er deutlich größer ist. Der Quotient der Blockvarianzanalyse liegt entsprechend höher, wenn auch nicht auf signifikantem Niveau. Der Wilcoxon-Test sieht einige signifikante Unterschiede zwischen den zweiten Folgezählzeiten verschieden vorausgehender Störstellen, ohne dass zunächst ein System erkennbar wäre, etwa, dass die Folgezählzeiten nach kleineren Störstellen anders gestaltet würden als nach größeren. Die Analyse der dritten Folgezählzeiten erbrachte keine auffälligen Befunde.

---

[246] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Blockvarianzanalysen.xls\BVA 120er vs. Ungestörte. Dort Zelle C4.
[247] Ebda. sowie 50er, 80er, 100er vs. Ungestörte
[248] Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Arithmetische Mittel Abweichungen.xls\Störstellen nach Größe. Dort Zeile 26.
[249] 50er und 80er Störstellen um 2,38 und 3,53ms verlängert.
[250] -0,98ms bei 100er Störstellen, -4,94ms für 100er in Varianten mit Unterdrückungen und nahe am Nullpunkt mit 0,94ms nach 120ern.
[251] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Blockvarianzanalysen.xls\BVA 1. Folge nach Störgröße
[252] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Friedman Tests\1. Folge nach Störgröße.spo

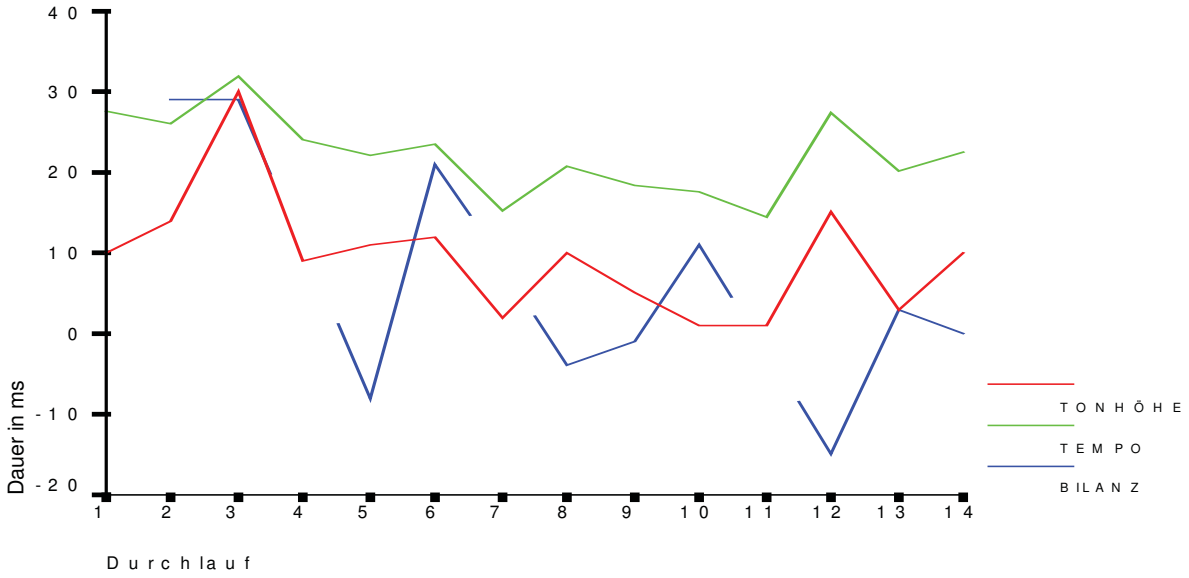


Abb. 27: Vergleich ungerichteter Temposchwankungen (grün) in ms mit der Zahl falscher Tonhöhen (rot) und der kumulierten Bilanz (blau) mittlerer gerichteter Schwankungen der vier Zählzeittypen: Störstelle, erste, zweite und dritte Folgezählzeit.

Wird eine kumulierte Bilanz des Verhaltens der Probanden bis zum Ende der dritten Folgezählzeit aufgestellt, ist sie zu Beginn des Versuchs in den Durchläufen zwei und drei sehr unausgeglichen: Drei Zählzeiten nach der Störstelle hängen die Probanden dem ursprünglichen Grundschlag um 28,85 im zweiten und 29,49ms im dritten Durchlauf hinterher. In diesen Gängen ist zwar die Dehnung der zweiten Folgezählzeit und auch der dritten ausgeprägt[253], nicht aber die Kürzung der Störstelle selbst[254]. Diese Kürzung tritt in nennenswerter Größe (-9,20ms) erst mit Durchlauf fünf auf.

Während der Durchläufe pendelt sich die kumulierte Bilanz bis hin zu Durchlauf neun bei nahezu null ein. Zu diesem Zeitpunkt zeigen die Probanden mit nur -0,56ms kumulierter Abweichung vom ursprünglichen Grundschlag nach der dritten Folgezählzeit eine gelungene Rückkehr in den Grundschlag. Zusammen mit dem beschriebenen Rückgang ungerichteter Schwankungen über alle Zählzeittypen gerechnet sowie mit Blick auf die Abnahme der Tonhöhenfehler ist der Lerneffekt der Probanden offenbar. Allerdings durchbricht der zwölfte Ablauf auch hier den Trend (Abbildung 27): Die Probanden ziehen den Grundschlag plötzlich um -15,78ms vor. Durchlauf 13 und auch 14 erreichen wiederum die vormals gewonnene Präzision der Teilnehmer.

Wird eine Bilanz des Verhaltens unterschieden nach den Größen der vorausgehenden Störstelle aufgestellt, erscheinen die Passagen nach 80er Manipulationen mit 2,88ms

[253] 14,05 und 22,24ms. Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Arithmetische Mittel Abweichungen.xls\Vergleich Durchläufe
[254] Ebda. 3,30 und -1,69ms.

Dehnung mit Blick auf die Erwartungswerte am unauffälligsten. 50er, 100er und 120er Störstellen lassen die Probanden den Grundschlag hingegen um 10,89 bis zu 17,60ms verschleppen[255]. 100er Störstellen der Durchläufe mit Unterdrückungen führen gar zum gegenteiligen Verhalten: Die Probanden ziehen den Grundschlag plötzlich spürbar um 7,98ms vor.

Auch in dieser Hinsicht durchbricht Durchlauf zwölf den allgemeinen Lern-Trend. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer kehren das bisherige Verhalten dort mehrfach um: Nicht nur wird der Grundschlag vorverlagert, sondern es bleibt auch die charakteristische Dehnung der zweiten Zählzeit nahezu aus[256]. Die Teilnehmer akzeptieren den vorgezogenen Grundschlag. Die Zahl der Argumente für einen kausalen Zusammenhang zwischen dem Auftreten der Unterdrückungen und einer veränderten Motorik wächst.

Die Blockvarianzanalyse liefert einen F-Wert knapp unter der kritischen Schranke zur fünfprozentigen Irrtumswahrscheinlichkeit[257]. In der Verteilung der Bilanzen sortiert nach der Größe der vorausgehenden Störstelle liegen vermutlich unterschiedliche Erwartungswerte vor: Werden die Bilanzen der 100er Störstellen der Durchgänge zwölf und 14 entfernt, sinkt F deutlich ab. Werden andere Werte entfernt, tritt dieser Effekt nicht auf.

Im paarweisen Vergleich über den Wilcoxon-Test unterscheiden sich auch die Bilanzen nach 80er Störstellen mit ihren geringen Abweichungen von gemittelt 2,88ms vom Grundschlag signifikant von jenen nach 100er Störstellen aus den Varianten mit Unterdrückungen und von den herkömmlichen 100ern. Die Bilanz nach 80er Störstellen ist für die Probanden die ausgeglichenste im Versuch gewesen, während ihnen dies bei 100er Störstellen mit einer Verlagerung des Grundschlages um plus 17,60ms am wenigsten gelingt.

Insofern kann von einem Schwellenwert bei 80ms gesprochen werden, doch nicht im Sinn der Hypothese A und B. Beide formulierten einen Übergang zu einem anderen Verhalten oberhalb von 80ms. Der hiesige Schwellenwert unterteilt aber in ein ähnliches Verhalten oberhalb und unterhalb seines Werts. Lediglich bei 80ms Verzögerung selbst verhalten sich die Teilnehmer anders: Sie verlagern ihren Grundschlag nicht, sondern spielen ein konstantes Tempo.

---

[255] Ebda. Bilanz nach Störgröße, Zeile 25.
[256] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Blockvarianzanalysen.xls\Bilanz nach Störgröße. Dort Zeile 25.
[257] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Blockvarianzanalysen.xls\BVA Bilanz nach Störgröße.

3.3.4. Untersuchung einzelner Zählzeiten

Zuvor wurde bereits erläutert, dass Störstellen in dieser Studie nicht frei im Notenbild platziert werden können. In Konsequenz gilt dies auch für Folgezählzeiten. Dadurch sind bestimmte Zählzeiten deutlich häufiger ein bestimmter Zählzeittyp als andere. So liegen etwa erste Folgezählzeiten ausnahmslos auf schwachen Zählzeiten, eine ganze Reihe von Noten erhält über alle Durchläufe betrachtet überhaupt keine Störstelle, sie bilden auch keine Folgezählzeiten. Anders die im Versuch von jedem Probanden insgesamt 28 zu spielenden Oktavsprünge: 16 von ihnen enthalten Störstellen, 14 eine zweite Folgezählzeit, nie aber eine erste oder dritte. Ohnehin stehen den 14 zweiten Folgezählzeiten in den Oktavsprüngen nur 18 in allen übrigen Noten gegenüber[258]. Nur in den ungestörten Durchläufen eins, vier, sieben und elf sind die Oktavsprünge gänzlich frei von Manipulationen. Ähnliches gilt für die Zählzeiten drei bis acht.

Indem bestimmte Zählzeittypen wesentlich häufiger zu bestimmten Zählzeiten auftreten, steigt die Wahrscheinlichkeit einer direkten (kausalen) Abhängigkeit etwaiger Temposchwankungen von einer dritten Größe, nämlich dem Notenbild selbst. So genannte Scheinkorrelationen könnten Grundlage der bisherigen Ergebnisse sein[259]. Auch ein Zusammenspiel beider Größen ist denkbar, indem – zum Beispiel – die Oktavsprünge erst in Kombination mit bestimmten Störstellen zur Ursache auffälliger Schwankungen werden.

Aufklärung zu diesen Fragen bringt die Einzelanalyse aller Zählzeiten[260]. Hierzu wurde die mittlere periodische Mittelwertsabweichung aller Probanden für jede Zählzeit mit Ausnahme der ersten und der zwei letzten bestimmt. Die resultierende Verteilung bildet den gesamten Datensatz ab und erzeugt auf Basis arithmetischer Zahlen Gruppen- und Blockmittelwerte von naturgemäß null Millisekunden. Damit ließe sich keine Blockvarianzanalyse rechnen. Daher dienen erneut die Quadratwurzeln quadratischer Mittel (ungerichtete Mittel) der Analyse.

Die Spanne der ungerichteten Schwankungen reicht von 0,03[261] bis 96,43ms[262]. Das Mittel liegt bei 10,02 Millisekunden, die Standardabweichung beträgt 9,42ms: 95 Prozent aller Zählzeiten werden mit weniger als 26,99ms Schwankung gespielt. Der Test auf Normalität dieser Verteilung fällt positiv aus, wobei die Klassen so eingeteilt wurden, dass

---

[258] Stumme Noten und Störstellen in der anderen Hand ausgenommen.
[259] Sachs 2006, S. 90.
[260] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Blockvarianzanalysen.xls\BVA Mittelwerte je Zählzeit
[261] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Allgemeine Beobachtungen\Fehlerzählung Tonhöhe.xls\Mittelwerte Zählzeiten einzeln. Es handelt sich um Zählzeit sechs in Durchlauf fünf.

diese mindestens fünfmal besetzt waren[263]. In neun und zehn Kategorien geteilt erreichen die empirischen Werte für Chi-Quadrat den kritischen Wert für eine fünfprozentige Irrtumswahrscheinlichkeit nicht: Die beobachtete Verteilung ist also annähernd normalverteilt.

Außerhalb der mittleren 95-Prozent[264] sind verschiedene Zählzeittypen zu finden, maßgeblich zweite und dritte Folgezählzeiten, aber auch ungestörte Zählzeiten. 50er oder 80er Störstellen tauchen nicht auf, interessanterweise auch keine unterdrückten Zählzeiten[265]. Mit deutlichem Abstand weichen die Zählzeit 33 aus dem zweiten Durchlauf und die 35ste[266] aus dem sechsten Durchlauf ab. Zählzeit 35 schwankt in drei Durchläufen stärker als die mittleren 95-Prozent aller Werte. Dass ein Schlussritardando in der Klausel ursächlich ist, kann angenommen werden.

Die Blockvarianzanalyse attestiert der Verteilung aus 14 Durchläufen und 34 Zählzeiten mehr als einen Erwartungswert[267]. Indes sinkt F nicht unter die kritische 5-Prozent-Schranke, wenn einer der Datensätze entfernt wird. Damit ist deutlich, dass dieser mindestens zweite Erwartungswert weder vom Mittelwert aller Probanden eines bestimmten Durchlaufs ausgeht, noch von einer einzelnen Zählzeit, die in allen Durchläufen von den Probanden signifikant anders gestaltet wird als alle anderen Zählzeiten. Der Friedman-Test bestätigt das Ergebnis. Die Annahme ist damit unwahrscheinlich, dass das Notenbild einen über alle Durchläufe prägenden Einfluss auf das Verhalten bei einzelnen Zählzeiten ausübt. Indes muss ein Zusammenhang in der Daten-Struktur liegen, der bestimmten Gruppen von Zählzeiten einen anderen Erwartungswert zuordnet.

3.3.5. Auswirkungen von Unterdrückungen

Eine grundsätzliche Frage der Forschung zur musikalischen Psychomotorik ist in Hypothese C dieser Studie formuliert: Demnach benötigt ein motorisches Programm keine auditiven Rückmeldungen, wenn die Entkopplung ursächlich zusammenhängender sensomotorischer und akustischer Informationen nur groß genug ist, also einen

---

[262] Ebda. Zählzeit 33 in Durchlauf zwei.
[263] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Häufigkeiten\Mittelwerte jeder Zählzeit.spo
[264] 1,96-fache Spanne der Standardabweichung.
[265] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Allgemeine Beobachtungen\Fehlerzählung Tonhöhe.xls\Mittelwerte Zählzeiten einzeln.
[266] Die wie erwähnt nicht in die Wertung genommen wurde. Ebda.
[267] F oberhalb des kritischen Werts der F-Verteilung beim 0,975-Quantil: Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Blockvarianzanalysen.xls\BVA Mittelwerte je Zählzeit

Schwellenwert überschreitet. Die Durchläufe zwölf und 14 simulieren diese Situation für die Noten der rechten Hand, und dies zu einem Zeitpunkt, an dem sich die Teilnehmerinnen und Teilnehmer nachweislich an das Spiel mit einer manipulierten Klaviatur gewöhnt haben. Denn die Durchläufe neun (120er Störstellen), zehn (80er) und elf (ungestört) zeigen sowohl in den Tonhöhenfehlern als auch in den ungerichteten Temposchwankungen ein stetes Niveau, nahe der niedrigsten Werte im gesamten Versuch.

Die Analysen zeigen den zwölften Durchlauf als jenen, der die Probanden ihrer Gewöhnung entreißt. Er enthält dreimal so viele Fehler in der Tonhöhe wie der mit 120er Entkopplungen ähnlich stark gestörte Durchlauf neun. Erkennbar ist auch, dass Durchlauf 13 ohne Unterdrückungen eher Werte aufweist, die dem vorigen Niveau der Gewöhnungsphase entsprechen. Der Vergleich der Zählzeiten mit Unterdrückungen vier bis sechs aus Durchlauf zwölf und 14 mit ihren nicht unterdrückten Pendants in Durchlauf 13 kann aufklären, ob die auditive Rückmeldung Einfluss auf die Größe der motorischen Schwankungen hat[268]. Gleiches gilt eingeschränkt für die Serie Zählzeit 30 bis 32, die in der Rechten eine Unterdrückung für Zählzeit 31 vorsieht.

Sowohl die Varianzanalysen als auch der Friedman-Test ermitteln für die Zählzeit vier bis sechs nach der 100er Störstelle keine Auffälligkeiten im Vergleich der Durchläufe[269]. Weder unterscheiden sich die Zählzeiten im direkten Vergleich auf signifikante Weise noch die Mittelwerte ihrer Serie im Vergleich zu ihren Pendants in Durchlauf 13. Dehnen die Probanden die Zählzeiten vier bis sechs in Durchlauf zwölf im Mittel um wenige 2,49ms, so kürzen sie diese in Durchlauf 13 um 2,75ms[270]. Der Blick auf die andere Passage mit Unterdrückungen nach einer 100er Störstelle liefert ein verwandtes Ergebnis, obwohl ein Oktavsprung vorliegt. Auch die Serien von Zählzeit 30 bis 32 unterscheiden sich statistisch über die drei Durchläufe nicht.

Bleiben auditive Rückmeldungen in dieser konkreten Situation aus, werden die Zählzeiten selbst also nicht grundsätzlich anders gestaltet. Insofern wäre Hypothese C beizubehalten. Indes wird Kapitel 3.5. zeigen, dass sich in dieser Verteilung sehr wohl unterschiedliche Erwartungswerte verbergen, nämlich für reine Rechtshänder gegenüber jenen, die tendenziell beidhändig veranlagt sind. Auch Kapitel 3.3.3. hatte durch das parametrische und das nichtparametrische Verfahren einen anderen Erwartungswert für Bilanzen nach 100er Störstellen ermittelt, je nachdem, ob sie in Durchläufen mit

---

[268] Der ebenso mit 100er Störstellen versehene Durchlauf drei fließt nicht in diese Rechnung ein, da er als grüne Vorlage (siehe Abbildung zwei, Kapitel 2.2.4.) Störstellen an anderer Position im Notenbild hat.

[269] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Blockvarianzanalysen.xls\BVA ZZ 4 bis 6 DF 12 bis 14

Unterdrückungen vorkamen[271] oder ohne[272]. Es ist also möglich, dass die Unterdrückungen nach 100er Störstellen der Durchläufe zwölf und 14 sich erst dann signifikant auswirken, wenn sie – zum Beispiel ab Zählzeit sieben folgende und 17 folgende – wieder ausbleiben. Dass also die Probanden nach ersten Unterdrückungen eine Erwartungshaltung aufbauen, Unterdrückungen folgten nun auf jede Störstelle.

Zuvor ist allerdings zu prüfen, ob die den signifikanten Unterschied von Kapitel 3.3.3. liefernden Messwerte eventuell auch aus Durchlauf drei stammen, bei dem die 100er Störstellen an anderer Stelle im Notenbild liegen (grüne Vorlage: siehe Abbildung 3, Kapitel 2.2.5.). Der Wert des Blockvarianz-Quotienten liegt unterhalb des kritischen Werts für die obere 5-Prozent-Schranke in der F-Verteilung[273]. F sinkt ohne die 100er Störstellen-Bilanzen des dritten Durchlaufs aber deutlich auf 0,47. Werden die anderen Werte entfernt, tritt dieser Effekt nicht auf. Die Gruppen könnten also unterschiedliche Erwartungswerte besitzen. Indes zeigt der Friedman-Wert nur ein signifikantes Ergebnis bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 13,6 Prozent. Erneut ist es der Wilcoxon-Test, der die Zusammenhänge im paarweisen Vergleich aufdeckt: Die Bilanzen nach 100er Störstellen unterscheiden den dritten Durchlauf hoch signifikant von allen drei übrigen Durchläufen mit 100er Störstellen[274].

Aber auch Durchlauf zwölf und 13 unterscheiden sich voneinander signifikant bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von nur 2,5 Prozent, die Durchläufe zwölf und 14 bei 4,2 Prozent. Die letzten beiden Durchläufe unterscheiden sich hingegen nur zufällig voneinander. Diese Unterschiede sind einfacher anhand der zugehörigen Mittelwerte der 100er Bilanzen zu verstehen: In Durchlauf drei führt eine 100er Störstelle im Mittel dazu, dass die Probanden ihren ursprünglichen Grundschlag bis zum Ende der dritten Folgezählzeit um plus 29,49ms verzögern. Zu diesem Zeitpunkt haben die Probanden sich noch nicht an die manipulierte Klaviatur gewöhnt. In Durchlauf zwölf ziehen sie den Grundschlag plötzlich um 15,78ms[275] vor: ein Verhalten, dass in dieser Größe auf signifikantem Niveau bei keinem anderen Durchlauf zu finden ist[276].

Die Probanden ändern ihr Spiel nach Störstellen mithin zu einem vorgezogenen Grundschlag signifikant in jenem Durchlauf, der die ersten Unterdrückungen bringt. In Durchlauf 13 und 14 verschwindet dieses Phänomen wieder. Indes könnten beim Blick auf

---

[270] Ebda. \Zählzeit 4 bis 6 DF 12 bis 14. Dort Zeile 24.
[271] Zählzeiten sieben bis zehn sowie 17 bis 20 der Durchläufe zwölf und 14.
[272] Durchläufe drei und 13.
[273] 1,9326 zu 2,7188.
[274] Mit nur 0,2 (zu DF 12), 0,8 (zu DF 13) und 0,6 Prozent (DF 14) Irrtumswahrscheinlichkeit.
[275] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Arithmetische Mittel Abweichungen.xls\Vergleich Durchläufe: Dort Zeile 35.

die Mittelwerte in den einzelnen Passagen auch bereits erwähnte Ausreißer der Probandin zwölf[277] ursächlich sein oder solche von mehreren Probanden ab Zählzeit 17[278]. Die schließenden Verfahren bestätigen diese Annahme aber nicht.

Vielmehr liegt ein erkennbares Gruppenverhalten vor. Werden alle Vierer-Ketten von 100er Störstellen des zwölften Durchlaufs bilanziert geprüft – und zwar auch jene, denen Unterdrückungen folgen –, liegt der Wert des Blockvarianz-Quotienten nur knapp unter dem kritischen Wert der F-Verteilung beim 0,95-Quantil. Der Friedman-Test zeigt ein signifikantes Ergebnis bei einer Unsicherheit von lediglich 5,7 Prozent. Die Resultate beider Verfahren korrespondieren also. Werden die Bilanzen der Zählzeiten drei und folgende sowie sieben fortfolgende entfernt, liegt F weiterhin knapp unter dem dann für den Quotienten kritischen Wert von 3,15. Werden Zählzeit 17 und Folgezählzeiten oder 29 bis 32 gestrichen, sinkt F hingegen auf 1,69 und 1,11 ab.

Eine dieser Beobachtungen wird durch den Wilcoxon-Test im paarweisen Vergleich gestützt: Einzig die Passage ab Zählzeit 29 unterscheidet sich signifikant von anderen, und zwar von allen Folgezählzeiten[279]. Anhand der Mittelwerte formuliert: Beim erstmaligen Auftreten von Unterdrückungen nach der 100er Störstelle in Zählzeit drei des zwölften Durchlaufs verlagern die Probanden ihren Grundschlag um 21,22ms nach vorn[280]. Indes bleibt die sonst stabil auftretenden Dehnung der zweiten Folgezählzeiten aus. Direkt im Anschluss dieser Passage folgt erneut eine Störstelle, diesmal ohne anschließende Unterdrückung: Erneut verlagern die Probanden den Grundschlag insgesamt nach vorn.

Ab Zählzeit 17 fällt die Bilanz mit -66,13ms besonders negativ aus. Anders ab Zählzeit 29, der wieder eine Unterdrückung folgt: Hier wird die Störstelle nicht vorzeitig beendet, und dennoch ist eine Dehnung der Folgezählzeiten zu beobachten. Die Teilnehmer kehren zu ihrem ursprünglichen Verhalten aus den ersten Durchläufen zurück. Die Teilnehmer passen sich also während des zwölften Durchgangs der neuen Situation an und setzen dies in den verbleibenden beiden Durchläufen – gleich ob mit oder ohne Unterdrückungen – fort.

Der subjektive Eindruck der Probanden trifft also nur eingeschränkt zu, dass ihnen die Unterdrückungen keine erheblichen Schwierigkeiten bereiteten. So hatten einige von

---

[276] Einzig Durchlauf fünf nach dem ungestörten Durchlauf vier zeigt einen halbwegs vergleichbaren Wert mit minus 8,31ms.

[277] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Blockvarianzanalysen.xls\Bilanzen 100er DF12. Dort Zeile 13.

[278] Ebda.

[279] Bei 0,4 Prozent Irrtumswahrscheinlichkeit im Vergleich zur Passage ab Zählzeit drei, 6,1 Prozent mit Zählzeit sieben und 0,1 Prozent mit Zählzeit 17. Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Wilcoxon Tests\Wilcoxon Bilanz 100er DF 12.spo

ihnen erklärt, sie hätten verstärkt auf ihre Hände geachtet, ihre selektive Wahrnehmung also auf die Sensomotorik verlagert. Dennoch war ihre Motorik nicht gegen die ausbleibende und ebenso unerwartet wieder auftretende akustische Rückmeldung gefeit. Hypothese C muss also für die akute Situation abgelehnt werden, im Sinn eines rasch einsetzenden Lerneffektes aber nicht.

3.4. Zusammenhänge mit persönlichen Merkmalen

3.4.1. Temposchwankungen und Händigkeit

Wie in Kapitel 3.2.1.3. am Beispiel der Tonhöhenfehler erläutert, reagieren die überwiegend rechtshändigen Probanden in linker und rechter Hand nicht gleich auf die manipulativen Situationen des Versuchs. Während die Rechte im Verhältnis fünf zu eins überwiegend Fehler in der Tonhöhe spielt, wenn Störstellen in der eigenen Stimme vorausgehen, produziert die Linke im Verhältnis drei zu eins eher Fehler, wenn die Störstelle in der anderen Hand vorausgeht.

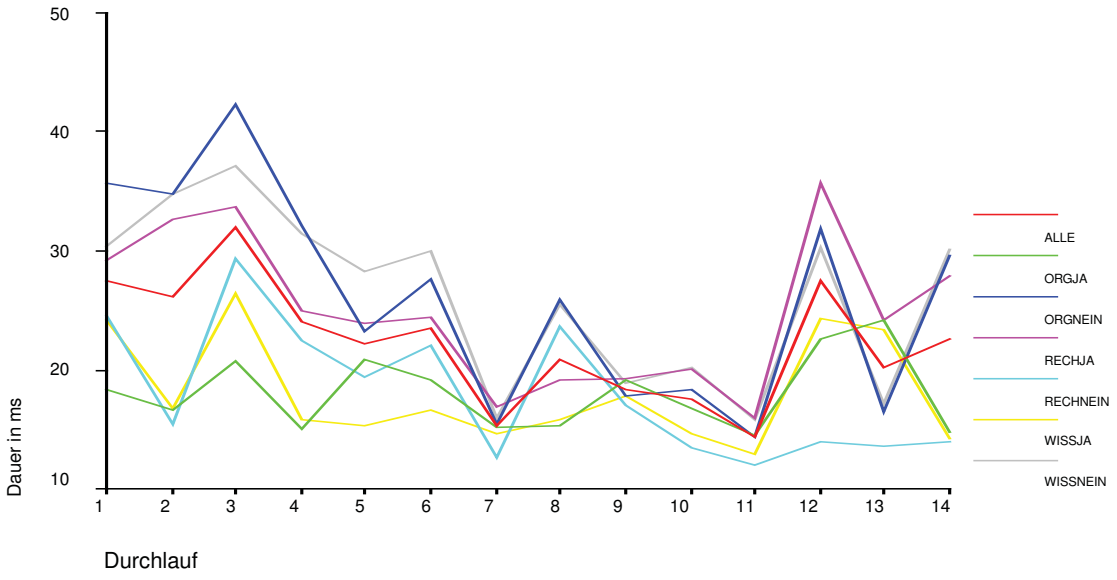


Abb. 28: Gemittelte ungerichtete Abweichungen über alle 14 Durchläufe in ms unterschieden nach den drei zweigestuften Variablen: Orgelspieler ja/nein, reiner Rechtshänder ja/nein; Vorwissen ja/nein

[280] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Häufigkeiten\Grundgesamtheit.xls\DF 12: Dort Spalte E.

Gemein war den Effekten aber, dass sich die meisten Fehler erst in der zweiten Zählzeit nach Störstellen ereigneten[281]. Vor diesem Hintergrund wurden die bisherigen Verfahren[282] auf die Frage etwaiger Unterschiede nach Händigkeit ausgedehnt[283].

In grafischer Analyse fällt zunächst auf, dass Rechtshänder (pinker Graf) in Durchlauf zwei – der die ersten Störstellen enthält – in Beträgen über alle Zählzeiten gerechnet bei ähnlichem Kurvenverlauf stärker schwanken als die tendenziell beidhändigen Teilnehmer[284]. Im Mittel schwanken sie mit 24,86ms erkennbar stärker als ‚Beidhänder' (türkiser Graf)[285]. Sowohl die Blockvarianzanalyse als auch der Rangdatentest auf Paardifferenzen nach Wilcoxon bestätigen den nicht zufälligen Unterschied mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als einem Prozent[286].

Die tendenziell beidhändig veranlagten Probanden dieser Studie spielen ab Durchlauf zehn ein gleichbleibend stabiles Tempo, während die Rechtshänder den bekannten Anstieg in Durchlauf zwölf voll ausschöpfen. So spielen sie etwa die siebte Zählzeit dort auffällig anders: Starten beide Gruppen in Zählzeit drei (erste 100er Störstelle) mit rund 35ms Schwankung, so lassen die drei anschließenden Unterdrückungen der Oberstimme die Schwankungen der Rechtshänder in Zählzeit sieben (zweite 100er Störstelle) auf 69,95ms steigen[287], mithin den beinahe dreifachen Wert ihrer mittleren Schwankungen von 24,86ms über alle Durchläufe und Zählzeittypen gerechnet. Die eher beidhändigen Probanden spielen die siebte Zählzeit mit rund 21,5ms Abweichung indes erkennbar präziser und dies in Nähe ihrer über alle Durchläufe gerechnet mittleren Schwankung von 18,11ms[288]. Durchlauf 13 scheint auf die rein rechtshändig geprägten Teilnehmer eine kurzfristig stabilisierende Wirkung zu haben[289]. Insgesamt aber bereiten die Durchläufe zwölf bis 14 den reinen Rechtshändern deutlich mehr Probleme.

---

[281] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Allgemeine Beobachtungen\Fehlerzählung Tonhöhe.xls

[282] Beurteilung der Lage-Parameter, Varianzanalyse und zu deren Prüfung der Friedman-Test.

[283] Siehe zur Erfassung jeweils in die Spalten B bis D und Zeilen 27 bis 32 beider Excel-Tabellen der Lage-Parameter unter Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter

[284] Ungerichtet betrachtet gilt dies für alle Verteilungen. Dies gilt sogar für die ungestörten Durchläufe sowie die Mittel ungestörter Noten in sämtlichen Durchläufen. Die größten Abstände beider Merkmal-Gruppen liegen bei den zweiten Folgen mit 13,13ms Unterschied und den unterdrückten Noten mit 33ms für die Rechtshänder und lediglich 16,02 für die tendenziell beidhändig veranlagten Spieler. Nach Größe der Störstelle unterschieden, bestätigt sich dies: Wiederum stammen die Zählzeiten mit größten Unterschieden zwischen beiden Gruppen aus den Durchläufen zwölf und 14, nämlich 100er Störstellen: 36,16 vs. 18,66ms.

[285] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Ungerichtete Mittel Abweichungen.xls\gesamt quadriert. Dort Zellen T29 und 30.

[286] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Faktoren\Blockvarianzanalysen faktorisiert.xls\BVA gesamt quadriert sowie Experiment\Schließende Analysen\Faktoren\Wilcoxon Test\gesamt quadriert.spo

[287] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Ungerichtete Mittel Abweichungen.xls\Störstellen nach Größe. Dort Zellen AY und AZ 30 bis 31.

[288] Ebda. \gesamt quadriert: Zelle T30.

[289] Bei beidhändig Veranlagten liegen die mittleren, ungerichteten Schwankungen ab Durchlauf zehn bei zwölf bis 14 ms. Bei reinen Rechtshändern steigt die Rate auf 35,72ms an und ‚erholt' sich in Durchlauf 13 bei vergleichsweise hohen 24,25ms.

Für ungestörte Zählzeiten sind mit Vorzeichen betrachtet keine erheblichen Unterschiede zu beobachten. Die Probanden schwanken über alle Durchläufe nur um -0,85 beziehungsweise -0,27ms[290]. Auch die schließenden Tests ermitteln keinen unzufälligen Unterschied[291]. Bei den gestörten Zählzeiten verkürzen die Rechtshänder stärker in Durchlauf neun[292], die beidhändig Veranlagten im zwölften Durchlauf[293]. Bezogen auf die Größe der Störstelle sind keine substanziellen Unterschiede zwischen beiden Merkmalgruppen zu beobachten. Lediglich bei den 120er Störstellen zeigen sowohl die Blockvarianzanalyse als auch der Z-Wert im Wilcoxon-Test leicht erhöhte Werte, nicht aber auf ausreichendem Signifikanz-Niveau[294].

Größere Unterschiede – indes weiter auf nicht signifikantem Niveau – liegen bei den ersten Folgezählzeiten zwischen Rechtshändern und eher beidhändigen Teilnehmern vor. Im achten Durchlauf weichen Rechtshänder zwar deutlich vom ungerichteten Gesamtmittel ab, eher beidhändig veranlagte Spieler nicht[295]. Auch im zwölften Durchlauf können stärkere Abweichungen beobachtet werden[296]. Der Wert des Blockvarianz-Quotienten bleibt aber unter der oberen 5-Prozent-Schranke. In den Gruppen liegen also sehr wahrscheinlich keine unterschiedlichen Erwartungswerte vor. Der Wilcoxon-Test bestätigt das mit einem Z-Wert von -1,78 bei rund 7,4 Prozent Irrtumswahrscheinlichkeit.

Auch zweite Folgezählzeiten unterscheiden die Gruppen nicht voneinander. Zwar dehnen die Rechtshänder diese im zweiten Durchlauf um fast den vierfachen Wert der tendenziell Beidhändigen, in Durchlauf drei noch um den annähernd doppelten Wert. In Durchlauf zwölf weichen sie sogar in der Richtung voneinander ab. Überhaupt markiert Durchlauf zwölf (bei den Rechtshändern) die gemittelt einzige Verkürzung bei den zweiten Folgezählzeiten, und dies um immerhin 7,23ms[297]. Im nicht unterdrückten Pendant 13 verlängern die Rechtshänder dann um 5,6ms, im letzten Gang sogar um 12ms.

Die reinen Rechtshänder begegnen der manipulativen Situation gegen Ende des Versuchs also ohne erkennbares Muster, die tendenziell beidhändig veranlagten Spielerinnen und Spieler indes mit konstantem Verhalten. Auf alle Durchläufe bezogen

---

[290] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Arithmetische Mittel Abweichungen.xls\Ungestörte: Zellen E29 bis U30.

[291] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Faktoren\Blockvarianzanalysen faktorisiert.xls\BVA Ungestörte sowie Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Faktoren\Wilcoxon Test\Ungestörte.spo

[292] -15,74ms vs. -6,93ms.

[293] -21,82 vs. -12,77ms.

[294] Der Wert des Blockvarianz-Quotienten für den Vergleich von k=zwei Merkmalen in n=zwölf Messpunkten liegt unterhalb des kritischen Werts der F-Verteilung beim 0,95-Quantil (obere 5-Prozent-Schranke). In den Gruppen liegen also sehr wahrscheinlich keine unterschiedlichen Erwartungswerte vor. Der Vorzeichen-Rang-Test nach Wilcoxon liefert mit einem Z-Wert von -1,02 ebenfalls kein signifikantes Ergebnis mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p \leq$ fünf Prozent.

[295] 13,45 vs. 0,42ms.

[296] -5,2 zu 1,71ms.

fallen diese Unterschiede indes nicht erheblich ins Gewicht. Die Werte für F und Z sind gering. Dennoch kann hieraus ein Ergebnis formuliert werden. Nämlich, dass die Händigkeit bei den Teilnehmerinnen und Teilnehmern der Studie kein belegbar unterscheidendes Merkmal für die Gestaltung ungestörter und (gleich welcher Größe) gestörter Zählzeiten sowie der ersten und zweiten Zählzeiten danach ist. Damit liefert die Studie keine Argumente für eine Annahme, dass eine Tendenz zur Beidhändigkeit die Tempogestaltung im unmittelbaren Umfeld von Störstellen stabilisiert.

Allerdings hat diese Arbeit mehrfach gezeigt, dass die zweiten Folgezählzeiten eine Sonderrolle einnehmen. Zum Beispiel durch eine erhöhte Anzahl falscher Tonhöhen bei den Rechtshändern, zwei Zählzeiten nach Störstellen. Diese Fehler selbst bleiben nicht ohne Folge. Denn in der dritten Zählzeit zeigen Rechtshänder Schwankungen im Tempo, die sie erheblich von den eher beidhändig Veranlagten unterscheiden. Der Varianzquotient überschreitet den kritischen Wert der oberen 1-Prozent-Schranke. Auch der Wilcoxon-Test liefert ein signifikantes Ergebnis bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von lediglich 1,3 Prozent. Arithmetisch ausgedrückt liegen die Merkmalgruppen bei den dritten Folgezählzeiten über alle Durchläufe betrachtet um fast 17ms auseinander[298].

Wie oben bereits zur siebten Zählzeit von Durchlauf zwölf angedeutet, kann das persönliche Merkmal Händigkeit die Probanden im Umfeld unterdrückter Passagen dennoch unterscheiden. Der Wert des Blockvarianz-Quotienten für den Vergleich der Zählzeiten vier bis sechs in den Durchläufen zwölf bis 14 liegt nur knapp unter dem kritischen Wert der F-Verteilung für die obere 5-Prozent-Schranke[299]. Diese innere Unausgewogenheit wird durch den Vorzeichen-Rang-Test nach Wilcoxon mit einem Z-Wert von -1,84 und damit einem signifikanten Ergebnis bei allerdings alpha gleich 6,6 Prozent bestätigt. Arithmetisch liegt der Unterschied maßgeblich in den zweiten Folgezählzeiten. In Durchlauf 13 liegen reine Rechtshänder mit 10,85ms Dehnung und tendenziell beidhändig Veranlagte mit 13ms Kürzung am weitesten auseinander[300].

Werden die Serien – also die Mittel über die je drei Zählzeiten – miteinander verglichen, unterscheiden sich Rechtshänder von tendenziell beidhändig veranlagten Probanden per Varianzanalyse auf signifikantem Niveau. Der Wilcoxon-Test liefert bei zweiseitiger Fragestellung aber nur ein Ergebnis bei 10,9 Prozent Irrtumswahrscheinlichkeit. Für die

---

[297] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Arithmetische Mittel Abweichungen.xls\2. Folgezählzeit: Zeilen 29 und 30.
[298] Ebda. \3. Folgezählzeit: Zeilen 29 und 30.
[299] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Faktoren\Blockvarianzanalysen faktorisiert.xls\BVA ZZ 4 bis 6 DF 12 bis 14
[300] Ebda. \Zählzeit 4 bis 6 DF 12 bis 14. Dort Zellen F und G 6.

Zählzeiten 30 bis 32 in den drei Durchläufen sind keine belastbaren Auffälligkeiten festzustellen.

3.4.2. Temposchwankungen und Vorwissen

Vorwissen über die manipulierte Klaviatur verhilft Probanden zu einem insgesamt stabileren Tempo. Alle Zählzeiten berücksichtigt schwankt die Motorik der informierten Probanden ohne Vorzeichen über alle Durchläufe richtungslos gemittelt um 8,08ms weniger als bei Teilnehmern ohne Vorkenntnisse[301]. Die Blockvarianzanalyse[302] und der Rangdatentest[303] bestätigen die Beobachtung der beschreibenden Analysen.
Ohne Vorzeichen betrachtet liegen die Mittelwerte für die Schwankungen der nicht informierten Gruppe stets über denen der informierten Probanden[304], einzig im 13. Durchgang nicht. Allerdings nimmt das Vorwissen keinen wesentlichen Einfluss auf das grundsätzliche Lernverhalten.

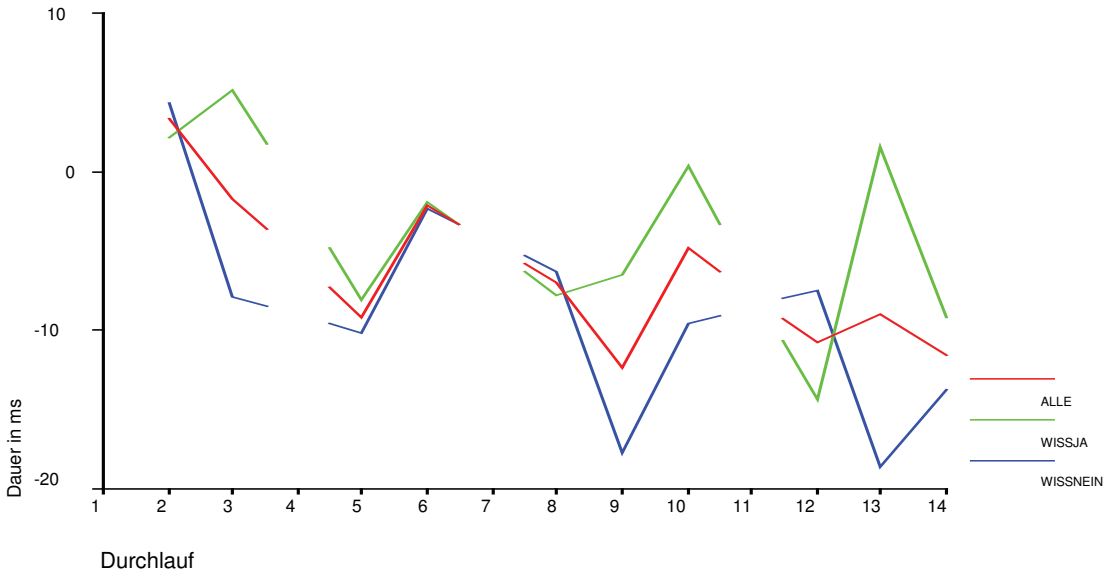


Abb. 29: Arithmetische Mittel gestörter Zählzeiten in ms über alle 14 Durchläufe (roter Graf) sowie mit und ohne Vorwissen.

[301] 18,06 vs. 26,14ms. Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Ungerichtete Mittel Abweichungen.xls\gesamt quadriert. Dort Zellen T 30 und 31.
[302] F-Wert mit rund 17,81 weit über der oberen 1-Prozent-Schranke: Experiment\Schließende Analysen\Faktoren\Blockvarianzanalysen faktorisiert.xls\BVA gesamt quadriert
[303] Mit einem Z-Wert von -2,856 signifikantes Ergebnis bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von lediglich 0,4 Prozent: Experiment\Schließende Analysen\Faktoren\Wilcoxon Test\gesamt quadriert.spo
[304] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Ungerichtete Mittel Abweichungen.xls\gesamt quadriert. Dort Zeilen 31 und 32, Spalte T etc.

Gestörte Zählzeiten werden im Verlauf des Versuchs nach anfänglicher Dehnung von beiden Merkmal-Gruppen immer stärker gekürzt (siehe Abbildung 29). Insgesamt kürzen Probanden ohne Vorwissen Störstellen um 10,16ms, während informierte Teilnehmer diese über alle Durchgänge betrachtet um 4,44ms kürzen[305].

Der Wert des Blockvarianz-Quotienten für die zweigestufte Variable liegt für gestörte Zählzeiten über dem kritischen Wert der F-Verteilung zur oberen 5-Prozent-Schranke. Der Vorzeichen-Rang-Test verfehlt die Schranke mit höherer Irrtumswahrscheinlichkeit von 9,3 Prozent. Doch schon Abbildung 29 legt den Schluss nahe, dass sich die Merkmal-Gruppen im Detail unterscheiden. Markant weichen die Gruppen in den stark gestörten Durchläufen drei, neun, zehn und dreizehn voneinander ab. Jedoch gibt es mit Durchlauf sechs auch eine stark manipulierte Variante, in der sich die Gruppen sehr ähneln. Ein – etwa linearer – Zusammenhang der Abweichungen einer der beiden Gruppen mit der Größe der Störstelle ist nicht formulierbar. So unterscheiden die Gruppen sich im 50er Durchlauf zwei und dem 120er Durchgang sechs kaum voneinander. Auch die Durchläufe selbst liegen auf vergleichbarem Niveau.

Im Einzelnen weicht die Gruppe mit Vorwissen um -2,8ms bei den 50ern, -3,9ms bei den 80ern und vergleichbaren -4,2ms bei den 120ern ab. Ähnlich konstant verhalten sich die nicht informierten Probanden bei diesen Größen. Indes auf niedrigerem Niveau[306], das jedoch keinen signifikanten Unterschied ausmacht: Blockvarianzanalysen und Wilcoxon-Tests zeigen keine Werte über der oberen 5-Prozent-Schranke[307].

Größer ist die Spanne zwischen den Merkmal-Gruppen im 13. Durchgang. Dehnen informierte Teilnehmer die 100er Störstellen um 1,59ms, so kürzen nicht informierte sie um 18,64ms, und damit noch stärker als im ersten 100er Durchlauf drei. Werden beide Durchgänge zusammen betrachtet, ergeben die Blockvarianzanalyse und der Rangdaten-Test signifikante Unterschiede zwischen den Merkmal-Gruppen[308]. Der Effekt geht dabei maßgeblich auf den 13. Durchlauf zurück: Wird Nummer drei aus der Analyse entfernt, liegt der Varianzquotient mit rund 6,78 immer noch über dem dann kritischen Wert der oberen 5-Prozent-Schranke und nahe der 2,5-Prozent-Marke. Wird Durchlauf 13 entfernt, zeigen sich keine substanziellen Unterschiede bei den 100er Störstellen.

---

[305] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Arithmetische Mittel Abweichungen.xls\Gestörte

[306] Jedoch noch nicht bei den 50ern, die sie um lediglich -0,97ms kürzen. Vergleiche dazu Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Arithmetische Mittel Abweichungen.xls\Störstellen nach Größe. Dort Zellen S, AH, AW sowie BW 32 und 33.

[307] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Faktoren\Blockvarianzanalysen faktorisiert.xls\BVA Störstellen nach Größe

[308] Ebda. Zelle L 64: F-Wert bei 7,91 über der kritischen 2,5-Prozent-Schranke; Z-Wert mit -2,118 signifikant bei 3,4 Prozent Irrtumswahrscheinlichkeit sowie Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Faktoren\Wilcoxon Test\100ms.spo

Die 100er Störstellen der Durchläufe zwölf und 14 werden zufällig verschieden gestaltet. Damit sind die 100er Störstellen des 13. Durchlaufs die einzigen Störstellen überhaupt, in denen das Vorwissen unterscheidenden Charakter hat: Die Merkmal-Gruppen reagieren anders auf die Lage, dass in Nummer 13 mutmaßlich erwartete Unterdrückungen ausbleiben.

Der Unterschied liegt im eher unbeeinträchtigten Verhalten der informierten Gruppe gegenüber dem beeinträchtigten derjenigen ohne Vorkenntnisse: Verkürzen die informierten Probanden die erste Störstelle im zwölften Durchlauf um 33,56ms, so setzen sie dies nach Auftreten der Unterdrückungen mit -33,06ms vergleichbar fort. Ähnlich ist ihr Verhalten im Gegenstück 14 mit -22,87 und -19,37ms zu bewerten. Auch der eingeschlossene Durchlauf 13 ohne Unterdrückungen kann hier – wenn auch auf anderem Niveau – mit -9,33 und -2,43ms als in sich konstante Gestaltung der informierten Teilnehmer angeführt werden.

Fehlt das Wissen um zu erwartende und dann wieder ausbleibende Unterdrückungen, sehen die Schwankungen der Störstellen der Zählzeiten drei und sieben in Durchlauf zwölf wie folgt aus: -24,25 und 27,93. Ist das Niveau in Zählzeit drei dem der informierten Probanden ähnlich, dehnen die Teilnehmer ohne Vorwissen plötzlich die Zählzeit sieben, genau in dem Moment, wo die Unterdrückungen wieder ausbleiben[309].

Zählzeit sieben unterscheidet bei Durchlauf zwölf nicht nur die informierte von der nicht informierten Gruppe, sondern jene auch vom eigenen, vormaligen Verhalten. Dass die Probanden in Durchlauf zwölf eine Erwartungshaltung für Durchlauf 13 aufbauen, die durch das Ausbleiben der Unterdrückungen der Zählzeiten vier bis sechs dort enttäuscht wird, muss als mögliche Ursache berücksichtigt werden. Im Grunde kann dieser Effekt bei den Probanden mit Vorwissen nur ausbleiben, weil sie ihre motorische Koordination mit erstem Auftreten von Unterdrückungen anders organisieren als Teilnehmer ohne Vorwissen. Trifft das zu, müsste die Tempogestaltung bereits in den ursächlichen Zählzeiten vier bis sechs Auffälligkeiten zeigen.

Bei den Folgezählzeiten zeigen sich beide Gruppen eher unauffällig. In den zweiten Folgezählzeiten sind die Differenzen erneut deutlicher. Zwar unterschreitet der Blockvarianz-Quotient die kritische obere 5-Prozent-Schranke. Streng genommen dürften keine unterschiedlichen Erwartungswerte für die zweigestufte Variable formuliert werden. Der Vorzeichen-Rang-Test nach Wilcoxon liefert mit einem Z-Wert von -1,78 aber auch

[309] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Arithmetische Mittel Abweichungen.xls\Störstellen nach Größe: Zellen AP 32 bis AQ 33 und AY 32 bis AZ 33.

ein Ergebnis mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von nur 7,4 Prozent und damit fast am gesetzten Signifikanz-Niveau.
Im Grunde finden sich ähnliche Unterschiede wie bei den Merkmal-Gruppen zur Händigkeit: Wiederum spielt die Gruppe mit mutmaßlicher Zusatzbefähigung (dort Mehrhändigkeit, hier Wissensvorsprung) mit geringeren Schwankungen[310] und während der letzten vier Durchläufe in wesentlich konstanterem Verhalten[311]. Wiederum verändert sich das Verhalten der nicht informierten Gruppe von Durchlauf zwölf zu 13: Kürzen sie die zweite Folgezählzeit nach einer 100er Störstelle in Durchlauf zwölf um gemittelte 5,53ms, verlängern sie diese in Nummer 13 um 12,98ms.
Werden die unterdrückten Passagen der Durchläufe zwölf und 14 gegen das Pendant 13 ohne Unterdrückungen anhand des Vorwissens untersucht, sind indes keine signifikanten Unterschiede zu entdecken. Einzig die fünften Zählzeiten für sich betrachtet liefern als zweite Folge nach der 100er Störstelle einen F-Wert nahe der oberen 5-Prozent-Schranke[312]. Wenig auffällig ist auch der Vergleich der Zählzeittypen am Merkmal Vorwissen wie auch die Bilanzen sortiert nach Störstellen samt ihren Folgezählzeiten[313].

3.4.3. Temposchwankungen und Orgelspiel

Das in dieser Studie mutmaßlich einflussreichste persönliche Merkmal Orgelspieler lässt auf vergleichbare Gruppenunterschiede schließen. Ungerichtet über alle Durchläufe und Zählzeittypen gemittelt schwanken Organisten um 18,1ms, Probanden ohne Orgelpraxis um immerhin 26,1ms. Der Wert des Blockvarianz-Quotienten für diese Verteilung liegt klar oberhalb des kritischen Werts der F-Verteilung beim 0,99-Quantil. Der Vorzeichen-Rang-Test nach Wilcoxon liefert mit einem Z-Wert von -2,67 ein ebenso signifikantes Ergebnis mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von lediglich 0,8 Prozent. In den Gruppen liegen sehr wahrscheinlich unterschiedliche Erwartungswerte vor.
Ohne Betrachtung des Vorzeichens meistern die Orgelspieler auch die manipulierten Passagen mit deutlich geringeren Schwankungen als Teilnehmer ohne Orgelpraxis[314].

---

[310] um 6,50ms gedehnt vs. 11,63ms. Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Arithmetische Mittel Abweichungen.xls\2. Folgezählzeit: U31 und 32.
[311] Ebda. P bis R31 vs. 32.
[312] Experiment\Schließende Analysen\Faktoren\Blockvarianzanalysen faktorisiert.xls\BVA Serien 4 bis 6 DF 12 bis 14 sowie \BVA Serien 30 bis 32 DF 12 bis 14
[313] Ebda. \BVA Bilanz nach Störgröße
[314] Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Ungerichtete Mittel Abweichungen.xls\Zählzeittypen: Sowohl bei den ungestörten, gestörten, 1. und 3. Folgezählzeiten wie auch den unterdrückten schwanken die Nicht-Orgelspieler erheblich mehr – im Mittel um rund 10ms – als die Orgelspieler. Vergleiche dazu die Zellen E 27 bis J 28 sowie die Mittelwerte in L 27 und 28. Bei den unterdrückten Zählzeiten liegen die Gruppen sogar um fast 20ms auseinander.

Wird das Vorzeichen berücksichtigt, neutralisieren sich positive und negative Schwankungen nahezu. Die schließenden Analysen ermitteln keine signifikanten Unterschiede bei den ungestörten und gestörten Zählzeiten. Erste Folgezählzeiten unterscheiden die Gruppen per Rangdaten-Test mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5,9 Prozent, der Varianzquotient stützt dieses Ergebnis aber nicht substanziell[315].

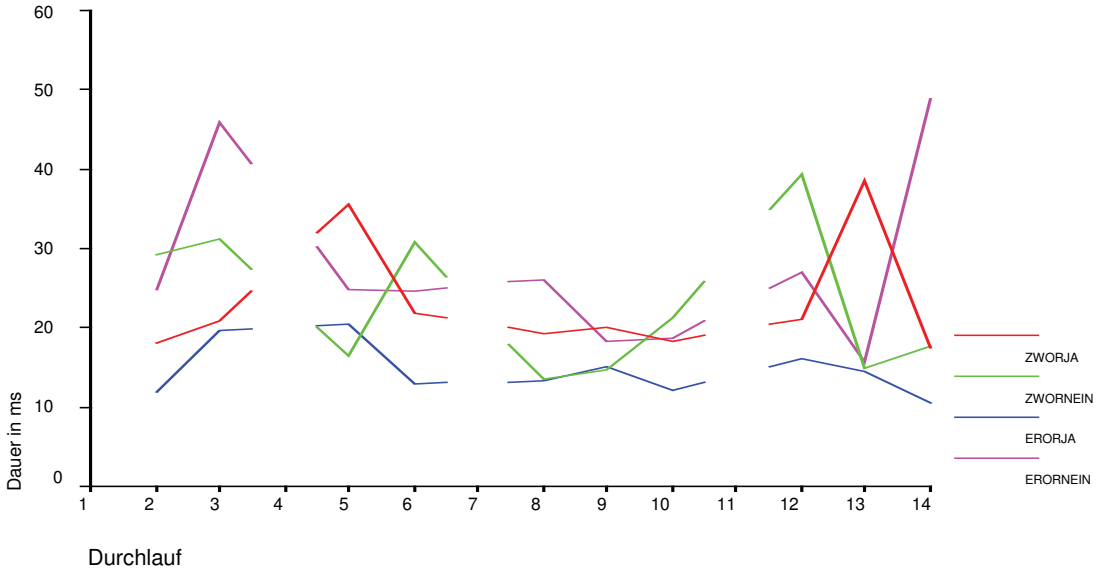


Abb. 30: Mittlere gerichtete Abweichungen in den ersten und zweiten Folgezählzeiten unterschieden nach Orgelspielern und Nicht-Orgelspielern

Die zuvor häufig betrachteten zweiten Folgezählzeiten liefern zunächst unauffällige Ergebnisse: Orgelspieler schwanken in den zweiten Folgezählzeiten in ungerichteten Mitteln um 22,08ms, die Nicht-Orgelspieler um 23,41ms. Diese Größen liegen im Bereich des ungerichteten Gesamtmittels von 22,29ms. Arithmetisch betrachtet erreichen die Werte der Blockvarianzanalyse und des Wilcoxon-Tests keine kritischen Schranken.

Bis zum zwölften Durchlauf ist das Verhalten beider Merkmal-Gruppen eher unauffällig. Die Organisten spielen die zweiten Folgezählzeiten (roter Graf) zu Beginn des Versuchs präziser – im fünften Durchgang hingegen die Probanden ohne Orgelpraxis (grüner Graf). In Durchlauf zwölf steigen die Schwankungen der Nicht-Orgelspieler sprunghaft an, die Organisten scheinen von der veränderten Situation unberührt. Indes verwundert beider Verhalten im folgenden Ablauf: Die auf Entkopplungen vermeintlich besser vorbereiteten Organisten quittieren das Ausbleiben erneuter Unterdrückungen in Durchlauf 13 mit erkennbar größeren Schwankungen in den zweiten Folgezählzeiten – die mutmaßlich

[315] Nur leicht erhöhter Wert von 2,7704, kritischer Wert für Alpha gleich fünf Prozent ist 4,4139.

ungeschulteren Nicht-Organisten hingegen erzielen hier einen vergleichsweise niedrigen Wert[316].

Bei näherer Betrachtung geht das Verhalten wesentlich auf einen Organisten zurück, sogar auf eine einzelne Zählzeit: Proband 16 beendet Zählzeit 19 nicht mit einem d'' in der Rechten. Die Linke drückt aber weiterhin das kleine c. Damit fehlt ein Ereignis, dass als Ende der Zählzeit und sinnvoll als Beginn der 20. gewertet werden könnte. Erst 1.255ms nach Anlauf der Zählzeit 19 schlägt der Proband mit dem (nicht notierten) großen H eine neue Note an. Anders als bei den meisten anderen extremen Schwankungen ist in dieser zweiten Folgezählzeit (sowie der sie umgebenden Passage) tatsächlich ein vereinzelter Ausreißer zu sehen[317].

Würde besagter Wert entfernt, resultierte kein Mittelwert, der den Organisten eine deutlich präzisere Gestaltung der zweiten Folgezählzeiten in Durchlauf 13 bescheinigte. Vielmehr glichen sich die Merkmal-Gruppen sowohl mit als auch ohne Vorzeichen betrachtet an[318].

3.5. Zusammenfassung

Allgemein konnte in dieser Studie gezeigt werden, dass Entkopplungen von sensomotorischer Ursache (Tastendruck) und auditiver Wirkung (Klang) die Handlungsplanung im Klavierspiel erkennbar beeinträchtigen können. Dies bestätigt Ergebnisse eines Experiments von Finney (1997): Er ließ Probanden ein Stück von Johann Sebastian Bach auf einem Keyboard (Yamaha DX 7 II) spielen, wobei er entweder die Klänge der Tasten um 250ms verzögerte, sie gänzlich unterdrückte, die Tonhöhen manipulierte oder gar die Störungen kombinierte. Verzögerte Klänge beeinflussten die Anschläge der Probanden dabei auf signifikante Weise, veränderte Tonhöhen nicht[319]. Indes wurden alle Töne verzögert, und dies mit 250ms um eine Spanne, die von vielen

---

[316] 14,81ms.

[317] Experiment\Einzelanalysen\Proband 16\Schritt 3 Datenaufbereitung Excel\PR 16.xls\Anschläge Erste Hand. Spalte BL. Würde der Proband der primären Aufgabenstellung eines konstanten Tempos dennoch gerecht und bemerkte seinen erneuten Fehler (nach Auslassen des zweigestrichenen d) und ließe das große H für nur eine Zählzeit gedrückt, so könnte es als erster (falscher) Anschlag auf Zählzeit 21 gewertet werden. Indes hält der Proband das große H für rund 900ms gedrückt und damit deutlich länger als alle übrigen Viertelnoten: Die Dauer fällt eher in den Bereich einer Halben bei diesem Probanden. Zudem kürzt er das c" (eigentlich e") auf eine Viertel zusammen. Damit ist klar, dass in diesem Moment die Linke das Tempo vorgibt, was sie eigentlich mit dem Melodiewechsel zur Unterstimme erst ab Zählzeit 22 tun sollte. Überdies legt der Proband eine kurze Pause ein - quasi die der Zählzeit 21 in der Linken, um dann seine Motorik völlig neu zu koordinieren. In seiner Planung ist der Proband mithin schon frühzeitig bei Zählzeit 22, seine Motorik setzt dies aber nicht um.

[318] 14,89 (Organisten) zu 14,81ms ungerichteter, mittlerer Schwankung (9,02 zu 11,67ms mit Vorzeichen) für Durchlauf 13 sowie 20,77 zu 22,88ms über alle Durchläufe gerechnet.

[319] Finney 1997, S. 169.

Experimenten der Forschung zur musikalischen Psychomotorik nicht als der wesentliche Bereich akustischer Schwellenwerte menschlicher Wahrnehmung beschrieben wird[320].

Im hiesigen Experiment unterscheiden sich gestörte Zählzeiten in ihrer Gestaltung signifikant von allen übrigen, indem sie über alle Durchläufe gemittelt um 7,43ms gekürzt werden. Jedoch kürzen die Probanden die Störstelle noch nicht in den Durchläufen zwei und drei, die erste Störstellen bringen. Dort ist aber dennoch ein reaktives Verhalten nach Störstellen zu beobachten: Die zweiten Folgezählzeiten werden um rund 14 beziehungsweise 22ms gedehnt. Erst im Lauf des Versuchs gleichen die Teilnehmer diese systematische Dehnung aus, indem sie die Zählzeit der Störstelle kürzen und dadurch im Grundschlag bleiben. Aus dieser logisch zeitlichen Abfolge kann geschlossen werden, dass die im Versuch zunehmende Kürzung der Störstelle das eigentliche Korrekturverhalten der Pianisten darstellt.

Wenn man so will, ist diese Kürzung der Störstellen ein frappierendes Ergebnis: Die Probanden scheinen nicht zu wissen, ab welcher Zählzeit nach Störstellen sie mit ihrem Anschlag in einem für sie unverträglichen Maß über den ursprünglichen Grundschlag hinaus sind. Denn könnten sie dies lokalisieren, wäre zu fragen, warum sie nicht die Dehnung der zweiten Folgezählzeit selbst unterbinden. Um dennoch der Aufgabe eines konstanten Tempos gerecht zu werden, kürzen sie zunehmend immer an der Stelle, wo sie die Ursache für ihre spätere – für sie scheinbar nicht kalkulierbare Reaktion – vermuten. Sie kürzen also unmittelbar in der gestörten Zählzeit selbst.

Die Kürzung scheint nicht von der Größe der Störstelle abzuhängen. Zwar liegt das arithmetische Mittel der 50er Störstellen mit -1,84ms erkennbar unter den Werten der 80er bis 120er Manipulationen[321]. Die schließende Statistik bescheinigt aber nur den 80er und 120er Störstellen im parametrischen wie nichtparametrischen Verfahren einen substanziellen Unterschied zu ungestörten Zählzeiten und dies jeweils bei Mittelwerten von rund sieben Millisekunden Kürzung. Die Bilanz nach Ende der dritten Folgezählzeit ist einzig bei 80er Störstellen mit 2,88ms Dehnung nahezu ausgeglichen. Gehen 50er Störstellen voraus, verschieben die Probanden den Grundschlag im Mittel um 14,52ms, bei 100ern gar um 17,60 und bei 120ern um 10,89ms über die Zeitleiste nach hinten[322].

Es ist also denkbar, dass ein Schwellenwert, ab dem die Probanden ihren Grundschlag verschleppen, in dieser Studie durch zu grob gestaffelte Werte der Störstellen oder einen

---

[320] Bezogen auf Fragestellungen zur rein zeitlichen Wahrnehmung. Für die Wahrnehmung bedeutungs- oder strukturunterscheidender Inhalte akustischer Phänomene – insbesondere der Sprache – werden höhere Zeitdifferenzen beschrieben. Siehe auch Koelsch 2008, S. 397ff.

[321] -7,02 für 80er, -5,35 für die 100er, -7,25 für die 120er und -15,72ms bei den 100er Störstellen der Durchläufe mit Unterdrückungen.

zu niedrigen Eingangswert von 50ms nicht erfasst worden ist. Unabhängig von dieser Überlegung sind die Hypothesen A und B dennoch zu verwerfen. A, weil die nächste Taste nicht verzögert sondern vorzeitig angeschlagen wird. Dies allein wäre schon Grund, um auch Hypothese B abzulehnen. Überdies gelingt den Probanden aber die in B behauptete Rückkehr in den Grundschlag erst durch einen Lerneffekt im Lauf des Versuchs und mit geringer Abweichung von 2,88ms im Grunde nur nach 80er Störstellen. Die Frage ist, ob 80er Störstellen ein signifikant anderes Verhalten auslösen.

Die schließenden Verfahren sehen im paarweisen Vergleich bedeutsame Unterschiede der 80er Bilanzen zu den 100ern und den 100ern der Durchläufe mit Unterdrückungen. Das Modell einer einzelnen, statischen Inneren Uhr, die zur Neuausrichtung sensomotorischer Handlungen dient, kann diese Befunde nicht erklären. Im Gegenteil: Im Grunde ist nach Ablauf von drei Folgezählzeiten – bezogen auf die mittlere Dauer einer Zählzeit über alle Probanden und Durchläufe gerechnet also nach rund 1,5 Sekunden – mit Ausnahme der 80er-Bilanzen keine erfolgreiche kumulierte Korrektur zu erkennen.

Wäre eine Innere Uhr statisch, schlüge sie den tatsächlichen motorischen Handlungen damit unentwegt entgegen. Denn die zu Beginn des Versuchs erkennbare Verschleppung von bis zu 30ms übersteigt die von Bruhn (2000) und Snyder (2001) beschriebenen Schwellen zur zeitlichen Unterscheidung akustischer Signale deutlich. Zwar könnten die Beobachtungen von Rasch (1988) als Gegenargument dienen, wonach die motorische Präzision im Orchesterspiel orientiert am Aufbau des Klangcharakters der einzelnen Instrumente ohnehin um bis zu 50ms schwanke.

In der hiesigen Studie haben um rund 30ms verschleppte Grundschläge aber bereits einen Lerneffekt angestoßen. Zudem hatten die Instrumentalisten bei Rasch neben den eigenen auch fremde akustische Resultate einzubeziehen. Entsprechend schwanken die Probanden im solistischen Ansatz der hiesigen Studie über alle Zählzeiten gerechnet nur um ungerichtete 22,29ms, wobei auch hier ein Lerneffekt zu beobachten ist. Der solistische intermodale Abgleich führt damit zu einer präzisieren Motorik als der intramodal auditive zwischen Instrumentalisten.

Die bisherigen Ergebnisse machen es unwahrscheinlich, dass die Pianisten von äußeren akustischen Reizen einerseits lernen und deren Asynchronie von bis zu 30ms gegenüber einem statischen Inneren Taktgeber dennoch ignorieren. Vielmehr könnte dies mit einem Modell Innerer Uhren nur erklärt werden, wenn diese justierbar wären. Die Uhr muss zumindest angehalten oder kurzfristig gegen eine andere gleicher Taktung ausgetauscht

---

[322] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Blockvarianzanalysen.xls\Bilanz nach Störgröße

werden können, wenn sie die maßgebende Instanz für sensomotorische Handlungen im Solo-Instrumentalspiel sein soll.

Ein allein wirkendes Stimulus-Response-Modell bliebe von diesen Ergebnissen zunächst unberührt: Die Dehnung wird als solche gegenüber dem erinnerten Referenzintervall empfunden. Da das Referenzintervall nur Informationen über die Dauer, nicht aber die Abfolge von Zählzeiten ermöglicht, korrigieren die Teilnehmer in der Zählzeit, die sie als Ursache für ihre anschließende Dehnung erkennen. Sie kürzen also die Zählzeit der Störstelle selbst. Und weil sie vorausberechnen müssen, ihnen aber die Information ihrer künftigen Dehnung selbstverständlich fehlt, begnügen sie sich mit einer qualitativen Korrektur, einer Kürzung zum Ausgleich der erwartet folgenden Dehnung. In absoluten Zahlen würde eine erfolgreiche Korrektur mithin nur zufällig sein.

Dem widerspricht aber der Lerneffekt: In Durchlauf acht verschleppen die Pianisten den Grundschlag drei Zählzeiten nach Störstellen nur noch um rund vier Millisekunden[323]. Im neunten Durchgang mit 120er Störstellen ‚eilen' die Teilnehmer gar um zirka eine Millisekunde voraus. Insbesondere die Bilanz zwischen gestörter Zählzeit und zweiter Folge wird im Lauf des Versuchs immer ausgeglichener[324]. Eine ausschließend wirkende Rückkopplungsschleife (Frage 1) könnte den Lerneffekt und die Vielzahl auszugleichender motorischer Schwankungen nur dann erklären, wenn sie kurzfristige Wechsel einer Vielzahl erinnerter Zeitintervalle zuließe.

Eine derartige Variabilität verschiedener Referenzintervalle kann ohne die Annahme zumindest eines Hauptreferenzintervalls aber weder das über Jahre stabile Tempo von solistischen Instrumentalisten erklären (Auhagen 2008) noch die hiesigen Ergebnisse. Damit ist auch das Modell einer ausschließend wirksamen Rückkopplungsschleife samt Referenzintervall (Kognitionsmodell A[325]) in Frage gestellt. Vielmehr müsste es eine kognitive Größe geben, die entscheidet, welches der auditiv erinnerten Zeitintervalle wann Referenz ist.

Nicht zu übersehen korrespondiert die Zahl der Tonhöhenfehler mit den Größen der zeitlichen Schwankung im Versuch[326]. Auch entfallen mehr als ein Sechstel aller Tonhöhenfehler auf zweite Folgezählzeiten. Die in den Bereichen nach Störstellen leicht erhöhte Rate[327] an Tonhöhenfehlern steigt zudem mit der Größe der vorausgehenden

---

[323] Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Lage Parameter\Arithmetische Mittel Abweichungen.xls\Vergleich Durchläufe

[324] Ebda. Zeile 32.

[325] Siehe Kapitel 1.4.1.

[326] Der Pearson-Wert von 0,900 ist bei einseitiger Fragestellung auf einem Niveau von alpha gleich 0,01 signifikant. Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Korrelationen\Korrelation Tonhöhenfehler Schwankung.spo

[327] 0,91 Prozent der Zählzeiten nach Störstellen enthielten einen Tonhöhenfehler gegenüber 0,77 Prozent der Zählzeiten außerhalb.

Störstelle. Über dreizehn Prozent[328] aller Tonhöhenfehler im Versuch fallen auf zweite Folgezählzeiten nach Störstellen von mehr als 80ms.

Indes schließen die Daten bislang nicht aus, dass der formulierte Zusammenhang zwischen der Kürzung gestörter und Dehnung zweiter Folgezählzeiten kein unmittelbarer ist. So könnten Tonhöhenfehler beim Anschlag der zweiten Folgezählzeit Resultat der vorigen Störstelle sein und ihrerseits die Probanden zu einer Dehnung der zweiten Folge veranlassen, die ohne den Tonhöhenfehler nicht stattgefunden hätte. So bestünde lediglich ein mittelbarer Zusammenhang zwischen dem Tempo gestörter Zählzeiten und dem zweiter Folgezählzeiten. Die Frage lautet, ob zweite Folgezählzeiten mit Tonhöhenfehlern überwiegend gedehnt, während jene ohne signifikant anders gestaltet werden.

Die arithmetischen Mittel von 4,66 zu 4,44ms für beide Verteilungen unterscheiden sich wenig. Das gilt auch für die Standardabweichungen und Varianzen[329]. Zudem liegen die ungerichteten Mittel mit 10,95 für die zweiten Folgezählzeiten ohne Tonhöhenfehler zu 11,99ms nahe beisammen. Der gegenüber Ausreißern robustere Lage-Parameter Median zeigt für die Verteilung ohne Tonhöhenfehler keine bedeutsame nummerische Abweichung zum eigenen arithmetischen Mittel. Bei der Verteilung mit Tonhöhenfehlern indes schon: Einzelne extreme Schwankungen fallen dort ins Gewicht, die diese Verteilung von der ohne Tonhöhenfehler unterscheiden könnten[330].

Eine schließende Analyse scheint notwendig. Da sich die paarigen Stichproben in ihren Größen erheblich unterscheiden, eignet sich von den bisher eingesetzten schließenden Verfahren nur der Wilcoxon-Test für eine Auswertung. Tatsächlich erreicht der Z-Wert mit minus 2,35 ein signifikantes Ergebnis bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von lediglich 1,9 Prozent. Zweite Folgezählzeiten werden also anders gespielt, wenn sie mit einem Tonhöhenfehler angeschlagen werden. Schiefe und Wölbung beider Verteilungen unterscheiden sich deutlich[331]. So zeigt die Streuung der zweiten Folgezählzeiten mit Tonhöhenfehlern keine Werte zwischen null und minus zehn Millisekunden Abweichung, während die Verteilung ohne Tonhöhenfehler hier annähernd normalverteilt besetzt ist. Tonhöhenfehler in zweiten Folgezählzeiten führen also lediglich zu einem uneinheitlicheren Verhalten, nicht zu einer Veränderung im lokalen Tempo.

---

[328] 16 von 120 im Auswertungsbereich: Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Allgemeine Beobachtungen\Fehlerzählung Tonhöhe.xls\Zählzeiten gesamt

[329] 13,01 zu 12,68ms Standardabweichung sowie 169,24 zu 160,91ms Varianz für zweite Zählzeiten ohne und mit Tonhöhenfehlern. Ebda. \Zweite Folgen Tonhöhenfehler

[330] 9,91 bei Tonhöhenfehlern in zweiten Folgen stärker als bei solchen ohne, dort 3,51. Experiment\Gesamtanalysen\Beschreibende Analysen\Allgemeine Beobachtungen\Wilcoxon Zweite ohne und mit Tonhöhenfehler.spo

[331] 0,205 ohne zu -0,545 mit Tonhöhenfehlern für die Schiefe, jeweils als Abweichung von der Normalverteilung.

Deshalb noch einmal zurück zur Hypothese C des Experiments: Sie entspringt der Frage 2 aus Kapitel 1.4.2., ob eine auditive Rückkopplungsschleife einem motorischen Programm lediglich zur qualitativen Fehlerprüfung dient, wenn eine erkennbare Entkopplung zwischen motorischer Handlung und auditiver Wirkung vorliegt. Kapitel 3.4.1. hat gezeigt, dass persönliche Merkmale darüber entscheiden können, wie unterdrückte Passagen gespielt werden. In signifikanter Weise dehnten Rechtshänder die drei Folgezählzeiten vier bis sechs mit Unterdrückungen[332], im Mittel um 3,55ms, während eher beidhändig Veranlagte diese drei Zählzeiten um durchschnittlich 3,77ms kürzten[333]. Die schließenden Verfahren bestätigten den augenscheinlichen Unterschied zwischen den Merkmalgruppen als statistisch erheblich.
Nicht einbezogen war in diese Rechnung das Verhalten bei der vorausgehenden Störstelle selbst. Dort ist das Spiel beider Gruppen mit einer Spanne von 18,11 bis 34,07 ausschließlich negativer Abweichungen unterschiedlich (siehe Abbildung 31).

	DF	Störstelle	Zählzeit 4	Zählzeit 5	Zählzeit 6	Bilanz
Rechtshänder	12	-25,37	-2,38	12,07	5,45	-10,23
'Beidhänder'	12	-34,07	-3,06	0,63	-2,57	-39,07
Rechtshänder	13	-21,53	-11,15	10,85	-2,83	-24,66
'Beidhänder'	13	-18,13	-4,83	-13,00	1,31	-34,65
Rechtshänder	14	-21,80	3,09	4,81	10,25	-3,65
'Beidhänder'	14	-18,11	-1,75	-1,30	-9,39	-30,55

Abb. 31: Arithmetische Mittel periodischer Mittelwertsabweichungen in Millisekunden unterschieden nach dem persönlichen Merkmal Händigkeit

Auffällig unterscheiden sich beide Merkmal-Gruppen in der Bilanz nach der dritten Folge. Die laut Blockvarianzanalyse und Wilcoxon-Test signifikante Unausgewogenheit zwischen beiden Gruppen in den Serien[334] wird hierdurch untermauert: ‚Beidhänder' reagieren auf die ausnahmslos in der Rechten positionierten Kette aus Störstelle und anschließenden Unterdrückungen ab der zweiten Folge mit einem markanten Verhalten: Haben sie analog zum allgemeinen Trend des Versuchs die Zählzeit der Störstelle vorzeitig beendet, bleibt die sonst stabile Dehnung der zweiten und dritten Zählzeit[335] bei ihnen plötzlich aus.

[332] In der Rechten nach vorausgehender 100er Störstelle in der Rechten.
[333] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Faktoren\Blockvarianzanalysen faktorisiert.xls\Zählzeit 4 bis 6 DF 12 bis 14
[334] vgl. Kapitel 3.4.1.
[335] In den dritten Folgen unterscheiden sich die Rechtshänder laut schließenden Verfahren in besonderem Maße von den tendenziell beidhändig veranlagten Teilnehmerinnen und Teilnehmern: siehe dazu Kapitel 3.4.1.

Dass bei den Rechtshändern am Ende auch eine – wenn auch schwache – negative Bilanz steht, entspricht dem allgemeinen Trend des Lerneffektes im Versuch: So verlagert sich die Bilanz nach der dritten Folgezählzeit während des Experiments von einem stark verschleppten Grundschlag bei den ersten Durchläufen hin zu einem ausgeglichenen bis schwach vorgezogenen (siehe Abbildung 29). Indes war jene Bilanz kumuliertes Ergebnis beider Merkmal-Gruppen ergänzt um die zweite unterdrückte Passage der Zählzeiten 29 bis 32.

Die entscheidende Beobachtung der Zahlen in Abbildung 31 heißt also: Rechtshänder ändern ihr erlerntes Verhalten nicht und spielen unabhängig von auditiver Rückmeldung wie gewohnt weiter, die vermeintlich mehrfach begabten ‚Beidhänder' zeigen hingegen größere Probleme, zumindest mit Blick auf die Aufgabe eines konstanten Tempos. Für Hypothese C bedeutet das: Es kann nicht nur von der Spielsituation sondern sogar von persönlichen Merkmalen abhängen, ob und wann die auditive Rückmeldung zur sensomotorischen Handlungsplanung im Klavierspiel entscheidend ist.

3.5.1. Schlussfolgerung

Bescheinigte die Studie von Finney aus dem Jahr 1997 Klavierspielern allgemein ein identisches Verhalten im Timing mit und ohne akustische Rückmeldung[336], liefert das hiesige Experiment aufgrund seiner anderen Anlage vielschichtigere Ergebnisse. Reine Rechtshänder reagieren in ihrer zeitlichen Sensomotorik anders auf Unterdrückungen als tendenziell beidhändig veranlagte Probanden. Ehe die bisherigen Ergebnisse zumindest Ansätze zu Erklärungen der Fragen nach einer kognitiven Organisation zeitlich hochpräzise ausgeführter Motorik bieten können, ist daher eine neue Frage aufgeworfen:

Unterliegt die Güte – annehmbar – mehrzahliger Referenzintervalle oder Innerer Taktgeber hemisphärischen Ausprägungen im motorischen oder auditorischen Kortex, in beiden Strukturen oder gar einem Areal, das Informationen aus beiden Regionen vergleicht? Zwar liefert ein Experiment von Altenmüller und Kollegen (2000) evidente Hinweise, dass musikalische Zeitwahrnehmung nicht eindeutig bestimmten Hemisphären des menschlichen Gehirns zuzuordnen ist[337]. Indes nahmen an der Läsionsstudie weit überwiegend[338] Probanden ohne musikalische oder instrumentelle Vorbildung teil.

---

[336] Finney 1997, S. 168. Indes wurde hier die gesamte Klaviatur unterdrückt.
[337] Altenmüller 2000, S. 69.
[338] 18 von 20. Ebda., S. 66.

Die beobachteten Effekte der hiesigen Studie sind zumindest ein Plädoyer für die Annahme, dass die auditive Wahrnehmung entkoppelter Motorik hoch geschulte Musiker sehr wohl zu einer hemisphärisch vorbehaltenen motorischen Handlung bewegt. Schon Kapitel 3.2.1.3. brachte durch die Untersuchung der Lage von Tonhöhenfehlern in linker und rechter Hand Hinweise darauf, dass die kognitiv motorischen Prozesse zur Gestaltung eines konstanten und fehlerfreien Vortrages in diesem Versuch unterschiedliche Strukturen für die rechte und linke Hand ansprechen.

Diese Beobachtungen bieten Anlass für einen MEG-gestützten Versuch, der das hiesige Konzept auf den Wechsel identischer Manipulationen zwischen Linker und Rechter anpasst und je eine Gruppe zweifelsfreier Rechts-, Links- und Beidhänder teilnehmen lässt. Hier zumindest bleibt offen, warum die Händigkeit darüber entscheiden sollte, ob und wie die Probanden einen dauerhaft verschobenen Grundschlag ignorieren oder nicht. Im Grunde ist diese Beobachtung aber ein weiteres, starkes Argument gegen einen einzelnen statischen Inneren Taktgeber oder ein einzelnes, erinnertes Referenzintervall.

Unstrittig in der Musikgeschichte und der Forschung zur musikalischen Psychomotorik ist das zeitlich sensomotorische Pendant zu metrischen Strukturen im Notenbild. Überhaupt ist Riemanns Begriff der Metrik eine strukturelle Beschreibung beobachteter Zeitdauern im Instrumentalspiel, nicht eine Theorie, die in die musikalische Praxis umgesetzt wurde. Anhand der Notenvorlage zu diesem Versuch wäre Anderes als ein klare vierteltaktige Metrik in den Zeitreihen eine große Überraschung gewesen. Dies zwang zur Entwicklung einer eigenen statistischen Methode: den periodischen Mittelwertsabweichungen als Basis für varianzanalytische Verfahren mit entfernten Block-Mittelwerten.

Die Annahme, ein einzelnes Referenzintervall könne mindestens vier unterschiedlich lange motorische Zeitdauern in steter Wiederkehr gegen eine Vielzahl und Verschiedenheit akustischer Nichtbestätigungen oder gar Widersprüche verteidigen, reorganisieren helfen und bei Wiederholung sogar verschiedene Lerneffekte fördern, führt das Modell ad absurdum. Es kommt hinzu, dass dieses System in den Durchläufen zwölf und 14 für im Mittel 1,5 Sekunden etwa bei Rechtshändern überhaupt keine akustische Rückmeldung zu motorischen Handlungen der Rechten für eine Beibehaltung des Grundschlages benötigte. Diese Zeitspanne übersteigt die in zahlreichen Studien beobachteten Zerfallszeiten wahrgenommener Reize im so genannten sensorischen Gedächtnis deutlich[339]. Selbst ein Modell multipler Referenzintervalle ist ohne eine kognitive (endogene) Komponente auf Basis der hiesigen Ergebnisse mehr als unwahrscheinlich.

Ein weiteres, kräftiges Argument für das Vorhandensein dieser inneren Instanzen und deren Verbindung zu äußeren Einflüssen bei der kognitiven Organisation und motorischen Produktion von Zeitstrukturen ist die Erwartungshaltung: So schwankten Probanden in dieser Studie auf hoch signifikantem Niveau um rund 8ms weniger in ihrer Motorik, wenn sie vorab über die Entkopplungen und Unterdrückungen informiert waren[340]. 100er Störstellen wurden in hoch signifikanter Weise stabiler gespielt, wenn Probanden über die manipulierte Klaviatur informiert waren. Ein auf reiner Wahrnehmung beruhendes Modell dürfte bei diesem Vorwissen hingegen keine stabilere Motorik liefern.

4. Diskussion

4.1. Theorien der Inneren Uhr

Theorien einer Inneren Uhr für das auditive Wahrnehmen und Verarbeiten zeitlicher Strukturen vermuteten zunächst einen Inneren Zeitgeber, der durch äußere Reize angestoßen fortan neuronal pulsiert. Schulze konnte dies 1978 in Versuchen mit drei unterschiedlichen Serien leerer Zeitintervalle deutlich machen, die von kurzen akustischen Inter-Stimulus-Intervallen (ISI) begrenzt waren[341]. Die zweite Serie der dort präsentierten Signalfolgen entspricht diesem Versuch, insofern konstant erwartete akustische Reize plötzlich später erklingen. Die dritte Serie ähnelt dem kurzfristig motorischen Verhalten der Probanden, die ihren verschobenen Anschlag nach einer Störstelle durch eine Kürzung auszugleichen versuchen. Bilanziert über vier Anschläge entspricht das Verhalten der Teilnehmer zu Beginn des Versuches jedoch Schulzes zweiter Reihe.
In seiner Studie erkannten die Probanden die dritte Serie in signifikanter Weise seltener als ungleichmäßig. Schulze folgerte, akustisch wahrgenommene Reize erzeugten im Gehirn eine fortlaufende, konstante Pulsation. Dies stand der landläufigen Forschungsmeinung über ein einziges, statisch im Lang- und oder Kurzzeitgedächtnis gespeichertes Intervall entgegen, das den Menschen Zeitdauern schätzen ließe[342].

---

[339] Vergleiche Kapitel 4.2.1.
[340] F mit einem Wert von 17,8095 weit über dem kritischen Wert zur oberen 1-Prozent-Schranke. Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Faktoren\Blockvarianzanalysen faktorisiert.xls\BVA gesamt quadriert. Dort Zelle J8. Der Wilcoxon-Test bestätigt das Ergebnis bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von nur 0,4 Prozent: Schließende Analysen\Faktoren\Wilcoxon Test\gesamt quadriert.spo
[341] Schulze 1978, S.180. Die Leerintervalle (300ms) wurden durch Signale von 10ms Dauer eingegrenzt. Ab dem dritten oder fünften Klick wurde das Pausenintervall um 10 oder ausschließlich 15ms verändert. Die Zeitreihen sahen wie folgt aus: 1) T T T +T +T +T oder 2) T T T +T T T sowie 3) T T T +T -T T.
[342] Allan und Kristofferson (1971) als Modell der Bewertung a posteriori, indes für visuelle Stimuli. Demnach steht das "Maß für die Fähigkeit von Probanden zur Unterscheidung unterschiedlicher Dauern kurzer Lichtsignale im direkt

Schulzes rein perzeptive Versuchsanlage klärte indes nicht, ob und wann eine Pulsation durch eine neue überschrieben werden könne.

Der hiesige Befund legt nahe, dass die Wahrnehmung einer Entkopplung von motorischer Ursache und auditiver Rückmeldung eine Innere Pulsation zeitversetzt neu aktivieren kann. Anders wäre nicht erklärbar, warum die Probanden ihren Grundschlag nach Störstellen nach hinten verschieben. Auch könnte nicht erklärt werden, warum tendenziell beidhändig veranlagte Probanden ihren Grundschlag nach einer 100er Störstelle grund fehlender akustischer Rückmeldung zur rechten Hand plötzlich um 30ms vorziehen, während Rechtshänder den Grundschlag annähernd halten. Schulzes Modell könnte dies nur begründen, wenn die Innere Pulsation streng hemisphärisch getrennt wäre oder bei Bedarf angehalten und neu ausgerichtet wird.

1997 nahmen Vos et al. dies zum Anlass, Schulzes Versuch abgewandelt nachzustellen, indem sie auch die Wirkung der Größe und Richtung des veränderten Tempos thematisierten: Nach eingangs konstanten ISI-Signalen von zufällig vier, zwei und einem Hertz erhöhten sowie reduzierten sie die Frequenz zufällig um null bis zehn Prozent. Die Teilnehmer erkannten die Veränderungen dabei in Abhängigkeit des Grundtempos und der Richtung: Bei schnellem Tempo (vier Hertz) wurden mehr Zunahmen als Abnahmen richtig erkannt, bei langsamem Tempo (ein Hertz) mehr Abnahmen. Bei mittlerem Tempo hielten sich korrekte Antworten die Waage. In beiden Richtungen stieg die Quote richtiger Antworten mit dem prozentualen Grad der Veränderung[343].

Dies veranlasste Vos, Schulzes Modell zu verallgemeinern, indem ihm das Moment Veränderung und Richtung hinzutritt. Bei der Schätzung veränderter Tempi könnte dies geschehen, indem Probanden eine Folge Innerer Pulsationen auslösten, die dem zu beurteilenden Tempo nahe kämen[344]. Wenn Schulze in seiner Studie auch bereits formulierte, dass der Innere Zeitgeber mit äußeren Reizen synchronisiert wird[345], so liegt der entscheidende Schritt der Studie von Vos nicht nur in der empirischen Bestätigung, sondern auch im Nachweis einer in Grad und Richtung quantitativen Abhängigkeit von außen.

---

proportionalen Verhältnis zur Differenz der Länge der Stimuli-Dauern." Allan 1971, S. 334. Das heißt, Probanden erkennen nach Allan nicht etwa ein folgendes Signal als ein längeres oder kürzeres genau in dem Moment, wenn es die Länge des vorigen über- oder unterschreitet. Vielmehr führt die Differenz beim nachträglichen Vergleich zu genaueren Schätzungen, wenn sie größer wird. Kristofferson entwickelte auf Basis seiner Erkenntnisse aus früheren Versuchen (Kristofferson 1967) 1977 ein Modell des Echtzeitvergleiches zwischen gespeichertem Referenzintervall und aktuellem Reiz: Kristofferson 1977, S. 114. Allerdings operierte er in zwei Experimenten mit Dauern zwischen 730 und 1200ms. Ebda., S. 109ff. Wenn beide Resultate unbeachtet der anderen Sinnespezifik oder erheblich größerer Dauern dennoch zur Interpretation der hiesigen Ergebnisse dienen, sollten sie auf die perzeptiven Belange beschränkt werden, da Allan und Kristofferson im Wesentlichen Versuche zur Wahrnehmung – nicht zur Handlung – durchführten.

[343] Vos 1997, S. 245.

[344] Ebda. S. 242, Spalte zwei oben.

[345] Schulze 1978, S. 180.

Rötter (2000) vermutet, dass eine Differenz „zwischen dem wahrgenommenen Intervall und einem gespeicherten, zuvor wahrgenommenen Intervall oder einem internen Standard[346]“ gebildet wird, um die Basis für eine neue Pulsation zu liefern. Wird diese These mit Ergebnissen von Sternberg (1982) verglichen, läge bei etwa 250ms eine untere Schranke für die Größe dieses Intervalls. In Sternbergs Versuchen verloren die Schätzungen von Probanden unterhalb von 250ms auffällig an Genauigkeit[347]. Er wählte jedoch ein minimales Zeitintervall von 125ms, das die Teilnehmer bereits zu 40 Prozent fehl einschätzten[348]. Sternberg kombinierte die Annahme einer Inneren Uhr mit dem Stimulus-Response-Modell: Die Uhr nehme das zeitliche Grundmaß an, das dem Hörer zuallererst vorgespielt werde. Zur Beurteilung eines absoluten Zeitmaßes müsse das Verhältnis zum ursprünglichen Zeitintervall bestimmt werden[349].

Die beobachteten Fehlerkorrelationen zwischen Beurteilung und Produktion der Zeitintervalle und eine ähnliche Fehlerrate in Produktion und Imitation von Zeitintervallen veranlasste Sternberg aber dazu, das Feedback-Modell für die Motorik zu verwerfen. Er kam zu dem Ergebnis, ein rein auditives und motorisches Zeitverständnis besäßen keinen direkten Bezug zueinander. Hingegen bediene sich die Imitation beider Grundlagen[350]. Dieses Modell findet einerseits Analogien in den Neurowissenschaften bei der Frage nach Organisationsformen zeitlich verschiedener Gedächtnisstrukturen[351].

Andererseits wird deutlich, dass der Diskurs über die Frage nach einem statischen, einem variablen oder mehreren Inneren Zeitgebern in Opposition zu einem oder mehreren wahrgenommenen Referenzintervallen im Grunde ein Diskurs über die Frage ist, welches System wann und wie regiert. Durch den Befund des so genannten Missing stimulus[352] und dem Nachweis koaktivierter Hirnareale im motorischen und auditorischen Kortex beim Klavierspiel (Bangert 2001) ist aber anzunehmen, dass auditive zeitliche Strukturen auch endogen in das sensorische Gedächtnis geladen werden können.

Klinke et al. (1968) stellten ihrem Versuch die Hypothese voran, dass regelmäßig wiederkehrende taktile Reize der Fingerkuppen als zeitliches Muster in einem spezifischen Bereich des Zentralen Nervensystems gespeichert werden. Gespeicherte und aktuelle externe Reize würden miteinander verglichen. Bei Gleichheit käme der

---

[346] Rötter 2000, S.112.
[347] Zunächst wurde jedem Probanden ein Signal von einer Sekunde Dauer vorgespielt.
[348] Sternberg 1982, S. 188 ff. Die Produktion der entsprechenden Zeitintervalle durch Taktschlagen mit dem Finger zeigte vergleichbare Abweichungen. Die Probanden waren ausschließlich Berufsmusiker.
[349] Ebda., S. 212.
[350] Ebda., S. 229.
[351] Die Vorstellung eines rein sensorischen Gedächtnisses als primäre Stufe, in das rein perzeptive Informationen geladen werden, die nach etwa 200ms Dauer unwiederbringlich zerfallen, steht der Vorstellung Sternbergs über eine Informationsschranke zu inneren, zeitlich dauerhafteren Strukturen nahe.

äußeren Information wenig Bedeutung zu. Entsprechend sei ihre Verarbeitung in höheren kortikalen Bereichen unterdrückt. Je unterschiedlicher beide Informationen aber wären, umso relevanter würden externe Stimuli für die Verarbeitung auf kortikaler Ebene werden[353]. Tatsächlich stellten Klinke und Kollegen nicht nur kortikale Antworten auf fehlende Reize – eine wiederum positive Spannung 60 bis 70ms nach der scheinbar imaginierten Präsentation sowie eine negative Doppelspitze[354] bei 110 bis 140ms – fest[355]. Vielmehr konnten sie sogar zeigen, dass ihre Probanden ob der Regelmäßigkeit eine Erwartungshaltung aufbauten, die durch Interpolation enttäuscht werden kann und eine erhöhte kortikale Aktivität nach sich zieht. Die Amplitude der kortikalen Antwort stehe dabei im direkten Verhältnis zum veränderten, von der Regel abweichenden Reiz[356].

Die Ergebnisse von Klinke lassen damit auf eine sensorisch-kognitive Rückkopplungsschleife schließen, die unter bestimmten zeitlichen Bedingungen der Inneren Verarbeitung hinzutritt oder nicht. Kapitel 4.2. und 4.6. erörtern daher die Frage, ob das sensorische oder das Kurzzeitgedächtnis jene Schnittstelle zwischen subjektiver und physikalischer Zeit sein können, an der entschieden wird, ob und wie eine fehlerhafte akustische Rückmeldung sich auf die anschließende Motorik auswirkt, wie in dieser Studie beobachtet.

Eine Studie von Keele aus dem Jahr 1985 widmet sich ohne bildgebenden Ansatz der Frage, ob Wahrnehmung und Motorik gemeinsame Mechanismen der Zeitsteuerung nutzen. Hoch geschulte Pianisten zeigten eine signifikant ähnliche Güte in ihrer motorischen Produktion und Schätzung gehörter Zeitintervalle. Die Genauigkeit einer Laiengruppe lag in beiden Aufgaben relevant niedriger. Keele folgerte, Wahrnehmung und Motorik besäßen zwar gemeinsame Strukturen der zeitlichen Steuerung, würden aber nur passiv interagieren. Insbesondere hinge die motorische Präzision nicht von der Beachtung perzeptiver Ereignisse ab[357]. Zumindest für Ausnahmesituationen (Störstellen) zeigt die hiesige Studie andere Ergebnisse.

Dieses Experiment mit Studentinnen und Studenten der Universität Halle-Wittenberg stützt die Annahme, dass eine Innere Uhr sich grund externer Rückmeldungen neu einstellen kann. Die in Hypothese A vermutete Verschiebung über den Grundschlag

---

[352] Klinke 1968, S. 121. Die Wellenformen evozierter Potenziale glichen bei Ausbleiben eines physikalischen Reizes dennoch jenen, die tatsächliche (periodische) Reize hervorriefen.
[353] Ebda., S. 119.
[354] Vergleich dazu die Verarbeitungsnegativität bei Näätänen 1985, Kapitel 4.2.1.
[355] Klinke 1968, S. 120.
[356] Ebda., S. 121.
[357] Keele 1985, S. 186f.

infolge kleinerer Störstellen trifft mit Ausnahme der 80er Störstellen[358] unter anderem Vorzeichen bilanziell auf alle Bereiche nach Störstellen zu[359]. Povel und Essens (1985) diskutieren bei ähnlichen Überlegungen eine Innere Uhr, die von Akzenten in der Musik angeregt Pulsationen aussendet[360], diese stets an neue Wahrnehmungen anpasst, wobei die Pulsfolgen unterteilt und miteinander kombiniert werden können. Überdies nehmen Povel und Essens an, dass nicht jedes rhythmische Muster eine Innere Uhr anregt. In diesem Fall könnten rhythmische Gruppierungen intern auch relational, also ohne Information absoluter Dauern, verarbeitet werden[361].

Das Modell von Povel und Essens geht also einen erheblichen Schritt weiter, indem dieselbe Folge wahrgenommener Reize von verschiedenen Uhren bemessen werden könnte[362]. Zudem entstehen Wahrscheinlichkeiten der Anregung Innerer Uhren. Dies wäre ein Ansatz, die rhetorische Frage aus Kapitel 3.5.1. erschöpfender zu beantworten, wie ein einzelnes, erinnertes Referenzintervall oder ein Innerer Taktgeber eine Vielzahl rhythmisch-metrischer Strukturen bereits einfacher Melodien im Vierteltakt erklären können soll. Gottschewski etwa konnte 1993 in einer Analyse von Welte-Mignon-Aufnahmen[363] des Klavierspiels von Carl Reinecke[364] zeigen, dass ein Tempo nicht als physikalisch durchgängige Geschwindigkeit zu verstehen ist, sondern als Abfolge von teils verschiedenen Zeitintervallen. So sieht er Reineckes Spiel durch eine mehrdimensionale Tempoarchitektur geprägt, die im Notenbild (und auch gehört) rhythmisch-metrischen Gruppen entspricht[365]. Expressive Timing-Elemente (Agogik) stünden demnach nicht in einfachen Zahlenverhältnissen zum Grundtempo[366].

Diese Gedanken greift die Theorie der Oszillierenden Systeme (Langner 2002) auf. Zwar haben Povel und Essens nicht propagiert, dass die verschiedenen Muster ihrer variablen Uhr parallel agieren würden. Indes auch nicht, dass die verschiedenen Ausprägungen (Muster) der Uhr einander ersatzlos ablösten. Demnach enthielte schon das Modell von

---

[358] Hier kumulativ nach der dritten Folge lediglich 2,88ms gegenüber 17,60ms für die 100er und -7,98ms nach 100er Störstellen der Durchläufe mit Unterdrückungen. Der Wilcoxon-Test sieht hoch signifikante Unterschiede zwischen den Paarungen. Dies gilt nicht für Paarungen dieser drei Größen mit anderen Störstellen.
[359] Mit Ausnahme der 100er Störstellen in unterdrückten Durchläufen.
[360] Povel 1985, S. 437.
[361] Ebda.
[362] Rötter 1996, S. 487.
[363] Um 1904 entstandenes Reproduktionsklavier der Firma Welte & Söhne mit elektropneumatischem Abspielverfahren (System Welte-Mignon). Im Gegensatz zu bis dato herkömmlichen mechanischen Reproduktionsinstrumenten zeichnete sich das Welte-Mignon-Klavier durch seine anschlagsgerechte Wiedergabe über direkt eingespielte Notenrollen (Künstlerrollen) aus.
[364] Mozarts Krönungskonzert KV 537.
[365] Gottschewski 1993, S.105.
[366] Es sei an dieser Stelle wieder erwähnt, dass den Probanden im hiesigen Versuch die Gestaltung eines konstanten Tempos aufgegeben war. Agogische Elemente sollten unterlassen werden. Hierdurch konnte die Auswertung anhand von prozentualen Abweichungen von einem mittleren Tempo dennoch vorgenommen werden. Ohnehin entspricht die Berechnung eines aktuellen Tempos für jede Zählzeit dem Grundansatz, das Tempo als eine Abfolge von Zeitintervallen zu betrachten.

Povel und Essens die Komponente der Erwartungshaltung: Kommende Sequenzen zeitlicher Folgen würden aufgrund gegenwärtig erkannter beurteilt, neue bei Bedarf gebildet.

An dieser Stelle kann überlegt werden, ob von einer Uhr zu sprechen ist, die die physikalische Einheit Sekunde als Basis trägt. Ebenso könnten zeitliche Intervalle innerhalb einer Toleranzgrenze in Muster subjektiv gleicher Zeitintervalle übertragen werden, weil nach Sternberg (1982) die Schätzung absoluter Dauern unterhalb von 250ms wesentlich ungenauer ist als die tatsächliche motorische Präzision nach Rasch (2000) im Instrumentalspiel oder bei motorischen Aufgaben zur Synchronisation bei Aschersleben (2000a). Auch messen einfache Modelle der Inneren Uhr oder erinnerter Referenzintervalle psychologischen Phänomenen wie der kontrollierten (selektiven) Aufmerksamkeit zu wenig Bedeutung bei[367]. Sie aber übe nach Zakay (1996) hohen Einfluss auf das motorische Timing-Verhalten aus[368].

Die Ergebnisse dieser Studie haben gezeigt, dass eine Innere Uhr zumindest angehalten oder eine neue ausgewählt werden können muss, weil akustische Reize das Tempo von Probanden beim Instrumentalspiel kurzfristig steigern und anschließend verringern lässt, wodurch die subjektive und objektive Zeit auf Dauer in einem ausreichend großen Missverhältnis stehen. Dieses Missverhältnis auditiv-sensomotorischer Kopplung ist mindestens ab 50ms gegeben. Alle Modelle der Inneren Uhr benötigen dabei einen kortikalen Ort oder eine Prozessstruktur oder Gedächtnisstufe, in der entschieden wird, dass eine ausreichend große auditiv-sensomotorische Entkopplung zu einer signifikant veränderten Motorik führt.

4.2. Exkurs: Modelle Zeitlicher Gedächtnisstrukturen

4.2.1. Sensorische Speicher

In einer Studie konnten Atkinson und Shiffrin 1968 zeigen, dass Lernmaterial vom Menschen abhängig von Dauer und Art der Darbietung erinnert wird[369]. Vor diesem Hintergrund postulierten sie ein modales Gedächtnismodell mit drei Stufen zeitlicher

[367] Zakay 1996, S. 149.
[368] Ebda., S. 146.
[369] Atkinson 1968, S. 187. Zum Beispiel wurde eine direkte Abhängigkeit der Erinnerungsleistung und der Länge einer Liste zu erinnernder und darauf auszusprechender Begriffe beobachtet.

Verarbeitung: einem sensorischen[370], dem Kurz-[371] und Langzeitgedächtnis[372]. Herzstück dieser Vorstellung einer zeitlichen Struktur unseres Gedächtnisses wäre ein Puffer, dessen Gebrauch und zeitliche Leistung umfassend vom Menschen beeinflusst werden könne[373]. Die Arbeit des Puffers entscheide, wie dauerhaft und umfangreich Informationen in das Langzeitgedächtnis übertragen werden können.

Inzwischen haben zahlreiche Studien belegt, dass Mehrspeichermodelle nicht streng im Gehirn lokalisiert sind[374]. Entsprechend sind die Inhalte des Gedächtnisses nicht in einer einzelnen Zelle oder Synapse gespeichert, sondern in Gruppen von Neuronen, die speziell für bestimmte Prozesse exzitatorisch (erregend) miteinander verbunden sind (Neuronale Netze)[375]. Die Prozesse des sensorischen, Kurzzeit- und Langzeitgedächtnisses repräsentieren nach heutiger Auffassung also verschiedene Aktivitätsstadien des Gesamtsystems Gedächtnis[376]. Die Neurowissenschaften beschreiben jedoch verschiedene Areale (Repräsentationsfelder) im Gehirn, die bei bestimmten, vom bewussten Gedächtnis gestützten Tätigkeiten des Menschen aktiv sind[377].

---

[370] Für den Gehörsinn echoisches für den Sehsinn ikonisches Gedächtnis. Die heutige Annahme einer maximalen Speicherdauer bewegt sich im Vergleich zur Literatur der siebziger Jahre nur noch im Millisekundenbereich. Man setzt die Zeitspanne der Echospannung etwa derer im visuellen ikonischen Gedächtnis gleich (250 bis 500 ms), wobei die Kapazität erinnerter Objekte / Prozesse mit vier bis fünf angesetzt wird.

[371] Atkinson 1971, S. 83. Schon hier wird vom Terminus eines Arbeitsgedächtnisses auf Ebene des Kurzzeitgedächtnisses gesprochen, allerdings ohne bidirektionalen Abgleich mit dem Langzeitgedächtnis.

[372] Atkinson 1968, S. 93.

[373] Ebda., S. 113.

[374] Vgl. dazu Vath 2001, S. 4.

[375] Schmidt 2000, S. 448.

[376] Dass Hirnläsionen die Leistung des Gedächtnisses unwiederbringlich schwächen können, geht nicht einzig auf die zerstörte physiologische Ausprägung zurück. Denn das Gehirn kann sich reorganisieren, indem es prüft, wie neue Regionen die Funktion übernehmen können. Interessant ist in diesem Zusammenhang die langjährige Diskussion der Linguistik über die etwaige Existenz des von Noam Chomsky postulierten Sprachorganes (zum Spracherwerb) in der linken Hemisphäre des menschlichen Gehirns, das als Teil eines genetischen Programms bei der Geburt in wesentlichen Teilen bereits angelegt sei. Zwar bildet das Planum supratemporale unterhalb der Fissura Sylvii den Assoziationskortex, der bei Rechtshändern auf der linken Gehirnhälfte das Wernicke-Gebiet bildet, das eine große Bedeutung für die Sprache besitzt (Brandt 1992, S. 62). Für rechtshemisphäre Sprachlateralisation bei manchen Linkshändern sowie spiegelbildliche Lateralisation bei Zwillingen (Schmidt 2000, S. 485) bietet Chomsky's Theorie aber keine plausible Erklärung. Die Gehirnforschung zeigt seit den 60er Jahren vielmehr auch für die Sprache Aktivitäten in unterschiedlichen Regionen des Gehirns. So scheinen beim Verstehen von Sprache für semantische und syntaktische Prozesse unterschiedliche neuronale Netze im frontotemporalen Kortex aktiv zu sein (Friederici 2003, S. 8.) Weitere Studien deuten an, dass mehrere Bereiche - auch in der rechten Gehirnhälfte - bei partiellem Ausfall und sogar Totalausfall neu an der Produktion von Sprache beteiligt werden können (Schmidt 2000, S. 485). Etwa beim Aufsehen erregenden Fall des englischen Jungen Alex. Mit einer Gehirnschädigung (Sturge-Weber-Syndrom) zur Welt gekommen, litt der Junge unter starken epileptischen Anfällen ausgehend von der linken Hirnhälfte. Seine Sprachfähigkeit war nicht entwickelt. Mit achteinhalb Jahren entfernte man Alex große Teile der linken Hirnhälfte. Im Zuge seiner Genesung erlernte er dennoch das Sprechen. Außerdem zeigte er darauf ein unvermutetes Maß motorischer Fähigkeiten in der rechten Hand. (Vargha-Khadem 1997, S. 159). Trotzdem zeigen Studien immer wieder, dass bestimmte Regionen des Gehirns für die Entwicklung der Sprache präferiert werden. So zeigte ein Versuch von Hahne (2004, S. 1302), dass „die neurophysiologische Basis für Prozesse während des Verständnisses gehörter Sätze sich von früher Kindheit zum Erwachsensein nicht dramatisch verändert."

[377] Daneben gibt es im unteren (subkortikalen), evolutionsgeschichtlich älteren Gehirn Bereiche, meist nicht bewusstseinstragende Gedächtnisstrukturen, die immer aktiviert sind, wie zum Beispiel die Formatio reticularis, das Limbische System und alle vegetativen Zentren. Evolutionsgeschichtlich ist das Gehirn bei Wirbeltieren aus dem vorderen Abschnitt des Rückenmarks hervorgegangen, besteht wie dieses aus Nervenfasern und -zellen und ist von Hirnhäuten und Schädelkapsel umschlossen. Es besteht aus fünf Teilen: Vorderhirn (Großhirn, Telencephalon, Cerebrum), dem Zwischenhirn (Diencephalon), dem Mittelhirn (Mesencephalon), Hinterhirn (Kleinhirn, Metencephalon, Cerebellum) und dem Nachhirn (Myelencephalon). Das Hinterhirn ist dabei Zentrum für Bewegung und Lage im Raum.

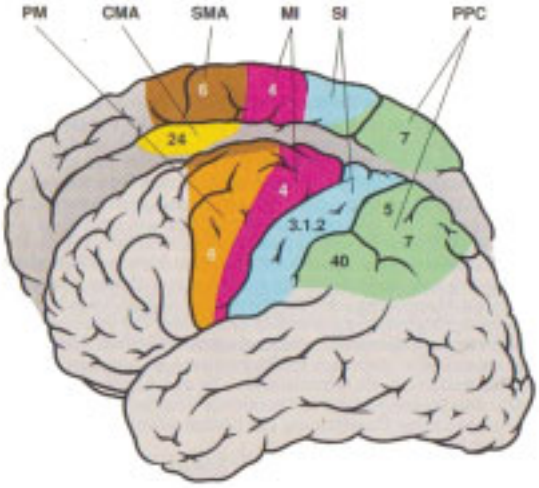


Abb. 32: Sensomotorische Repräsentationsfelder der menschlichen Hirnrinde linkshemisphär. Dabei (in der Tiefe) spiegelbildliche Darstellung der rechten Hälfte. Motorische Kortexgebiete sind der primär motorische Kortex (MI, Brodmann Area 4, Gyrus praecentralis), der prämotorische Kortex (PM, laterale Area 6), die supplementär-motorische Area (SMA, mediale Area 6) und die zinguläre motorische Area (CMA, Area 24). Kaudal (unterhalb) der Zentralfurche (Fissura rolandi, zwischen Area 4 und 1-3) liegen der primär somatosensorische Kortex (SI, Area 1, 2, 3) und der posterior-parietale Assoziationskortex (PPC). Schmidt 2000, S. 114.

Informationen im sensorischen Gedächtnis sind reiznah repräsentiert und daher durch ein nachfolgendes, ähnliches Ereignis leicht zu überdecken. Alle Reizinformationen der Sinnesorgane gelangen über afferente Nervenfasern in diesen Prozess des Gedächtnisses. Ihre Speicherdauer entspricht dem Aufbau von Hirnaktivitätsmustern in den spezifischen und unspezifischen sensorischen Repräsentationsfeldern auf der Großhirnrinde. Als elektrische Potenziale klingen sie ab, wenn sie nicht vorzeitig durch neue Reize überschrieben werden. In den Prozessen des sensorischen Gedächtnisses findet damit noch keine qualitative Umwandlung der Signale statt, wie etwa zuvor bei der galvanischen Transmission im Helicotrema[378].

Das sensorische Gedächtnis hat also keine stoffliche, elektrochemische, sondern eine elektrische Natur[379]. Die Repräsentation des Weltgeschehens geht hier verloren, wenn nachfolgende (tiefere) Gedächtnisstrukturen diese nicht stabilisieren, sprich weiterverarbeiten. Näätänen (1985) ging von der Annahme aus, dass jeder Stimulus

---

Hier sammeln sich Meldungen von Muskeln, Sehnen, Gelenken und Gleichgewichtsorganen, wie auch optische Eindrücke. Die Oberfläche (Kortex cerebi, Hirnrinde, kurz: Kortex) der Großhirnhälften (Hemisphären) besteht aus Stirn-, Schläfen-, Scheitel und Hinterhauptslappen. Diesen Arealen oder Rindenfeldern werden bestimmte Funktionen in der bewussten Sinnesverarbeitung zugesprochen (Abbildung 32), während dem Mittelhirn als Reflexzentrum für die Verarbeitung von Reizen des Hör- und Sehsinns keine bewusste Verarbeitung zugesprochen wird. Zwischen diesen beiden Teilen des menschlichen Gehirns liegt das Zwischenhirn, in dem der Thalamus als Schaltstelle zwischen Sinnesorganen und Großhirn arbeitet.

[378] Griechisch: Schneckenloch, gelegen an der Spitze der Cochlea, wo die Paukentreppe (Scala tympani) in die Vorhoftreppe (Scala vestibuli) übergeht.

[379] Schmidt 2000, S.441.

unabhängig von der Aufmerksamkeit einer Person eine kurzdauernde sensorische Spur (Attentional Trace) in Form eines kreisenden Stroms in den zugehörigen Repräsentationsfeldern der Hirnrinde erzeugt. Dies bedeutete eine völlig passive Ausstattung der sensorischen Gedächtnisstufe. Allerdings konnte Näätänen nachweisen, dass eine weitere elektrophysiologische Reaktion im entsprechenden Repräsentationsfeld der Hirnrinde unmittelbar folgt. Das vom externen Reiz erzeugte elektrisch evozierte Potenzial verringerte sich kurzzeitig. Näätänen nannte das Phänomen Verarbeitungsnegativität (Processing Negativity PN). „Die PN wird durch einen kortikalen Abgleichsprozess zwischen Sinnesreiz und Aufmerksamkeitsspur erzeugt.[380]“ Diese Negativität beginnt etwa 100ms nach dem physikalischen Reiz und hält so lange an, bis der Vergleich zwischen Zielrepräsentation und dem externen Objekt abgeschlossen ist[381].
Böttcher (1989) deutete diesen Amplitudenabfall als so genannte Selektive Aufmerksamkeit[382]. Hintergrund ist, dass Böttcher die Verarbeitungsnegativität nicht in jedem Fall beobachten konnte[383]. Vielmehr trete die kortikale Spannung insbesondere bei stark erhöhter Konzentration auf[384]. Sie versteht dieses Phänomen als gezielte Auswahl, als Ausdruck eines Tores oder Filters, der der eigentlichen bewussten Stimuluserkennung als Orientierungsgröße dient[385]. Demnach wird das Tor durch erste Stimuli-Größen justiert und spätere Signale verlieren hier an Spannung, falls ihre Größe nicht denen vorausgehender Stimuli entspricht.
Zusätzlich wurde in Untersuchungen zur visuellen Komponente des sensorischen Gedächtnisses (ikonisches Gedächtnis) bemerkt, dass nach Reizende eines 40ms währenden Lichtes dessen Speicherung im visuellen Kortex weiter verbleibt und über eine Dauer von zirka 260ms zerfällt[386]. Diese Phänomene konnten ebenso für die auditiven Kanäle des sensorischen Gedächtnisses nachgewiesen werden[387]. Das Schalladäquat existiert also länger als der tatsächliche Reiz und wird durch die Verarbeitungsnegativität kognitiv vorausgewertet. Interessant wirkt, dass die Verarbeitungsnegativität etwa 100ms nach Reizbeginn und damit für Sequenzen von Zeitdauern entsteht, deren Abweichungen von einer Isochronie wir beurteilen können (Nakajima 1991).

---

[380] Näätänen 1985, S. 366.
[381] Die PN konnte auch für sprachliche Laute (phonetische Stimuli) festgestellt werden. Piroth 2005, S. 82f.
[382] In rein perzeptiven ISI-Versuchen mussten die Teilnehmer bei Böttcher 1989 Stimuli unterschiedlicher Tonhöhe (± ein bis drei Hertz) differenzieren. Bei Identifizierung konnte Böttcher 100ms nach Eintritt des Zielreizes die Verarbeitungsnegativität im auditorischen Kortex entdecken. Die elektrische Aktivität der Hörregion fiel 100ms nach physikalischem Reizbeginn um etwa 3µV ab. Darauf folgte eine positive Welle. Böttcher 1989, S. 31.
[383] Ebda., S 77.
[384] Böttcher wies ihren Probanden parallel zur Aufgaben das Lesen belletristischer Texte zu.
[385] Ebda., S. 78.
[386] Massaro 1996, S. 72.

4.3. Time shrinking: Phänomen zeitlicher Erwartungshaltungen?

Wie in Kapitel 1.3.1. angedeutet wiesen Nakajima et al. 1991 Unterschätzungen von kurzen ISI-Signalen[388] nach, sofern diesen kürzere vorausgingen. Die Forscher nannten das Phänomen Time shrinking[389]. Bemerkenswert war zudem, dass Probanden das Intervall nicht unterschätzten, wenn ihm ein anderes – gleich welcher Größe – nachfolgte[390]. Erst als das vorausgehende Intervall eine Dauer von 120ms überschritt, nahm die Unterschätzung der Probanden wieder ab[391]. Daraus schloss Nakajima, die Vorausmarkierung (vorausgehende Stimuli, vergleiche Böttcher 1989) verhindere bei kleinsten Dauern das Schätzen absoluter Längen, bis beide Intervalle ein ganzzahliges Vielfaches erreichten.

Sasaki, Nakajima und Kollegen präzisierten die gefundenen Werte 1998 in einem vergleichbaren Versuch. Unterschätzungen, so Sasaki, nähmen ein Höchstmaß an, wenn das nachfolgende, zu schätzende Intervall 80ms länger sei. Oberhalb von 100ms sowie unterhalb von 60ms Differenz verschwinde der Effekt rapide[392]. Ausdrücklich wies Sasaki darauf hin, dass die absoluten Dauern hier nicht von Bedeutung seien, sondern ihre Differenzen.

Dies ist für diese Studie bedeutend, weil Probanden hier auf den ersten Blick ein scheinbar gegenteiliges Verhalten zeigten: Entstand ein zusätzlicher Unterschied von 80ms zwischen einem Tastenanschlag und dem erwarteten Klang, so korrigierten Probanden ihre unmittelbar resultierende Tempoerhöhung bilanziell nach der dritten Folgezählzeit am erfolgreichsten[393]. Betrug die Differenz hingegen 50, 100 oder 120ms, so verschoben sie ihren Grundschlag um bis zu plus 17,60ms[394]. Der Schluss liegt nahe, dass eine Entkopplung von 80ms der Erwartungshaltung (Vorausmarkierung) der Teilnehmer wie im Experiment von Nakajima am stärksten widersprach und sie zu einer – etwa von den Passagen nach 100er Störstellen hoch signifikant verschiedenen – motorischen Korrektur bewog.

Nun könnte das erste Argument gegen die Zulässigkeit eines Vergleichs beider Experimente lauten, bei Sasaki seien zwei serielle Leer-Intervalle zu vergleichen gewesen und die Entkopplung in dieser Studie liefere nur ein einziges Leer-Intervall, die Dauer der

---

[387] Ebda. S. 73ff.
[388] Nakajima 1991, S. 433: 60, 120, 240, 480 und 720ms.
[389] Zunächst Time illusion.
[390] Ebda., S. 431.
[391] Zeitschätzung 60ms bei Zeitdauer 100ms.
[392] Sasaki 1998, S. 206.
[393] Lediglich 2,88ms Abweichung.
[394] 10,89ms bei 120er, 17,60ms bei 100er und 14,52ms bei 50er Störstellen.

Störstelle. Indes ist beiden Versuchen gemein, dass den Probanden zum Zeitpunkt des endogenen Vergleichs mindestens zwei mentale Entsprechungen zur Verfügung gestanden haben müssen[395]: Formuliert im Rahmen der diese Studie begleitenden zwei Theorien könnte die eine mentale Entsprechung (Vorausmarkierung, Böttcher 1989) in Sasakis Versuch ein erinnertes Intervall oder eine entsprechend ausgelöste Pulsation sein, die gegen die (um 80ms längere) Dauer des neuen, akustischen Reizes geprüft wird. In der hiesigen Studie wäre dies ein erinnertes Intervall über die Dauer des oder der letzten Töne oder eine dadurch ausgelöste Pulsation, die gegen die (80ms längere) Dauer bis zum Erklingen des neuen Tones geprüft wird. Um mögliche Gründe zu finden, warum einerseits der Wert von 80ms eine besondere Rolle spielt und andererseits die Probanden nicht wie bei einem klassischen Schwellenwert ein beiderseits verschiedenes, sondern hier – wie auch bei Sasaki – ein beiderseits vergleichbares Verhalten zeigen, werden in den folgenden Kapiteln drei Theorien vorgestellt, die damit im Zusammenhang stehen könnten: die der Erschöpfenden Suchprozesse (Sternberg 1966, Ratcliff 1978), der Negativen Asynchronie (Aschersleben 2000) sowie der Sensomotorischen Integration (Bangert 2001).

4.4. Erschöpfende Suchprozesse

Laut Sternberg (1966) werden erschöpfende Suchprozesse im menschlichen Kurzzeitgedächtnis in Schritten von etwa 33 bis 40ms vollzogen (Sternberg-Paradigma)[396]. Ratcliff untersuchte 1978 in Anlehnung an das Paradigma die Fähigkeiten von Probanden zur Wiedererkennung von Reizen, indem die erkannte Gleichheit entweder zu bejahen oder verneinen war. Der Vergleich dauerte für die Verneinung stets länger. Ratcliff erklärte diese Beobachtung mit einem Modell des Random walk beim Gedächtnisabruf: Aktuell eintreffende Reize werden mit zuvor gespeicherten Reizen verglichen. Erst wenn alle Vergleiche keine Übereinstimmung bringen, könne eine Übereinstimmung verneint werden[397]. Ein positiver Abgleich kann derart nie langsamer erfolgen als der negative. Auch Atkinson (1968) postulierte Suchprozesse in seinem Multi-Speicher-Modell des

[395] Dass dieser Vergleich im Versuch von Sasaki stattgefunden hat, ist ob der dortigen Aufgabe für Probanden schon unstrittig. Dass ein Vergleich in der hiesigen Studie stattgefunden haben muss, ist daran abzulesen, dass die Probanden die Zählzeit einer Störstelle über alle Durchläufe und Störstellen gerechnet in nicht zufälliger Weise vorzeitig beendeten.
[396] Sternberg 1966, S. 652.
[397] Ratcliff 1978, S. 63.

menschlichen Gedächtnisses als grundlegende Komponente. So nimmt er an, dass Suchprozesse sogar bei rein perzeptiven Leistungen der Wahrnehmung wirksam seien[398]. Geschulte Instrumentalisten haben ihre motorischen Schwankungen an die Grenze ihrer zeitlichen Verarbeitung von Wahrnehmungen geführt. So errechnet Rasch (1988) aus seinen Ergebnissen eine Grenze von 34,1ms als Höchstmaß motorischer Präzision im Zusammenspiel[399], etwa jene Grenze, die von Sternberg und Ratcliff als untere Dauer erschöpfender Suchprozesse ermittelt wurde. Bis zur Marke von 34,1ms sank bei Rasch die motorische Präzision mit der Anzahl der Spieler im Orchester. Darunter ließ sich der Wert auch nicht mit weiteren Instrumentalisten senken. Für musikalisch sensomotorische Handlungen, die zusätzlich den intramodalen Abgleich von Gehör zu Gehör zwischen den Mitgliedern eines Ensembles erfordern, kann dieser Wert als untere Schranke angenommen werden.

Im Solovortrag ist der zusätzlich intramodale Vergleich zwischen Instrumentalisten nicht wirksam. Der Solist gleicht einzig zwischen den eigenen Sinnen ab. Hierdurch entstehen wichtige Fragen: Setzen im Solovortrag überhaupt erschöpfende Suchprozesse ein? Ist dies bei Störstellen so? Wenn ja, wann setzt der Prozess ein? Im Experiment bei Sternberg (sowie Ratcliff) ist dies unstrittig immer der Moment, in dem ein Objekt präsentiert wird. Von da an benötigen die Probanden im Mittel 33 bis 40ms Zeit, ehe sie verneinen können, das Objekt zuvor gesehen zu haben.

Das hiesige Experiment unterscheidet sich in mehrfacher Hinsicht von Sternbergs und Ratcliffs Versuchen: Zum einen unterliegt das Klavierspiel dem Prinzip von Ursache und Wirkung. Sternbergs Ansatz indes ist ein rein perzeptiver. Schon daher lassen sich die Ergebnisse schwer übertragen, weil der Erwartungshaltung (etwaige Markierung von Pulsationen oder Referenzintervallen) hier eine große Bedeutung zukommen könnte. Zudem spielt die Zeit in zweierlei Hinsicht die dominante Rolle. Auf den Versuch von Sternberg übertragen müssten dort die Bilder für eine gewisse Dauer – deren Bekanntheit ebenso beim Gedächtnisabruf zu prüfen wäre – präsentiert werden. Die Suche würde dann frühestens mit Ende der Darbietung beginnen.

Weiterhin liegt im hiesigen Experiment der Sonderfall gekoppelter Reize vor. Dies ist entscheidend für die Situation bei Störstellen: Unklar ist, ob derselbe Suchprozess motorische Handlung wie akustische Rückmeldung gegen die erinnerten Informationen oder Taktungen prüft oder ob es getrennte Prozesse sind. Ist es ein einzelner Prozess, könnte er beim Eintreffen des resultierend afferent taktilen – ohne einhergehend afferent

[398] Atkinson 1968, S. 187.
[399] Rasch 1988, S. 87.

auditiven – Reizes nicht ersatzlos beendet werden. Es sei denn, die motorische Reaktion in der gestörten Zählzeit selbst ginge auf einen subkortikalen, vom bewussten Handeln isolierten Motor-Befehl – also einen Reflex – zurück.

Dieser müsste bereits bei den ersten Störstellen zu finden sein. Das ist aber nicht der Fall. Vielmehr zeigen die Befunde, dass hier eine bewusste Anpassung stattfindet, um den Grundschlag halten zu können. Zudem wäre eine „Reflexantwort ... in Latenz, Stärke und Muster eng an die Intensität der Sensorreaktion gekoppelt[400]." Die Kürzung der Störstelle ist aber nicht proportional abhängig von deren Größe. Überdies findet die Kürzung zu einem Zeitpunkt statt, an dem je nach Grundtempo der Probanden im Mittel schon rund 477ms in Form einer ganzen Zählzeit vergangen sind. Es ist also alles andere als eine rasche Reaktion.

Sind es völlig getrennte Suchprozesse für die motorische und die auditive Ebene, ist zu fragen, warum zwei Zählzeiten – gemittelt rund 954ms – nach der akustischen Entkopplung eine motorische Schwankung entstehen kann, die sich signifikant von allen ungestörten Zählzeiten unterscheidet, die zudem zwar qualitativ wahrgenommen, aber im Lauf des Versuchs nicht auf den Erwartungswert reduziert wird? Vielmehr lösen die Probanden diese Schwierigkeit, indem sie die Zählzeit der Störstelle selbst kürzen. Eine separate auditive Einheit müsste der Motorik also unmittelbar den qualitativen Hinweis über den verspäteten Beginn des Tones liefern können, wodurch ein vorausschauendes Korrekturverhalten ausgelöst wird.

Auch unterschieden sich die Dauern der 100er Störstellen aus den Durchläufen mit Unterdrückungen in hoch signifikantem Maße von allen übrigen Störstellen. Daraus folgt, dass ein vermeintlich unerwartetes Wieder-Auftreten einer akustischen Rückmeldung beim auditiven Gedächtnisabruf eine Information an das motorische System geben können muss, worauf dieses plötzlich mit extremer Kürzung (-15,72ms) reagiert.

Bleibt der Ton im gleichen Durchlauf aus, muss die Information in nicht zufälligem Maße eine leichte Tempoverringerung begünstigen. Überdies hätte der auditive Gedächtnisabruf wie zum Ende des Analyseteils angedeutet hemisphärische Unterschiede zu berücksichtigen, da Rechtshänder anders reagierten als eher beidhändig Veranlagte. Ein auditiver Gedächtnisabruf, der eng mit dem Konzept der Rückkopplungsschleife verbunden ist, müsste dem motorischen System also eine Vielzahl von Auskünften – nach denen er selbst nicht primär sucht – erteilen.

Auch wäre eine dritte Variante über die Organisation von Suchprozessen im Kurzzeitgedächtnis denkbar, sofern eine Kontrolle auditiv-sensomotorischer Kopplung im

Solovortrag wirksam ist. Demnach könnte ein einzelner, gekoppelter Prozess vorliegen. Afferente Reize der Sensomotorik dienen dabei als vorherrschende Kontrollgröße im Kurzzeitgedächtnis[401]: Der motorische Kortex erwartet auf einen efferenten Befehl eine taktile Rückmeldung innerhalb eines zeitlichen Erwartungshorizontes mit der Dauer maximal eines erschöpfenden Suchprozesses. Zeitgleich (Kopplung) veranlasst der motorische Kortex den auditiven Kortex, ein Signal in das echoische Gedächtnis zu laden (Audiation), das der ebenfalls erwarteten (gekoppelten) akustischen Rückmeldung entspricht (siehe Missing stimulus). Trifft nun das afferente taktile Signal innerhalb der Zeit eines erschöpfenden Suchprozesses ein, kann der Vorgang als erfolgreiche Erfüllung der Erwartungshaltung nach höchstens 40ms ab Motor-Befehl beendet werden.

Liegt nun eine Störstelle vor, tritt ein externer Reiz in das sensorische Gedächtnis, der dem per Audiation erzeugten folgt, obgleich der ursächliche Befehl des motorischen Kortex fehlt. Das ließe erklären, warum Probanden in dieser Studie bereits ab einer Entkopplung von 50ms einen um rund 30ms verschleppten Grundschlag zeigten – sofern die Kontrolle komplexer motorischer Bewegungen ein dauernder Prozess ist, der beim Klavierspiel neben dem Anschlag einer Taste und seinem Ende auch den fortdauernden Tastendruck prüft: Denn bei einer Entkopplung von 80ms fällt die vermeintlich unzugehörige akustische Rückmeldung mit dem zeitlichen Ende des zweiten erschöpfenden Suchprozesses zusammen, der nach dem im ersten Suchprozess erfolgreich bestätigten Handlungsbeginn Tastenanschlag die nun fortwährende Motorik (fortgesetzter Tastendruck) kontrolliert. Eben diese Kontrolle festigt die Annahme, es könne kein neuer Ton einsetzen. Zudem ist per Audiation im sensorischen Gedächtnis bislang unwidersprochen ein zugehöriges, zerfallendes Signal präsent.

Umso stärker muss der mit der Audiation gekoppelte motorische Kortex sensibilisiert sein, wenn bei der zweiten erfolgreichen Rückmeldung auf den Motorplan zeitgleich ein Widerspruch ins echoische Gedächtnis eintritt: der um 80ms verzögerte Klang. Jedoch kann mit dem Modell erschöpfender Suchprozesse allein nicht erklärt werden, warum etwa Störstellen von 120ms Dauer – also nach Ablauf von drei seriellen Suchprozessen – bilanziell nicht einmal annähernd vergleichbar erfolgreiche Korrekturen in den

---

[400] Schmidt 2000, S. 125.

[401] Während das sensorische Gedächtnis mehr Außenreize aufnimmt, als wir uns merken können, versucht das Kurzzeitgedächtnis als nächste zeitliche Erinnerungsstufe einen Teil davon zu stabilisieren. Die am Kurzzeitgedächtnis beteiligten Nervenzellen verändern ihre Membranstruktur, wenn sie Informationen festigen und entsenden dabei im höheren Maße Neurotransmitter. Schmidt 2000, S. 441. Das Kurzzeitgedächtnis vereint also elektrische und elektrochemische Ebenen, wobei bereits verschiedene Nervenzellverbände – etwa bei Vorgängen der Assoziation – aktiviert werden. Es ist also jene Stufe des Gedächtnisses, das wesentlich zur Koaktivierung sensomotorischer und auditiver Bereiche beiträgt. Finney konnte 2003 in einer Studie nachweisen, dass akustische Rückmeldung beim Klavierspiel die spätere Erinnerung der Notenpassage signifikant verbessert (Finney 2003, S. 55), indem die Probanden

Folgezählzeiten nach sich ziehen, wie 80er Störstellen. Es sei denn, die rund 100ms nach dem Reiz auftretende Verarbeitungsnegativität (Näätänen 1985, Böttcher 1989) beeinflusste oder überlagerte einen dritten seriellen Suchprozess entscheidend.

4.5. Der Befund der Negativen Asynchronie

Sollen Probanden ein regelmäßiges, akustisches Signal motorisch synchron begleiten, kommt es in signifikantem Maße zur so genannten Negativen Asynchronie[402]: Die Teilnehmer eilen dem Signal um 30 bis 80ms voraus und empfinden ihre Handlung dennoch als zeitgleich. Dass die Negative Asynchronie kein Messartefakt ist, konnten Vos und Kollegen (1992) demonstrieren[403]. Sie schalteten vom externen Signal auf einen Klick um, der vom Klopfen der Probanden selbst ausging. Zusätzlich verzögerten sie den Ton zufällig um null bis 80ms ab Tastendruck auf dem Keyboard.
Schon 1894 hatte Meumann zeigen können, wie Personen für eine kurze Zeit den Grundschlag verlieren, wenn ein externes Signal (Hammerschlag) abgeschaltet wurde[404]. Bei Vos und Kollegen beschleunigten die Probanden ihr Tempo, nachdem ihre eigene Motorik zur Ursache des Signals wurde und die Verzögerung weniger als 20ms betrug. Hingegen reduzierten sie ihr Tempo, wenn die Entkopplungen darüber lagen[405]. Die Schwelle von 20ms beschreiben Vos et al. als Umschlagpunkt. Zudem sinkt das Tempo oberhalb von 20ms Entkopplung annähernd linear mit der Entkopplungsgröße, indes ist bei Werten von 80ms ein überproportionaler Anstieg zu erkennen. Meumanns Ergebnis kann so gedeutet werden, dass die Teilnehmer auf einen Internen Zeitgeber umschalten – die Zunahme des Tempos bei Vos et al. als Bemühung, die Negative Asynchronie wiederzuerlangen, weil sie die tatsächliche Gleichzeitigkeit nicht als solche empfinden.
Die Negative Asynchronie wurde durch die Theorien der Nervenleitungshypothese und der Schwellenwerthypothese gedeutet. „Nach der so genannten Nervenleitungshypothese (auch als Paillard-Fraisse-Hypothese bezeichnet) sind Unterschiede in den Nervenleitungszeiten zwischen Ton und Tastendruck und ihren zentralen Repräsentationen für den Synchronisationsfehler verantwortlich[406].“ Demnach werden

---

dann weniger falsche Tasten anschlugen. Hingegen wirkte sich die Akustik nicht verändernd aus, wenn sie beim Spiel aus dem Gedächtnis unterdrückt wurde (Ebda., S. 60).
[402] Aschersleben 2000, S. 139.
[403] Vos 1992, S. 41.
[404] Meumann 1894, S. 315f. Zudem konnte Meumann belegen, dass die Teilnehmer den ursprünglichen Grundschlag nach einiger Zeit wiederfanden.
[405] Vos 1992, S. 40.
[406] Aschersleben 2000, S. 142.

Reize der mechanischen Sensoren[407] der Fingerkuppen über die afferenten Nervenfasern bis zum motorischen Kortex mit anderer (langsamerer) Dauer geleitet[408] als bei der Übertragung der Klicksignale über die Physiologie unseres Ohrs bis zum auditorischen Kortex. Nach Fraisse (1980) wird eine Synchronität akustischer Ereignisse vom Menschen nur wahrgenommen, wenn die Reize weniger als 60ms auseinander liegen[409]. Den zu synchronisierenden akustischen Reizen würden Probanden aufgrund der Nervenleitungszeiten von den Händen bis zur kortikalen Repräsentation demnach um 30ms und mehr vorauseilen[410].

Indes zeigen Untersuchungen von Büttner (1996) und Claus (1987) kortikale Aktivierungsmuster in zugehörigen Repräsentationsfeldern der Hirnrinde, die unabhängig von der Sinnesmodalität (taktiler oder akustischer Reiz) nach rund 30 bis 33ms entstehen[411]. Demnach wäre die Dauer vom Reiz bis zur Reizrepräsentation für Tastsinn und Gehör grundsätzlich gleich. Zwar beschreibt Aschersleben mehrere Versuche, die um 45ms größere Asynchronien bei Tapping-Aufgaben mit dem Fuß als mit der Hand ermitteln. Dies ist aber vielmehr ein Nachweis dafür, dass Nervenleitungszeiten am Effekt der Negativen Asynchronie beteiligt sein können, sofern ein Reiz einer anderen Sinnesmodalität zu synchronisieren ist. So konnte Fischer 2004 durch Messwiederholungen zeigen, dass Probanden ihre Negative Asynchronie in wenigen Minuten signifikant durch Lernen verringern können und sich Vorwissen zudem reduzierend auswirkt. Fischer deutet die Ergebnisse so, dass die Negative Asynchronie eine ursprüngliche, möglicherweise phylogenetisch alte Verhaltensprozedur sei, „die von Musikern zur Berufsausübung überlernt werden muss[412].“

Zudem ist die Negative Asynchronie auch aus der Sprachforschung bekannt. Probanden intonieren ihre Stimme um bis zu 80ms vorzeitig, wenn sie die Zahlen eins bis zehn synchron zu einem Taktel sprechen sollen[413]. Würde ausschließlich die

---

[407] Schmidt 2000, S. 205: "Empfindungen haben ihren Ausgangspunkt in Erregungen der Sensoren unserer Sinnesorgane (Sinnessysteme) durch physikochemische Reize. Diese (Sensoren) vermitteln ihre Erregung an (afferente) Nervenfasern, die natürlich keine qualitativen Merkmale übertragen, sondern nur Aktionspotenzialfolgen." Afferente Nervenfasern liefern ihre Aktionspotenzialfolgen (elektrochemische Spannungsunterschiede) über zugehörige Nervenbahnen des Zentralen Nervensystems an zugehörige Neuronengruppen (Verbände von Nervenzellen), die zur Vermittlung der bestimmten Sinneseindrücke zuständig sind.

[408] Aschersleben 2000, S. 142 sowie 144.

[409] Fraisse 1980, S. 252.

[410] Ebda., S. 232.

[411] Claus 1987, S. 115: zwischen 32,8 und 33,2ms für schmerzfrei taktile Reize der Fingerkuppen. Büttner wies akustisch evozierte Potenziale rund 30ms nach Präsentation des Reizes im auditorischen Kortex nach. Büttner 1996, S. 470. Büttner errechnet zudem die anteiligen Laufzeiten in der Verarbeitung des Signals: Bei einer Länge des Hörnervs von im Mittel 25mm und einer Leitungsgeschwindigkeit von 18m pro Sekunde sowie einer synaptischen Umschaltzeit von 0,7ms vergehen rund 2ms, während das Signal vom Beginn des Hörnervs über die ventrale Hörbahn die Cochlea verlässt. Etwa fünf weitere Millisekunden vergehen, während das Signal medial und lateral zu den Olivenkernen gelangt. Von da an verstreicht die restliche Zeit bis zum auditiv kortikalen Ereignis nach etwa 30ms. Ebda., S. 427.

[412] Fischer 2004, S. 3.

[413] Kopiez 2005, S. 135.

Leitungshypothese über die Größe der Vorverlagerung entscheiden, müsste der Wert für die Stimme wesentlich geringer sein als die Asynchronie beim Klopfen mit Fuß oder Hand. Dies ist aber nicht der Fall. Eines aber haben die Versuche von Aschersleben zweifelsfrei gezeigt: Dass immer die größte Übertragungszeit von Reizen in einer Sinnesmodalität über deren anteilige Summe an der Negativen Asynchronie entscheidet. „Die Zunahme der Negativen Asynchronie ... ist unabhängig davon, ob die Taste mit rechts oder links gedrückt wird oder ob gleichzeitig ein zweiter Effektor die Bewegung ausführt (beide Hände oder Hand und Fuß)[414].“

Dieses Phänomen kann im vorliegenden Fall (Hand und Fuß) ebenso mit der Schwellenwerttheorie begründet werden. Sie berücksichtigt die Intensität der Reize, um Differenzen zu erklären. Demnach hinge die Zeit, in der eine neuronale Repräsentation des Reizes aufgebaut wird, von der Dichte der afferenten Signale ab[415]. Diese sei bei akustischen Führungssignalen höher als bei taktilen. Entsprechend würde die auditive Repräsentation schneller aufgebaut als die sensomotorische. Indes lassen auch hier die Studien von Büttner (1996) und Claus (1987) fragen, warum Reize beider Sinnesmodalitäten gleichermaßen nach 30 bis 33ms neuronal repräsentiert sind, wenn sich die Dichten ihrer afferenten Aktionspotenzialfolgen so erheblich unterscheiden, und zwar in einer Größenordnung, die Probanden ihre Motorik zur Synchronisation um bis zu 100ms vorauseilen lässt[416]?

„Die ... Schwellenwert-Hypothese (Gehrke 1996) macht ... Prozesse auf zentraler Ebene für den Effekt verantwortlich.[417]“ Sie liefert plausible Erklärungen für Asynchronien innerhalb einer Sinnesmodalität. So haben mikroneurographische Untersuchungen gezeigt, wie besonders verlustfrei etwa die Haut der Fingerspitzen Reize zeitlich in das Zentrale Nervensystem übermittelt. Die Zweipunktschwelle – oder auch simultane Raumschwelle genannt – beträgt an den Kuppen nur 1mm[418]. Dort weiter als einen Millimeter voneinander entfernte Reize können also unterschieden werden. Auch die zeitliche Wahrnehmungsfähigkeit sensorischer Ereignisse ist hier besonders hoch. Im Bereich des Rückens beträgt die Zweipunktschwelle hingegen mehrere Zentimeter. Mit einer simultanen Raumschwelle von 10mm[419] sind Zehen- deutlich unempfindlicher als Fingerkuppen. Das lässt die von Aschersleben et al. gefundenen, zwischen Fuß und Hand verschiedenen Asynchronien anteilig erklären.

---

[414] Aschersleben 2000, S. 144.
[415] Ebda., S. 145.
[416] Ebda., S. 139.
[417] Ebda., S. 142.
[418] Schmidt 2000, S. 235.
[419] Ebda., S. 236.

Müller (2000b) konnte Nullasynchronien bei ausschließlich taktiler Aufgabenstellung ermitteln[420]. Die Versuche waren MEG-gestützt und zeigten sinnesspezifische Aktivierungen in unterschiedlichen kortikalen Feldern. Müller folgert, jedes vergleiche die sensorischen Rückmeldungen selbst mit der ausgeführten Motorik. Da innerhalb eines Sinnes (taktile Aufgabe) aber kein Transfer nötig sei, verringere sich die Asynchronie auf Null. Damit läge die Vermutung nahe, dass die beteiligten Bereiche der Hirnrinde eine Art Vermittlungsfunktion übernähmen.

Dieses Ergebnis von Müller ist wohl das stärkste Argument für eine kortikale Integration von Reizen verschiedener Sinnesmodalitäten als wesentlichem Grund der Negativen Asynchronie. Eigentlich deuten schon einige Ergebnisse von Aschersleben dies an: Wie bei Fischer (2004) sinkt die Negative Asynchronie dort durch Training erheblich ab[421]. Einige Profimusiker zeigten bei Aschersleben Nullasynchronien. Es ist jedoch zweifelhaft, ob die Physiologie afferenter Nerven in diesem Maß trainierbar ist. Zudem besitzen dicke markhaltige afferente Fasern (Aβ- oder II-Afferenzen) der Hautnerven – wie jene von den Mechanosensoren der Fingerkuppen und Fußspitzen kommend – eine Leitungsgeschwindigkeit je nach Durchmesser von 40 bis zu 85 Metern pro Sekunde[422].

Eine ausschließlich oder überwiegend auf Nervenleitungszeiten beruhende Negative Asynchronie von bis zu 100ms würde demnach Entfernungen zwischen den Mechanosensoren und dem Somatosensorischen Kortex von vier bis zu 8,5 Metern erfordern. Die von Aschersleben gefundene, um 45ms höhere Asynchronie beim Fußtapping setzte um 1,8 bis 3,8 Meter längere II-Afferenzen – also mindestens eine Körperlänge – im Vergleich zu den Händen voraus, wollte allein die Nervenleitungszeit Ursache der Negativen Asynchronie sein. Ungeachtet dessen wären die Ergebnisse von Büttner (1996) und Claus (1987) nicht zu erklären. Die Wahrscheinlichkeit, kortikale Prozesse seien an den Latenzen in nicht unerheblichem Maße beteiligt, steigt also.

Die Deutungen von Müller stehen den Befunden von Bangert (2001) über eine Koaktivierung motorischer und auditiver Areale beim Instrumentalspiel nahe. Müller lokalisiert bei auditorischer wie taktiler Aufgabe (Art des Führungssignals) eine Aktivierung im primär motorischen Kortex[423] rund 77ms vor dem Tap. Der primär motorische Kortex steuert in direkter Nähe und Verbindung zu den Motosensoren auch differenzierte

---

[420] Müller 2000b, S. 308. Vgl. dazu auch Müller 2000a.
[421] Aschersleben 2000, S. 140.
[422] Schmidt 2000, S. 247.
[423] Auch Gyrus praecentralis (primär motorischer Kortex, MI, Brodman Area 4) als Ort der Bewegungssteuerung vor dem Sulcus centralis (Zentralfurche zwischen Frontal- und Parietallappen). Siehe auch Abbildung 32.

Fingerbewegungen[424]. Die im MEG sichtbar gemachte Aktivierung dient also mit hoher Wahrscheinlichkeit der Vorbereitung des folgenden Motorbefehls.

Die zeitlich zweite Aktivierung liegt bei beiden Aufgaben zirka 8ms vor dem Tap im Gyrus postcentralis[425], der als somatosensorischer Kortex für Reize des Tastsinns in den verschiedenen Körperregionen zuständig ist. Da noch kein physikalischer Reiz vorliegt, handelt es sich hier mit hoher Wahrscheinlichkeit um eine – vom Motorbefehl ausgehende – Koaktivierung des somatosensorischen Kortex, mithin die Ladung eines imaginierten somatosensorischen Reizes in das sensorische Gedächtnis. Ungefähr 8ms später trifft die Fingerkuppe auf die Tapping-Matte.

Etwa 75ms nach der Berührung erscheint ein weiteres Aktivitätszentrum im Magnet-Resonanz-Bild. Bei auditiver Aufgabe liegt es im somatosensorischen Kortex, bei taktiler Aufgabe im posterior-parietalen Kortex[426]. Da Müller alle sensorisch assoziierten Aktivierungen über eine vektorielle Gewichtung aus den Daten entfernt hatte[427] – es sich bei dieser dritten Aktivierung also nicht um die Entsprechung des Führungssignales im sensorischen Gedächtnis handelt –, kann angenommen werden, dass das Führungssignal in Abhängigkeit seiner Modalität jeweils rund 75ms nach dem Tap einen anderen Bereich im Kortex koaktiviert: Der somatosensorische Kortex (aktiviert bei auditivem Führungssignal) erhält bilateralen Einstrom[428]. Das heißt, er erhält Ströme auch aus einer zweiten Region und kann daher als möglicher Ort von Signalvergleichen dienen. Dem im rein taktilen Durchlauf aktivierten posterior-parietalen Assoziationsfeld wird wesentlich die Synthese taktiler Wahrnehmungen zugeschrieben[429]. Eine solche Synthese kann im Vergleich zweier sinnesgleicher und zeitlich ähnlicher Informationen wie bei einer taktilen Synchronisation liegen.

Müller folgert, dass beim Klavierspiel – wie bei anderen komplexen sensomotorischen Aufgaben mit akustischer Rückkopplung – stets ein integrativer Prozess auf kortikaler Ebene abläuft, der eine Negative Asynchronie zwischen taktilen und auditiven Reizen ausgleicht. Diese Deutung steht der von Aschersleben nahe, dass die Latenzen bereits

---

[424] Schmidt 2000, S. 118.

[425] Auch Gyrus postcentralis (primär sensorischer oder somatosensorischer Kortex, SI, Areae 1 bis 3) als Ort der primären Sinnesverarbeitung. „Die wichtigste Folge einer Läsion im Gyrus postcentralis ist eine Störung der Formerkennung beim Betasten von Gegenständen, also eine taktile Agnosie und eine Störung der Kinästhesie.“ Ebda., S. 253.

[426] Dieses Gebiet zählt nicht zu den Motorischen Kortizes. Dennoch „ist es an der sensomotorischen Integration und Entwicklung von Bewegungsabläufen wesentlich beteiligt. Läsionen des posterior-parietalen Kortex verursachen komplexe motorische Symptome ... Vornehmlich nach Läsionen des rechten posterior-parietalen Kortex tritt eine als Neglekt bezeichnete Verhaltensstörung auf, die durch das Nichtbeachten von Reizen auf der zur Läsion kontralateralen Seite gekennzeichnet ist.“ Schmidt 2000, S. 119.

[427] Müller 2000b, S. 302. Je zwei bis vier Aktivierungen im Gyrus supratemporalis bei der auditiven Aufgabe, drei bei taktilem Führungssignal.

[428] Schmidt 2000, S. 251.

[429] Ebda., S. 237.

wesentlich auf physiologischer Ebene vorliegen. Denkbar wäre hingegen auch, dass der integrative kortikale Prozess zwischen den Sinnesmodalitäten selbst die anteilig überwiegende Ursache negativer Asynchronien ist. In Konsequenz hieße auditiv-sensomotorisches Lernen bei Handlungen in Abhängigkeit der Zeit dann, intramodale Sinnesabgleiche ob ihrer höheren Güte zunehmend zu bevorzugen. Da jedoch beim Solovortrag kein intramodal auditiver Abgleich möglich ist, würde bei hoch geschulten Musikern im Solovortrag die taktil-kinästhetische Ebene dominieren.

Nach Bangert zeigen Berufsmusiker aber generell Koaktivierungsmuster zwischen motorischen und auditorischen Hirnarealen beim Instrumentalspiel[430]. Den etwa 75ms nach dem tatsächlichen physiologischen Reiz koaktivierten Arealen schreibt Müller die Funktion von Kontroll-Einheiten zu, die „über eine Art Vermittlungsfunktion einen Abgleich zwischen extern gegebenem sensorischen Ereignis (Wahrnehmung) und motorischer Aktivierung (Handlung) involviert sind[431]." Sollte der Abgleich zwischen den Modalitäten stets einer Differenz von rund 75ms unterliegen, könnte dies eine Begründung dafür liefern, dass Probanden der hiesigen Studie ihren Grundschlag nach 80er Störstellen bilanziell deutlich geringer verschoben als bei den übrigen Werten.

Indes unterscheiden sich die Bilanzen nach 80er Störstellen trotz des so unterschiedlichen arithmetischen Mittels varianzanalytisch und im Rangdatentest nicht signifikant von den übrigen Störstellen. Einzig der paarweise Vergleich mit den Bilanzen nach 100er Störstellen und solchen aus Durchläufen mit Unterdrückungen sind auffällig verschieden. Entscheidender aber ist wohl der Befund, dass die Probanden in der 80er Störstelle eine gegenüber ungestörten Zählzeiten signifikante Reaktion zeigen, ihren Tastenanschlag um rund sieben Millisekunden kürzen und sich darin nicht von 120er Entkopplungen unterscheiden, bei denen sich keine erfolgreiche Korrektur anschließt.

Trotzdem sollte einem künftigen Test, der sich primär einer Entkopplung im Bereich um 80ms widmet, nicht von vornherein eine Absage erteilt werden. Denn die zugehörigen Mediane der Bilanzen sehen sehr wohl deutliche Unterschiede etwa für das Verhalten der Probanden nach 80er und 100er Störstellen[432]. Und wie schon erwähnt zeigt der Wilcoxon-Test signifikante Unterschiede im paarweisen Vergleich zwischen 80er und 100er Bilanzen[433]. Überdies zeigen die Ergebnisse von Vos und Kollegen (1992) und Aschersleben (2000a), dass Entkopplungen von 80ms zwischen der auditiven und sensomotorischen Sinnesverarbeitung eine besondere Rolle spielen.

---

[430] Bangert 2001, S. 154.
[431] Müller 2000b, S. 307.
[432] Experiment\Gesamtanalysen\Schließende Analysen\Varianzanalysen\Blockvarianzanalysen.xls\Bilanz nach Störgröße. Dort Zeile 27.

4.6. Die auditiv-sensomotorische Integration

Für das auch in dieser Studie beobachtete motorische Lernen reicht der Vergleich von Ereignissen nach binären Kriterien (zum Beispiel: vorhanden / nicht vorhanden) nicht aus. Vielmehr benötigen kortikale Kontroll-Einheiten auch graduelle Informationen, um die Größe der Schwankungen im motorischen Tempo zu reduzieren. Grundlage sind vergleichbare Informationen zwischen aktuellen und vergangenen Handlungen. Ob der kognitive Prozess sich beim Korrigieren motorischer Zeitstrukturen an einem Inneren Taktgeber oder einem gespeicherten Referenzintervall orientiert, ist bei dieser Frage zunächst nachrangig.

Bedeutender ist die Überlegung, dass die Kopplung von Gehör und Motorik beim Lernen stets geprüft wird, während sie bei erlernt höchster Präzision nicht mehr aktiv – wenngleich aber noch vorhanden – ist[434]. Nach Bangert (2001) werden auditive und sensomotorische Neuronenverbände durch das Üben stärker verbunden. Ziel ist die Bildung umfangreicher Areale multisensorischer Neuronen. Die Instrumentalisten führen ihre motorische Präzision dabei an eine Grenze, an der sie ihre Schwankungen nicht mehr als kritische Größe wahrnehmen. Dann erst herrscht die Kontrolle nach binären Kriterien vor: Der Instrumentalist prüft den Strom auditiver Informationen auf ein eigenständiges akustisches Ereignis, das eindeutig nicht der eigenen Motorik zuzuordnen wäre. Dies erst bedeutete einen Handlungsbedarf.

Bangert konnte in seinem Versuch für das Klavierspiel plausibel machen, wie bei Berufsmusikern und bei Lernenden kognitive Koaktivierungsprozesse beim Instrumentalspiel grundlegend sind[435]. EEG-Messungen zeigten simultane Aktivierungen selbst bei Laien nach zwanzigminütigem Üben am Klavier. Wie erwähnt zeigen diese Befunde Bangerts starke Ähnlichkeiten zu den von Müller (2000b) propagierten Kontroll-Einheiten im posterior-parietalen Assoziationsfeld (ohne Negative Asynchronie koaktiviert durch ein taktiles Führungssignal) oder dem primär somatosensorischen Kortex (mit Negativer Asynchronie koaktiviert durch ein akustisches Führungssignal).

Dies könnte als Schnittstelle ein Vorgang des Kurzzeitgedächtnisses sein: Sobald der motorische Kortex einen Motorbefehl aussendet, wird der auditorische Kortex koaktiviert,

---

[433] Siehe Kapitel 3.3.4.
[434] Bangert 2001, S. 27.
[435] Ebda., S. 159: „Eines der entscheidenden Merkmale der auditorisch-motorischen Repräsentation von Musik bei Berufsmusikern und auch schon nach einigen Stunden des Übens am Instrument ist die simultane Aktivierung (Koaktivierung) der für die jeweiligen Sinnesleistungen zuständigen Arreale im Kortex. Dies geht so weit, dass selbst bei Fehlen einer der Reize beide Kortexregionen aktiv sind. Nach langjährigem Üben führt es zu einer nahezu identischen Evozierung von Kortikalmustern, gleich ob Bewegen ohne Hören oder Hören ohne Bewegung im musikalischen Umfeld stattfindet."

indem eine Pulsation in das sensorische Gedächtnis geladen wird, die der Erwartungshaltung des Probanden für eine akustische Rückmeldung auf das motorische Handeln entspricht. Nach Koelsch (2005) zeigen geschulte Pianisten umgekehrt auch Aktivitäten im motorischen und prämotorischen Kortex – konkrete Fingerrepräsentationen –, wenn sie eine Melodie lediglich hören. Nichtmusiker zeigen immerhin koaktivierte Areale, denen die Repräsentation des Kehlkopfes zugeschrieben wird[436].

Bangert konnte in seiner Studie zudem den Effekt des Missing stimulus bildgebend nachweisen. Die Gruppe der professionellen Pianisten zeigte Pulsationen im auditorischen Kortex, die denen bei zuvor gespielten Sechzehnteln glichen, obgleich diesmal kein Ton erklang[437]. Womöglich ist hierin für hoch geschulte Musiker ein Automatismus zu sehen, der eine stetige Verifizierung der passenden Wirkung zu einer motorischen Ursache bis zu einem Grenzwert umgehen lässt.

In einem wesentlichen Punkt unterschieden sich die Probanden bei Bangert aber nicht anhand ihrer musikalischen Vorbildung: im Auftreten der so genannten Verarbeitungs-negativität[438] (Näätänen 1985). Bangert konnte bei allen Probanden das negative Aktionspotenzial 100ms nach dem physiologischen – aber auch ohne physiologischen Reiz – beobachten. Die Verarbeitungsnegativität ist demnach eine allgemeine, automatische Reaktion der Orientierung (bei hohen Konzentrationsleistungen, vgl. Böttcher 1989) und unabhängig von Intensität, Qualität und sogar Modalität des Reizes. Sie dient dazu, den Stimulus für die weitere bewusste Verarbeitung an die zugehörige kortikale Struktur zu übermitteln[439].

Dass nun die Verarbeitungsnegativität bei untrainierten wie trainierten Probanden auftrat, obwohl kein physiologischer Reiz vorlag, deutet Bangert als „Vorhandensein interner Taktgeber bei der auditiven Verarbeitung repetitiver Zeitstrukturen[440].“ Auch bei untrainierten Probanden werden Pulsationen durch Koaktivierung ins sensorische Gedächtnis geladen (Audiation). Demnach käme dieser unwillkürlichen sensorischen Einbildung bei wiederholten auditiv-sensomotorisch gekoppelten Handlungen wesentlich größere Bedeutung zu als der afferenten Information tatsächlicher physiologischer Reize.

---

[436] Koelsch 2005, S. 371.
[437] Bangert 2001, S. 132.
[438] N1, N100 oder auch Verarbeitungsnegativität nach Näätänen 1985.
[439] Es dauert bis zu 100ms Sekunden, ehe neuronale Erregungsmuster den Pegel zur Aussendung einer Meldung an unser Bewusstsein erreichen. Schmidt 2000, S. 416. Tiefer liegende Hirnregionen zeigen hingegen schon wesentlich frühere Aktionspotenziale. Mit weniger als 10ms Latenz in Bereichen des Hirnstamms sowie bis zu 100ms im Mittelhirn. Bangert 2001, S. 75.
[440] Ebda.

Auch eine Studie von LaRue stützt diese Auffassung. In einer Synchronisationsaufgabe (Handtapping) stellte er bei einem deafferierten Patienten[441] im Vergleich zu vier gesunden Kontroll-Probanden erstaunlicherweise fest, dass die völlige Abwesenheit taktil-kinästhetischer Rückmeldung zu einer höheren Präzision bei isochronem Klopfen führt als in Gegenwart akustischer oder visueller Rückmeldung. Jedoch ist die akustische Rückkopplung keinesfalls überflüssig. Maidhof und Kollegen (2006) beobachteten bei Pianisten eine Negativität im kortikalen Aktionspotenzial des auditorischen Kortex, wenn die Tonhöhe einer angeschlagenen Taste verändert war. Gleiches galt für die Manipulation in einer rein perzeptiven Aufgabenstellung[442].

Dass die Probanden in der hiesigen Studie (wie auch bei Finney 1997) subjektiv wie empirisch geringere Schwierigkeiten mit ausbleibenden als mit verzögerten akustischen Reizen zeigten, stützt die Annahme, dass eine regelmäßige Audiation fester Bestandteil motorischer Programme beim Instrumentalspiel ist, mithin ein stetiger Prozess koaktivierter Neuronenverbände der auditiven und sensomotorischen Kortizes. Das Instrumentalspiel lebt also von gefestigter Audiation. Innere Taktgeber oder ein Katalog von Oszillatoren (Langner 2002) könnten bei hoch geschulten Pianisten die Basis für ein motorisches Programm bilden, dessen prinzipielle Funktionsweise es ist, sämtliche auditiven Rückmeldungen zu ignorieren, sofern sie eine zeitliche Grenze nicht überschreiten.

Dass die primäre Reizanalyse innerhalb der ersten 100ms nach Präsentation des Reizes dabei unbewusst geschehe[443] und Probanden Entkopplungen von motorischer Ursache und akustischer Wirkung unterhalb dieser Schwelle nicht wahrnähmen[444], bestätigt die hiesige Studie hingegen nicht. Mehrere Probanden äußerten bereits nach dem ersten Durchlauf mit Störstellen von lediglich 50ms, es stimme etwas mit der Klaviatur nicht. Zudem ist ein – wenn auch bilanziell nicht erfolgreiches – signifikantes Korrekturverhalten unabhängig der Größe der Entkopplung zu beobachten, und dies bereits ab 50ms Differenz. Aller Wahrscheinlichkeit nach ist der Schwellenwert der bewussten Wahrnehmung fehlender Zeitgleichheit für diese gekoppelten Prozesse durch diese Studie nicht erfasst worden, weil er bei 30 bis 40ms gelegen der Dauer seriell erschöpfender Suchprozesse im Kurzzeitgedächtnis (Sternberg) entspricht, in die auch

---

[441] LaRue 1995, S. 259. Intensive klinische Untersuchungen des Patienten zeigten einen Totalverlust afferent sensorischer Sinne, mit Ausnahme für Schmerzen und Wärme. Jedoch wies der Patient ein normal entwickeltes efferentes neuromotorisches System auf.
[442] Maidhof 2006, S. 284. Vgl. auch Haslinger 2005.
[443] Schmidt 2000, S. 416.
[444] Aschersleben 2000, S. 145.

jener Schwellenwert mit 34,1ms fällt, den Rasch (1988) als untere Grenze der motorischen Präzision im Orchesterspiel bezeichnet.

Diese Überlegung wird auch durch eine Studie von Dahl und Bresin (2001) gestützt. Sie entkoppelten in einem Tapping-Experiment das auditive Feedback von der motorischen Handlung, indem sie Probanden über geschlossene Kopfhörer ein variables Metronom präsentierten, das zu synchronisieren war. Wurde es leicht verzögert, passten die Teilnehmer ihr Klopfen an, ohne dies zu bemerken. Wurde die Entkopplung größer, klopften die Probanden zunehmend weniger präzise. Für einen Bereich von 40 bis 55ms Differenz stellten Dahl und Bresin diesen Wechsel fest. Für noch stärkere Entkopplungen nehmen sie an, dass die Teilnehmer auf eine andere Strategie zur Organisation ihrer Motorik umschalten[445].

Die Spanne bis 40ms ist jener Zeitraum, nachdem unser Kurzzeitgedächtnis seriell und erschöpfend erstmalig den Prozess der auditiv-sensomotorischen Integration – nämlich den erfolgreichen Abgleich zwischen tatsächlichem physiologischen Reiz (Efferenzkopie) und einem automatisch vom motorischen Programm durch Koaktivierung multisensorischer Neuronenverbände erzeugten Abbild (Afferenzkopie auf der Stufe des sensorischen Gedächtnisses) – für gescheitert erklären kann. Die Studie von Bangert ist ein starkes Argument für das Wirken dieser auditiv-sensomotorischen Integration. Demnach können in verschiedenen „zentralnervösen sensorischen und motorischen Systemen multiple unabhängige Modelle ... die Eigenschaften des (eigenen) Körpers und der Umwelt simulieren[446].“ Kommt es dabei zu erheblichen Unterschieden zwischen der Simulation (Efferenzkopie) und dem tatsächlichen physiologischen Reiz (Afferenzkopie), muss der Proband „das verbleibende Motorprogramm für den Rest der Sequenz anpassen; er muß sozusagen sein internes Kontextmodell an den veränderten Kontext adaptieren, was sich als ein ‚Stutzen' oder Zögern vor der nächsten Note manifestiert. Dieses Zögern schlägt sich dann nachteilig im Timingfehler nieder[447]“. In dieser Studie äußerte sich das Stutzen durch einen verschleppten Grundschlag maßgeblich in der zweiten Folgezählzeit. Erstaunlich setzen die Probanden ihre Korrektur nicht auf das Stutzen selbst an, sondern früher, indem sie jene Zählzeit kürzen, die ihnen als ursächlich bewusst wird.

Bangert wies bei ungeübten Teilnehmern bereits in der ersten Sitzung des Klavier-Lernens auditiv-sensomotorische Koaktivierungsprozesse nach. „Diese sind jedoch noch nicht in stabilen neuronalen Schaltkreisen repräsentiert ... Sie scheinen also noch unter

[445] Dahl 2001, S.197.
[446] Bangert 2001, S. 135.

der Kontrolle stark aufmerksamkeitsgesteuerter kognitiver Strategien abzulaufen[448]." Die Koaktivierungsprozesse sind also nicht nur Ergebnis, sondern auch Grundlage für die Bildung neuer multisensorischer Neuronenverbände. So führt das über Wochen tägliche Lernen einer komplexen Fingerbewegung dazu, dass sich das Gebiet im primär motorischen Kortex ausbreitet, das während der Aufgabe aktiv ist[449].

2006 konnten Bangert und Kollegen in einem durch funktionelle Magnetresonanz-tomographie (fMRI) gestützten Experiment nachweisen, dass Pianisten beim Anschlag einer unterdrückten Taste Aktivierungen in Hirn-Arealen zeigen, die bei musikalisch unerfahrenen Probanden nicht erregt sind[450]. Betroffen waren bilateral der Gyrus praecentralis sowie der medial frontale Kortex, besonders Bereiche der prämotorischen und der supplementär-motorischen Area. Zudem war bei den Pianisten das limbische System aktiv, insbesondere im rechten Hippocampus, der rechten zingulären und der posterior zingulären Area sowie im linken Parahippocampus. Die linkshemisphärische Ausprägung ordnet Bangert dem Umstand zu, dass die Probanden lediglich mit der rechten Hand anschlagen mussten. Ein wesentliches Ergebnis lautete, dass Pianisten vergleichbar koaktivierte Neuronenverbände in den motorischen und den auditiven Kortizes zeigten, gleich ob die Aufgabe rein auditiv-perzeptiv oder sensomotorisch ohne akustische Rückmeldung war. Dieses linkshemisphärische, intermodale Netzwerk ist nur bei den Pianisten aktiv[451].

Das limbische System und der Hippocampus sind evolutionär ältere Gehirnstrukturen. Der beidseitig kortikale Hippocampus ist wesentlich daran beteiligt, dass Informationen vom Kurzzeitgedächtnis durch die so genannte Langzeitpotenzierung[452] in das

---

[447] Bangert 2001, S. 118.

[448] Ebda., S. 156. Nach Baddeley ist das Kurzzeitgedächtnis als temporäres Arbeitsgedächtnis tätig. Es speichert vorübergehend, wobei die Informationen für kognitive Aufgaben wie Lernen oder Beurteilen verändert werden können. Baddeley 1986, S. 34. Die aktuelle Wahrnehmung wird mit Vorwissen aus dem Langzeitgedächtnis angereichert und abgeglichen. Dabei unterteilt Baddeley (1974) sein Modell in ein Aufmerksamkeitssystem und eine Phonologische Schleife sowie deren visuelles Pendant, den visuell-räumlichen Skizzenblock. Neuropsychologische Evidenzen für die Existenz der Phonologischen Schleife stammen aus klinisch-anatomischen Studien hirngeschädigter Patienten mit selektiven Beeinträchtigungen des Kurzzeitgedächtnisses bzw. durch bildgebende Verfahren. Vath 2001, S. 7. Das Arbeitsgedächtnis kann auditive Speicherungen wiederholt ablaufen lassen: Die zeitliche Speicherkapazität wird gesteigert. Etwa das willentliche Wiederholen von Vokabeln, einer Telefonnummer oder von Melodien – mit und ohne akustische Unterstützung – sind dabei Prozesse im Sinne der Phonologischen Schleife. Auch das Fußzählen beim Instrumentalspiel ist dieser Kategorie zuzuordnen sowie repetitive motorische Handlungen. Dadurch können Informationen als Lerneffekt in das Langzeitgedächtnis übertragen werden. Der Phonologischen Schleife wird innerhalb des Arbeitsgedächtnisansatzes die Funktion und Verarbeitung sprachbasierter Informationen zugeschrieben. Zu diesem Bereich des Arbeitsgedächtnismodells liegen die meisten Forschungsbefunde vor. So wurde beispielsweise die Rolle der Phonologischen Schleife beim Spracherwerb (Baddeley 1998) oder beim Lesen und Textverstehen ausführlich untersucht.

[449] Schmidt 2000, S. 120.

[450] Bangert 2006: S. 920. Vergleiche auch die Bewertung der Ergebnisse von Altenmüller 2000 in Kapitel 3.5.1., dessen Studie mit ungeschulten Musikern keine hemisphärische Verarbeitung gehörter Musik erbrachte.

[451] Ebda., S. 924.

[452] Schmidt 2000, S. 444: „Unter Langzeitpotenzierung versteht man die Tatsache, daß die Amplitude und Dauer exzitatorischer postsynaptischer Potenziale (EPSP) über Stunden, Tage und Wochen erhöht werden kann, wenn die

Langzeitgedächtnis – in tiefere Gehirnstrukturen – übertragen werden. Ist er beidseitig zerstört, können Patienten Informationen nur über kurze Zeiträume behalten (anterograde Amnesie)[453].

Dass der Hippocampus im Versuch von Bangert (2006) bei den Pianisten sowohl in der motorischen als auch rein perzeptiven Aufgabe aktiviert war, nicht aber bei den ungeschulten Teilnehmern, ist kein Zeichen dafür, dass nur die Pianisten in dem Moment Informationen in das Langzeitgedächtnis zu übertragen begannen. Vielmehr ist hier ein Nachweis gelungen, dass der Hippocampus eine Schnittstelle auditiv-sensomotorischer Integration im Abgleich zwischen Lang- und Kurzzeitgedächtnis ist[454]. Das heißt, die Musiker haben bei beiden Aufgaben Informationen aus dem Langzeitgedächtnis in das Kurzzeitgedächtnis transferiert, mutmaßlich Anweisungen eines subkortikal motorischen Programms, dass die Pianisten über Jahre durch Üben aufgebaut haben. Bei der perzeptiven Aufgabe wurde es koaktiviert.

Tiefere Gehirnstrukturen sind also an motorischen Programmen beteiligt. Das Kleinhirn ist ausschließlich mit der Kontrolle von Bewegungen befasst[455]. Dem Bereich des Spinozerebellums im Kleinhirn kommt die entscheidende Funktion zu: Es vergleicht die Efferenzkopie mit den Rückmeldungen über den Bewegungs- und Programmierungsablauf. Sobald die Bewegung vom geplanten Verlauf abweicht, werden aus diesem Vergleich Korrekturbefehle erarbeitet[456]. Über den Thalamus werden von hier aus insbesondere die Extremitäten planerisch gesteuert.

Der mittlere, größere Bereich des Kleinhirns, das Zerebrozerebellum, erhält afferente Informationen aus jenen kortikalen Regionen, die den „Handlungsantrieb aufgreifen und die Bewegungsstrategie entwickeln.[457]“ Dazu ist es über den Nucleus dentatus und die ventrolateralen Thalamuskerne mit dem motorischen, dem prämotorischen und dem suplementär-motorischen Kortex – also jenen Arealen, die bei Bangert (2006) bei Pianisten, nicht aber den Laien aktiviert waren – verbunden. Der Aufbau dieser kortiko-zerebello-thalamo-kortikalen Schleife scheint also wesentlicher Bestandteil motorischen Lernens, mithin der Entwicklung von motorischen Programmen zu sein.

---

afferenten Axone durch elektrische Reizung repetitiv (tetanisch, z. B. durch hundert elektrische Reize innerhalb einer Sekunde) aktiviert werden.“

[453] Ebda., S. 443.

[454] Die Axone der (cornu ammonis 1) CA1-Pyramidenzellen des Hippocampus übertragen Informationen an das Subiculum. Im Temporallappen gelegen ist das Subiculum Teil des Limbischen Systems. Es erhält Afferenzen von den CA1-Zellen und gibt Afferenzen zum Nucleus ambiguus, zur Amygdala, zum präfrontalen Kortex und zum Hypothalamus weiter.

[455] Eccles 1999, S. 257.

[456] Schmidt 2000, S. 142.

4.6.1. Kortikale und subkortikale Zeitverarbeitung

LaBerge (1995) fragt in Bezug auf die Spanne musikalischen Könnens, ob eine vollständige Reizverarbeitung in subkortialer Region (Thalamus) vorweggenommen werden kann. Als eine wesentliche Einflussgröße hierzu benennt er die Selektive Wahrnehmung (vergleiche dazu Böttcher 1989): Eingehende akustische Informationen werden auf dem Weg in tiefere Ebenen des Gehirns vorzeitig aus dem Prozess der Verarbeitung – in Relation zum gespeicherten Wissen – genommen und anderweitig verarbeitet[458]. Diese Möglichkeit spielt beim Lernvorgang eine wesentliche Rolle. Unbewusste Reaktionen (Reflexe) können anhand im Langzeitgedächtnis gespeicherter, erlernter Vorgänge rascher koordiniert erfolgen als die bewusste Wahrnehmung es dem Menschen eigentlich ermöglicht[459].

Der Lernvorgang zur Senkung der motorischen Antwortlatenz unter den Wert der Verarbeitungsnegativität von 100ms, das motorische Lernen im Ensemblespiel bis hin zu der von Rasch (1988) beobachteten Schwelle von 34,1ms oder mittlere, ungerichtete Schwankungen bei maßgeblich intramodalem Abgleich von lediglich 22,29ms wie in dieser Studie erfordern dabei vom bewussten Geist die Vordatierung neuronaler Muster sensorischer Reize: Die Audiation und auch die Imagination taktiler Reize sind solche Vordatierungen physiologischer Reize zum Zeitpunkt des Motorbefehls (auditiv-sensomotorische Integration), die aus subkortikaler Ebene in den sensorischen Gedächtnisprozess des entsprechenden somatosensorischen Kortex geladen werden. Dennoch erhalten kortikale Neuronen nur einen Bruchteil ihrer Informationen von spezifischen Afferenzen des Thalamus. Den viel größeren Teil beziehen sie von anderen kortikalen Neuronen. Sogar jene, die mehr als einige Millimeter voneinander entfernt sind, zeigen signifikante Korrelationen in ihren Entladungsraten[460].

Dass dieser Abgleich dezentral in zahlreichen Subsystemen verschiedener kortikaler Felder stattfindet – unser sensorisches und Kurzzeitgedächtnis also in vielen Arealen wirken –, ist mittlerweile die vorherrschende Auffassung verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen[461]. Eine Studie von Burr und Morrone (2006) liefert Evidenzen, die gegen eine Innere Uhr sprechen, die über Sinnesmodalitäten hinweg für die Zeitschätzung zuständig sei. So konnten sie nachweisen, „dass Lidschläge den Eindruck der Dauer visueller, nicht

---

[457] Ebda. S. 143: Dies sind im Wesentlichen die motorischen und sensorischen Kortizes sowie der für Assoziationen zuständige posterior-parietale Kortex, zudem visuelle und limbische Repräsentationsgebiete.
[458] LaBerge 1995, S. 20.
[459] Baumann 1994, S. 47f.
[460] Tomita 2005, S. 378.
[461] Singer 2007, S. 16.

aber akustischer Ereignisse verkürzen[462].“ Ergebnisse von Migliore (2001) deuten sogar darauf hin, dass Prozesse der Schätzung und Produktion von Zeitdauern auf der Ebene einzelner Neurone oder kleinerer Neuronenverbände über deren Entladungsraten erklärt werden können[463].

Ullén konnte in Tapping-Versuchen nachweisen, dass bestimmte kortikale Regionen allerdings für sensomotorische Aufgaben unterschiedlicher Komplexität genutzt werden[464]: Klopfen im Takt zeigte in der Magnetresonanztomographie Aktivierungen im rechten vorderen Kleinhirn und der zingulären motorischen Area[465]. Gegentaktiges Klopfen hingegen aktivierte Bereiche im fronto-parietalen Kortex, darunter die supplementär-motorische Area, die präsupplementär-motorische Area, beidseitig den Gyrus parietalis inferior, den prämotorischen Kortex sowie den Gyrus temporalis superior, dem unter anderem die morphosyntaktische Verarbeitung sowie die Integration syntaktischer und semantischer Information beim Sprachverstehen zugeschrieben werden. Mussten die Probanden eine polyrhythmische Aufgaben lösen, zeigten sich Aktivierungen wie bei den gegentaktigen Aufgaben[466].

Dies legt nahe, dass zum Beispiel bei den Tapping-Versuchen von Vos und Kollegen (1992) zur Negativen Asynchronie, aber auch in der hiesigen Studie andere Timing-Mechanismen einsetzen (Dahl 2001), wenn die durch Motorbefehl und Koaktivierung ins sensorische Gedächtnis geladene auditive Imagination (Efferenzkopie) und die resultierend tatsächliche sensorische Rückmeldung (Afferenzkopie) ausreichend gegentaktig sind. Dieser Wechsel der Mechanismen würde mutmaßlich nicht vor Ablauf eines seriell erschöpfenden Suchprozesses beginnen (Sternberg 1966, Ratcliff 1978).

Diese Beobachtung wirft eine interessante Frage auf: Ob die in dieser Studie für tendenziell beidhändig veranlagte Probanden beobachtete bilanzielle Vorverlagerung des Grundschlages drei Zählzeiten nach der Störstelle um bis zu rund 39ms[467] zu Aktivierungen anderer kortikaler Areale im MEG-Bild führt als bei unmanipulierter Notenfolge. Ob also in Anlehnung an das Experiment von Ullén bei Synchronie lediglich das rechte vordere Kleinhirn und die zinguläre motorische Area aktiv sind und wie sich

---

[462] Burr 2006, S. 172.
[463] Migliore 2001, S. 2759.
[464] Ullén 2003, S. 1126.
[465] Siehe Abbildung 32.
[466] Studien von Koelsch (2002) und Maess (2001) zeigen für die Perzeption von Akkord-Sequenzen Aktivierungen im Broca- und Wernicke-Zentrum, denen wesentliche Aufgaben beim Sprechen und Verständnis von Sprache zugeschrieben werden. Zwar geht auch hier die neuere Forschung davon aus, dass wesentlich umfangreichere und teilweise sogar subkortikale Bereiche am Entstehen und Begreifen von Sprache beteiligt sind. Dennoch wird zum Beispiel das Broca-Zentrum unverändert als wichtiges Zentrum für die Verarbeitung von Syntax, Grammatik und Satzstruktur angesehen. Koelsch 2002, S. 960 sowie Maess 2001, S. 543. Insbesondere die Studie von Koelsch formuliert daher, dass Musik wie Sprache eine semantische und eine syntaktische Dimension habe. (Ebda. S. 964).
[467] Siehe Abbildung 31.

kortikale Aktivitäten bei zunehmender Asynchronie verlagern oder ausweiten und vor allem, ob sich die neuronalen Prozesse bei Rechtshändern von denen der ‚Beidhänder' unterscheiden. Dies könnte möglicherweise eine Antwort auf die in Kapitel 3.5.1. zusätzlich aufgeworfene Frage bringen, ob die Güte – annehmbar – mehrzahliger Referenzintervalle oder Innerer Taktgeber hemisphärischen Ausprägungen unterliegt.

4.7. Neuronale Netzwerke

Die Synchronisation bestimmter Hirnareale ist abhängig von der kognitiven Aufgabe und den beteiligten Sinnen. „Neuronale Ensembles entstehen dadurch, dass vorerst unverbundene, einzelne Repräsentationen assoziativ miteinander verbunden werden[468]: Durch gleichzeitige Darbietung zweier Reize; zum Beispiel werden zwei benachbarte Zellgruppen simultan erregt und das Mehr an Erregung führt dazu, daß über ihre Synapsen diese Zellgruppen miteinander verbunden bleiben, so daß beim nächsten Auftreten auch nur des einen Reizes das gesamte Ensemble gezündet wird.[469]"
Dies geschieht nach Hebb in der Synchronisation der Entladungsraten beteiligter Neurone[470]. Singer konnte 2001 für Säugetiere nachweisen, dass sich – angeregt durch externe Reize – Übergänge von kurzfristig stabil verbundenen Neuronen in neue Ensembles in nur wenigen Millisekunden vollziehen[471]. Demnach werden Repräsentationen des Weltgeschehens grundsätzlich in dynamischen Ensembles erzeugt[472], wobei einzelne Nervenzellen nur Teilaspekte der externen Reize darstellen und zu verschiedenen Zeiten an verschiedenen Ensembles beteiligt sein können.
Singer geht davon aus, dass die Synchronisation neuronaler Entladung den entscheidenden Einfluss ausübt, welches Neuronale Ensemble zu welchem Zeitpunkt welche externen Reize auf Ebene des Bewusstseins verarbeitet. Dabei werden die Oszillationen der Neuronen im Gamma-Frequenz-Band zwischen 30 und 60 Hz kurzfristig moduliert, bis sie synchron feuern. Die Aktionspotenziale der Synchronisation selbst dauern nur etwa zehn bis 15ms, wobei die Spitzen der Potenzialfolgen zur

---

[468] Schmidt 2000, S. 414.
[469] Ebda., 415.
[470] Die Hebb'sche Lernregel besagt, dass die Verbindung zwischen zwei Neuronen verstärkt wird, wenn beide Neurone gleichzeitig aktiv sind. „Wenn ein Axon der Zelle A kurz davor ist Zelle B anzuregen und wiederholt oder dauerhaft beteiligt ist, dass diese feuert, so findet ein Wachstumsprozess oder eine metabolische Veränderung in einer oder beiden Zellen statt, sodass die Effektivität von A, als eine der B feuernden Zellen, sich erhöht." Hebb 1959, S. 62.
[471] Singer 2001, S. 142.
[472] Singer 2007, S. 17.

Synchronisation im Mittel weniger als zehn Millisekunden auseinander liegen[473]. Als Folge könnte sich ein – durch externe Reize veranlasster – Austausch eines Ensembles aktivierter Neuronenverbände gegen ein anderes in gerundet frühestens 16,7 bis 33,3ms vollziehen.

Die obere dieser Marken liegt jener Grenze sehr nahe, die Rasch als äußerste motorische Präzision im Orchesterspiel beschreibt, die Sternberg und Ratcliff als frühestes Ende eines erschöpfenden Suchprozesses beim Gedächtnisabruf nennen und um welche Probanden eingangs dieser Studie den Grundschlag nach Störstellen verschleppten. In diesen Situationen ist maßgeblich der intermodale Abgleich zwischen Afferenz- und Efferenzkopie wirksam. Zum einen werden synchron eigene gegen fremde Reize verglichen, asynchron zum anderen erinnerte Reize gegen aktuell wahrgenommene. Diese Prozesse unterscheiden sich aber nur auf den ersten Blick in ihrer Gleich- und Nachzeitigkeit voneinander.

Denn beim seriellen Gedächtnisabruf sind zum Zeitpunkt der Reizrepräsentation zeitgleich sensorische Entsprechungen im sensorischen Gedächtnis (Anzahl aller zur Repräsentation der sensorischen Eindrücke noch aktivierten neuronalen Ensembles) vorhanden, unter denen sich das aktuell Wahrgenommene befindet oder nicht. Erst wenn alle aktivierten Ensembles auf Musterähnlichkeit durchsucht worden sind – also sämtliche in einem Spektrum von 30 bis 60 Hz jeweils zeitgleich feuernden Neuronenverbände, mithin frühestens nach Ablauf von 33,3ms – kann die Erinnerung verneint werden.

Die motorische Präzision eines Orchesters lässt sich aus verwandten Gründen nicht unter die Grenze von 34,1ms (33,3ms) führen, weil kein Instrumentalist kürzere Differenzen im intramodal akustischen Vergleich bewusst als Asynchronie empfindet. Statistisch gesehen handelt es sich bei diesem Wert um die Spannweite: Nicht ein einzelner Instrumentalist weicht um 34,1ms von den übrigen oder eine kleine Zahl von einer größeren um diese 34,1ms ab. Vielmehr scharen sich die Abweichungen – vermutlich normalverteilt – mit einer Spanne um jenen Mittelwert, der den Grundschlag bildet – den theoretisch wahrscheinlichsten Zeitpunkt für den Einsatz jedes Instrumentalisten. Für denjenigen, der zuerst einsetzte vergeht bis zum Einsatz des letzten Spielers exakt soviel Zeit, dass keine akustische Rückmeldung nach Ablauf eines seriell erschöpfenden Suchprozesses eintrifft. Gleiches gilt für alle, die dem ersten folgen.

Empirisch ließe sich dies durch eine den Versuchen von Vos (1992) und Dahl (2001) verwandte Idee überprüfen: Würde demjenigen Spieler, der statistisch am häufigsten oder

[473] Singer 2001, S. 129. Stein beschreibt für ein einzelnes Neuron sogar Entladungsraten von weniger als 1ms. Stein 2005, S. 390.

tatsächlich[474] zuerst einsetzt, ein künstliches Signal mehr als 34,1ms nach seinem Einsatz präsentiert, so müsste er eigentlich sein Tempo – wie in dieser Studie beobachtet – verändern, weil er den Eindruck gewinnt, er hätte zu früh eingesetzt. Dieses mutmaßliche Verhalten legen nicht nur die Befunde um die Motorik der Pianisten in der zweiten Folgezählzeit des hiesigen Experiments nahe, sondern auch die Ergebnisse der Studie von Dahl (2001).

Interessant wäre die Frage, was darauf mit jenem Spieler geschieht, der im Orchester zuletzt einsetzte. Verändert er sein Tempo auf ähnliche Weise, wäre dies ein Nachweis dafür, dass die motorische Präzision im Orchesterspiel davon bestimmt wird, dass im echoischen Gedächtnis die Efferenzkopie (Audiation) zum Motorbefehl bei jedem Spieler niemals auf eine bestehende Afferenzkopie – ein durch einen vergleichbaren externen Reiz bereits aktiviertes Ensemble von Neuronenverbänden – treffen darf. Denn nach Claus (1987) und Büttner (1996) bauen sich auditive Repräsentationen nach 30ms bis 33ms stabil auf.

Buonomano sieht Evidenzen dafür, dass wiederkehrende neuronale Netze zeitliche Informationen durch Selbstorganisation – ohne zentralen Taktgeber – verarbeiten können[475]. Ihre Entstehung kann durch äußere Reize ausgelöst[476] und von nachfolgenden oder Reizen anderer Sinne beeinflusst werden[477], wobei spätere Reize das Muster so überschreiben können, das aus zwei Ereignissen ein Resultat verbleibt. Zudem stellen Karmarkar und Buonomano (2007) fest, dass neuronale Netze kurze Zeitintervalle nicht streng in linear metrischer Zeit dekodieren[478].

Langner (2002) deutet agogische Elemente in der musikalischen Ausführung des Klavierspiels wie auch die Wahrnehmung von Veränderungen im Tempo in einer mathematischen Theorie der Oszillierenden Systeme. Er beschreibt motorische oder gehörte Tempiwechsel als Serien einander abwechselnder Oszillationen[479]. Dazu wählt er 4080 feste Oszillatoren in einem Frequenzbereich von 0,125 bis 16Hz[480]. Für eine Aufführung von Arthur Honeggers Werk Pacific 231 – das durch eine konzeptionelle Tempozunahme geprägt ist – konnte er das wachsende Tempo durch einen Wechsel verschiedener Oszillationen rechnerisch beschreiben.

---

[474] Wenn technisch ermittelbar.
[475] Buonomano 2005, S. 2275.
[476] Ebda., S. 2282.
[477] Wassenhove 2008, S. 1.
[478] Karmakar 2007, S. 427.
[479] Langner 2002, S. 14: „Die eine Oszillation ausführenden Einheiten werden Oszillatoren genannt ... Dieser Begriff (Oszillation) ist eng an den Aspekt der (musikalischen) Periodizität gebunden, markiert jedoch einen Wechsel der Perspektive: Sind Periodizitäten Eigenschaften des akustischen und musikalischen ‚Materials', so sind Oszillationen Vorgänge der Wahrnehmung, welche durch die Periodizitäten in der Musik ausgelöst werden."
[480] Tempo 960 bis 7,5 Schläge pro Minute.

Demnach entspricht die Tempozunahme einer Serie sich abwechselnder fester Oszillationen. Zwar überträgt Langner sein deskriptives Modell nicht auf Theorien Neuronaler Netzwerke. Die Spanne möglicher Entladungsraten von Neuronen entsprechen auch nicht den von Singer (2001) ermittelten Zeitdauern. Indes ist der Entladungszeitpunkt eines Neuronenverbandes nicht auf eine Taktung zwischen 30 und 60 Hertz, also maximal alle 16,6 bis 33,3ms, festgelegt. Kleinere Tempowechsel – aber auch rhythmische oder metrische Strukturen – könnten also Resultat der asynchronen Entladung zweier oder mehrerer Neuronenverbände sein, wie es Langner 2002 theoretisch beschrieb. Musikalisch motorische Tempowechsel könnten also vermutlich eine kognitive Entsprechung in sich verschiebenden Maxima der Entladung zahlreicher Neuronenverbände besitzen[481].

Marolt ließ polyphone Musik im Jahr 1999 durch diverse künstlich neuronale Netzwerke[482] erkennen. „Während in biologischen Neuronalen Netzen biochemische Prozesse die Grundlage der Informationsverarbeitung bilden, wird bei Künstlichen Neuronalen Netzen versucht, die Informationsverarbeitung durch geeignete mathematische Rechenoperationen abzubilden.[483]“ Marolt bildete 88 dieser Netze zur Erkennung akustischer Ereignisse, je eines für die Töne zwischen dem A der Subkontraoktave und dem fünfgestrichenen c. Jedes Netz konnte durch seine individuelle Frequenz aktiviert werden und transformierte die eingehenden akustischen Signale in eine binäre Information: Ton (Frequenz) vorhanden – ja oder nein[484]. Marolt testete vier verschiedene Formen künstlich neuronaler Netzwerke: so genannte multilayer perceptrons[485], radial basis function networks, support vector machines und time-delay networks.

Marolt favorisierte das Modell mehrschichtiger Perzeptronen. Gegenüber einschichtigen Netzen besitzen sie weitere Ebenen von Neuronen, die der variablen Informationsverarbeitung dienen können. Unter kontrollierten Bedingungen (durch einen Algorithmus[486]) kann diese Variabilität einen Lernprozess in der Signalverarbeitung

---

[481] Kopiez 1996, S. 561. Vgl. dazu Langner 2002, S. 73. Dort finden sich anschaulich die sich verändernden Temponiveaus im Oszillogramm.

[482] Künstliche neuronale Netze sind computerbasierte Recheneinheiten (Neuronen), die gerichtet und gewichtet (exzitatorisch) miteinander verbunden sind.

[483] Backhaus 2006, S. 752.

[484] Marolt 1999, S. 314.

[485] Perzeptronen haben die Aufgabe, einen Eingabevektor in einen Ausgabevektor umzuwandeln – sie sind im Grunde also Assoziativspeicher. Ein Perzeptron ist in der Regel ein Feed-Forward-Netz, in dem alle Neuronen einer Schicht vollständig mit den Neuronen der nächsten Schicht vorwärts verknüpft sind. Die erste Schicht dient der reinen Datenaufnahme (Gammafilter-Datenbank im Vergleich zur Retina oder Cochlea in der Natur) und hat fest gewichtete Verbindungen zur nächsten Neuronenschicht. Daran schließt eine trainierbare Schicht an. Multi-layer-perceptrons hingegen haben mehr als eine variabel gewichtete, trainierbare Verbindung zur nächsten Schicht.

[486] Zum Beispiel kann ein mehrschichtiges Perzeptron mit dem Backpropagation-Algorithmus trainiert werden. Die Gewichte der Verbindungen werden dazu so verändert, dass das Netz die gewünschten Muster nach der Trainingsphase klassifizieren kann. Die Backpropagation (Fehler-Rückführung) ist ein überwachtes Lernverfahren und basiert in der Regel auf dem mittleren quadratischen Fehler. Der Algorithmus versucht dabei, den durchschnittlichen

auslösen. In die Datenbank, mit der Marolts Netze trainiert wurden, gingen 400.000 Klavier-Akkorde ein[487]. Jedes Netzwerk wurde einer Lernphase[488] mit 30.000 vorgespielten Akkorden unterzogen.

Anschließend wurden die Netzwerke mit Auszügen aus fünf Musikstücken konfrontiert[489]. Der Ausgang jedes Netzes lieferte erkannte, MIDI-gestützte Noten. Je polyphoner das Notenmaterial war, umso höher stieg die Fehlerrate des gesamten neuronalen Netzes. Hauptsächlich äußerten sich Fehler in oktavierten, zusätzlichen Noten. 2002 konnte Marolt an den von ihr bevorzugten mehrschichtigen Netzwerken zeigen, dass die Erkennungsrate merklich stieg, wenn die Filter jedes künstlichen Neurons zur Detektion der Töne nicht mehr primär auf deren Lautstärkespitzen beziehungsweise Einsatzzeiten der obertonfreien Frequenz (Grundton) ausgerichtet waren.

Sie schaltete einem Netzwerk künstlicher Perzeptrone[490] 22 Filter mit einem Frequenzband zu je einer halben Oktave vor [491]. Die Filter waren zweiteilig: Einer verstärkte – abhängig vom Frequenzband – die eingehenden Signale für eine Dauer von sechs bis 20ms nach ihrem Einsatz. Der zweite Filter glättete das Signal 20 bis 40ms nach Beginn. Dieses Prinzip zeigt Ähnlichkeiten zu der von LaBerge postulierten kognitiven Schärfung physiologischer Reize. Die Hauptaufgabe des künstlichen Netzwerks lautete, die Ausgaben jedes Filters zu unterscheiden: in einsetzende Noten und bereits andauernde Signale. Die Rate korrekter MIDI-Transkriptionen zu eingehenden Signalen lag bei 98-Prozent[492].

Gesamtfehler des Netzes zu reduzieren. Dazu vergleicht er von einem Empfänger-Neuron prüfend die theoretischen Werte (bei Marolt Tonhöhen) aller Neuronen der Ausgabeschicht mit den empirisch gefundenen Tonhöhen. Übersteigt der mittlere Fehler das festgelegte Niveau, wird rekursiv ermittelt, wie hoch der wahrscheinliche Fehleranteil jedes Neurons der vorgelagerten Schicht in direkter Umgebung des Empfänger-Neurons ist. Liegt die Quote zu hoch, wird die Gewichtung zwischen diesen Neuronen verändert. Das heißt, sie übermitteln einander keine Information der vorangegangenen Qualität mehr. Siehe auch Backhaus 2006, S. 776ff. für eine detaillierte Beschreibung von Lernprozessen Künstlicher Neuronaler Netze über Backpropagation-Algorithmen. Insbesondere auch zur Problematik, dass diese als Gradientverfahren lediglich ihre unmittelbare Umgebung und nicht die gesamte Fehlerfläche im Netz berücksichtigen können (wenn sie diese auch reduzieren wollen). Ebda., S. 783.

[487] In Form von Wave-Tables.

[488] Auf Basis eines Algorithmus, der Veränderungen im Neuronalen Netz zulässt, zum Beispiel Veränderungen von Gewichtungen in den Verbindungen bestimmter Neurone untereinander oder deren Abschaltung.

[489] J. S. Bach: zweistimmige Invention Nr. 1 (BWV 772), dreistimmige Invention Nr. 1 (BWV 787), Englische Suite Nr. 1 (BWV 806); P. Tschaikowsky: Nussknacker-Suite, Kleine Ouvertüre sowie Blumenwalzer.

[490] Integrate-And-Fire-Neuron: Vergleiche dazu Voutsas 2004, S. 451: „Ein Leaky-Integrate-And-Fire-Neuron besteht aus einem Leckwiderstand, R, parallel geschaltet mit einem Kondensator, C, geführt von einem externen Strom, I. Das Potential u des Kondensators kann als das Membranpotential eines Neurons betrachtet werden. Das Potential u des Neurons – im Ruhezustand bei Null – steigt an oder nimmt ab in Abhängigkeit vom synaptischen Eingang. Wenn das Potential eine Schwelle überschreitet, löst das Neuron einen Spike aus und das Membranpotential kehrt zum Anfangswert, u=0V, zurück. Nach der absoluten Refraktärzeit, während der das Neuron nicht mehr feuern kann, weil das Membran hyperpolarisiert ist, und nach der relativen Refraktärzeit, während der das Neuron nur mit einem sehr starken exzitatorischen Eingang aktiv werden kann, ist das Neuron wieder bereit das nächste Spike auszulösen."

[491] Marolt 2002, S. 386.

[492] Ebda., S. 387.

Hauptsächlich waren es Noten in sehr schnell gespielten Passagen, schnelle Arpeggios, die nicht erkannt wurden. Jedes Perzeptron entlud sich dabei frühestens alle 50ms[493] – immer dann, wenn der Quotient aus der Anzahl von Perzeptronen mit anderer Aktivität als das beobachtete Perzeptron und der Entladungsdauer jenen Wert erreicht, den die Differenz zwischen dem Ausgang des zum beobachteten Perzeptron gehörigen Filters und der Ähnlichkeit der Aktivität aller anderen Perzeptrone ergibt. Der Schwellenwert zur Entladung jedes Perzeptrons war damit abhängig von seiner minimalen Entladungsrate (die Marolt auf 20Hz festlegte) und der relativen Zahl feuernder Perzeptrone, also dem Maß an Integration im Netzwerk.

Dadurch entladen sich Perzeptronen – die gleichartige Informationen verarbeiten – schlagartig im Verband oder nahezu nicht. Die empirische Entladungsdauer betrug bei Marolt rund zehn Millisekunden. Die Fehlerquote bei der Erkennung von Tönen lag bei immerhin nur zwei Prozent (siehe oben). Damit konnte Marolt künstlich eine akustische Informationsverarbeitung simulieren, die zumindest in wesentlichen physikalischen Eckwerten mit grundlegenden Beobachtungen – in dieser Arbeit zuvor beschriebener Forschungen – annähernd übereinstimmen (Claus 1987, Büttner 1996, Singer 2001). Interessant wäre die Frage, ob Marolts Netzwerke dem menschlichen Gehirn noch ähnlichere Werte erzielten, wenn die vom Gesamtgeschehen im künstlichen Netzwerk abhängige minimale Entladungsrate auf gerundet 33,3Hz gehoben würde (vergleiche dazu Rasch 1988, Sternberg 1966 und Ratcliff 1978 sowie Dahl 2001).

Sänke dann die minimale Dauer der Entladung (Aktionspotenzial) jedes Perzeptrons weiter bis auf Werte von zum Teil unter einer Millisekunde (Stein 2005) ab, ergäbe sich eine Möglichkeit zu noch höherer zeitlicher Diskriminationsleistung des künstlichen Netzes. Denn zweifelsohne kann die minimale Entladungsrate eines synchronisierten Perzeptronenverbandes nicht unter die Dauer der Entladung eines einzelnen Perzeptrons absinken.

Nach Marolt (2002) produzierten die Netzwerke weniger Fehler, wenn zwischen dem Ende des Aktionspotenzials und dem Beginn der nächsten Entladung Zeit verging (Refraktär-zeit). Je niedriger also die Entladungsdauer eines einzelnen Perzeptrons ist, desto höher kann die Entladungsrate eines gesamten Neuronenverbandes sein. Daraus wiederum folgt, dass ein und dasselbe Netzwerk im gleichen Zeitverlauf häufiger zum Einsatz kommen kann. So stünden in gleicher Zeit also ‚mehr' Netzwerke zur Verfügung, wodurch die Wahrscheinlichkeit steigt, minimale akustische Differenzen in Zeit und Tonhöhe aus einem vielfältigen Strom akustischer Informationen heraushören zu können.

[493] Refraktärzeit.

4.7.1. Schlussfolgerung

Zwar ist ein künstliches neuronales Netzwerk wie das von Marolt weit von der Komplexität des menschlichen Gehirns und der Neurophysiologie des Ohres entfernt[494]. Dennoch sind Analogien zu den zuvor diskutierten neurophysiologischen und kognitiven Befunden erkennbar. 2004 konnte Marolt überdies zeigen, wie ein fortentwickeltes künstliches Netzwerk adaptiver Oszillatoren in der Lage ist, seine Phasen und Frequenzen zu einem Strom verschiedenster akustischer Informationen selbst zu synchronisieren. Dies entspricht Annahmen von Buonomano (2005), wonach dynamische Neuronale Netzwerke zeitliche Informationen selbstständig ohne zentralen Taktgeber auswerten können.
Bei Marolt (2004) wurde das Modell von 2002 durch eine größere Filterdatenbank erweitert, die die Frequenzzerlegung von Signalen in der Cochlea präziser simuliert[495]. Wie schon 2002 verzichtet Marolt auf die in vielen psychoakustischen Modellen[496] angenommen dreiteilige Erkennung von Periodizitäten durch einerseits die Laufzeit des Signals, das Zentrum der Frequenz und die Autokorrelation zwischen diesen Werten in den unterschiedlichen auditorischen (Cochlea, Hörnerv, auditorischer Kortex) oder künstlichen Frequenzkanälen (Bandpassfilter sowie Aktivität der Perzeptrone)[497]. Die hohen Erkennungsraten[498] des neuronalen Netzwerks von Marolt (2004) beruhen dabei auf der Fähigkeit zur Anpassung adaptiver Oszillatoren an eingehende akustische Signale[499]. Diese Fähigkeit macht den Vorteil gegenüber Konzepten wie dem von Voutsas (2004) aus. Demnach entschiede – modellhaft übertragen auf die menschliche Kognition

---

[494] Vergleiche Toiviainen 2008, S. 479.
[495] Marolt 2004, S. 5: 200 Filter zweiter Ordnung teilten das Signal in 200 Frequenzbänder (Bandpassfilter) mit logarithmisch abständigen Zentren zwischen 70 und 6.000 Hz (Gammaton-Filterbank). In der Humanpsychoakustik hat sich das Prinzip des Gammatonfilters als Annäherung für die spektralen und zeitlichen Eigenschaften des menschlichen Innenohres etabliert.
[496] Voutsas und Kollegen (2004) setzen auf ein Korrelationsnetzwerk spikender Neuronen. Es besteht aus einem Triggerneuron, einem Oszillator- und einem Integratorkomplex sowie einem Koinzidenzneuron. „Die Funktion des Netzwerkes basiert auf der Korrelation von zeitlich verzögerten und unverzögerten neuronalen Antworten. Diese Signale laufen zu Neuronen, die als Koinzidenzdetektoren reagieren“, also ab einem bestimmten Grad des Zusammenhangs zeitlicher Signale zu feuern beginnen. Voutsas 2004, S. 444.
[497] Marolt 2004, S. 6.
[498] Ebda., S. 19: Sowohl für synthetisierte Musik (MIDI-gestützter Abruf von Wavetables aus einem Digitalpiano) wie auch digitale Mitschnitte menschlichen Vortrags am mechanoakustischen Klavier. Transkribierte Wavetable-Stücke waren: Johann Sebastian Bach, Partita Nr. 4, BWV828 – in Simulation eines Fazioli-Klaviers; Antonín Dvořák, Humoreske Nr. 7, op. 101 – Steinway D Klavier; Scott Joplin, The Entertainer – Bösendorfer. Die Aufnahmen menschlichen Vortrags waren: Johann Sebastian Bach, Englische Suite Nr. 5, BWV810, Preludium, Interpret – Murray Perahia; Frederic Chopin, Nocturne Nr. 2, op. 9/2 – Artur Rubinstein; Scott Joplin, The Entertainer, Interpret unbekannt. Die Quoten glichen einander bei rund 86 Prozent oder wichen um rund zehn Prozentpunkte ab (98 gegenüber 88 Prozent beim realen Vortrag) oder differierten doch um 24 Prozentpunkte (92 zu lediglich 68 Prozent richtig erkannter Noten bei der Aufnahme eines realen Vortrags: Chopin, siehe oben).
[499] Marolt will sie durch die Entwicklung eines Algorithmus für den kontrollierten Wettbewerb der Oszillatoren untereinander erhöhen. Ebda. S. 23.

– ein „Wettkampf der Oszillatorenbänke[500]“ über die Güte der kognitiven Verarbeitung komplexer akustischer Signale.

Das nahezu unverfälschte Hören von Arpeggios und schneller Rhythmus- oder Tempiwechsel äußerte sich demnach in der Wahrscheinlichkeit der Anregung einer jeden Oszillatorenbank (Marolt 2004, Langner 2002) und nicht in der Güte des Laufzeitvergleiches (Korrelationen) wie bei Voutsas (2004) oder dem Echtzeitvergleich durch Innere Taktgeber und -zähler (Kristofferson 1977, Schulze 1978). Weiterhin ist das Model von Marolt gut geeignet, um über seine immanenten Schwellenwerte eine synchrone und schlagartige Entladung (Hebb 1959) ausreichend angeregter Neuronenverbände in nur wenigen Millisekunden (Schmidt 2000, Singer 2001, Stein 2005) zu ermöglichen und schnelle, dynamische Wechsel der Ensembles zuzulassen (Buonomano 2005, Singer 2007) beziehungsweise deren Modulation im so genannten Gamma-Frequenz-Band zwischen 30 und 60 Hz (Singer 2001).

Überdies finden wesentliche Messwerte der Kognitionsforschung und Untersuchungen zur musikalischen Psychomotorik mögliche Analogien in Marolts Modell: So kann die Latenz erschöpfender Suchprozesse (Sternberg 1996, Ratcliff 1978) eine Ursache in der Refraktärzeit von Neuronenverbänden (Perzeptronenverbände) finden. Der Aufbau akustisch (Büttner 1996) oder taktil (Claus 1987) evozierter Potenziale frühestens nach 30 bis 33ms wird durch die untere Grenze des Gamma-Frequenz-Bandes gleichsam plausibel. Dennoch entsteht kein Widerspruch zur Diskriminationsleistung des Menschen im Bereich von geringen ein bis zwei Millisekunden (Bruhn 2000), weil die Refraktärzeit es verhindert, dass derselbe Neuronenverband innerhalb von zwei Millisekunden zweimal feuert. Vielmehr wird wahrscheinlich ein anderer Verband entscheidend angeregt, entlädt sich, wodurch der Mensch die zeitlich unmittelbar akustischen Ereignisse zumindest als asynchron identifizieren kann.

5. Fazit

Eine große Herausforderung für die Forschung mit künstlich neuronalen Netzwerken ist sicherlich die Nachbildung auditiv-sensomotorischer Kopplungen beziehungsweise kortikaler Integration. Denn die Experimente von Marolt und Voutsas simulieren nur eine Sinnesebene und zwar rein perzeptiv: das Gehör. So bleibt die Frage offen, wie etwa

[500] Ebda.

anteilige Ursachen am Gesamteffekt der Negativen Asynchronie abgebildet werden können. Gekoppelte oder koppelbare Perzeptronenverbände wären erforderlich, zuständig jeweils für die auditive, taktile und kinästhetische Wahrnehmung. Die Peripherie des Zentralen Nervensystems müsste in ihrer unterschiedlichen Güte nachgeahmt werden. Nicht zuletzt fehlt bislang das künstliche Pendant einer endogenen Komponente, um Oszillationen willkürlich beginnen zu lassen.

Der Verfasser erlaubt sich an dieser Stelle – auch mit Blick auf die eigenen Resultate – die Meinung, dass im langjährigen Diskurs[501] über etwaige Vorherrschaften Innerer Taktgeber oder perzeptiv gebildeter Referenzintervalle vermutlich ein wichtiger Aspekt übersehen oder nicht strikt genug beachtet wurde. Denn insbesondere in dem von Befürwortern der Theorie Innerer Taktgeber als grundlegend angesehenen Experiment von Schulze wurde nie die Frage gestellt, wie ein (dort verworfenes) erinnertes Zeitintervall kognitiv überhaupt repräsentiert sein kann, wenn nicht in Form vergehender Zeit, physiologisch also in Form kreisender Ströme respektive durch Oszillationen!

Vielmehr suggerierte Schulze den Lesern seiner Studie durch Grafiken unterschiedlich langer Zeitintervalle – also durch räumlichen Vergleich – wahrscheinlich ungewollt: Eine Theorie erinnerter Referenzintervalle nehme an, dass ein aktueller Reiz und ein statisch gespeichert erinnertes Intervall grundsätzlich nachträglich im Gehirn quasi nebeneinandergelegt werden würden. Folglich erschien das Modell Innerer Taktgeber wesentlich plausibler.

Warum auch immer dieser Aspekt im Diskurs unberücksichtigt blieb, disqualifizierte er die Theorie erinnerter Referenzintervalle – und damit das Modell einer auditiv-sensomotorischen Rückkopplungsschleife – doch über Jahre als rein perzeptives Modell einer statischen Zeitschätzung a posteriori, das deshalb beim Musizieren keine oder bestenfalls eine untergeordnete Rolle spielen könne[502]. Dass erinnerte Referenzintervalle quasi in Echtzeit an der Bemessung zeitlicher Strukturen beteiligt sein könnten, wurde erst wieder durch Keele (1985) vertreten, gleichwohl ohne die Debatte dabei entscheidend zu beeinflussen. Allein dem Modell eines oder mehrerer Innerer Taktgeber wurde weiterhin die Befähigung zur Bildung zeitlicher Strukturen a priori (Rötter 1996) und damit die Möglichkeit des Echtzeit-Vergleiches zugeschrieben.

---

[501] im Foucault'schen Sinn.

[502] Rötter 1996, S. 486: „Theorien, die einen a-posteriori-Vergleich favorisieren, wie die eben beschriebene (memory theory über ein erinnertes Durchschnittsintervall, Keele 1985. Anm.), beschränken sich aber möglicherweise nur auf die Wahrnehmung von Zeit, sie wurden auch empirisch nur anhand von Wahrnehmungsexperimenten überprüft. Es ist schwer vorstellbar, wie diese Modelle auf die Produktion von Zeitabläufen zu übertragen wären. Um beispielsweise Zeitabläufe beim Musizieren erklären zu können, ist eigentlich nur ein interner Taktgeber vorstellbar, der in ‚Echtzeit' tätig ist; der im Sinne einer Steuerungs- und Kontrollfunktion einen direkten Einfluß auf das motorische System ausübt."

Erst die interdisziplinären Studien der späten 1990er Jahre und Überlegungen zur Wirkungsweise neuronaler Netzwerke beziehungsweise Oszillierender Systeme prägten nachhaltig die Vorstellung, dass zeitlich gestaffelte sensorische Reize sehr kurzfristig durch sich periodisch entladende Neuronenverbände repräsentiert werden können[503]. Dies steht den Schlussfolgerungen Schulzes zunächst nicht entgegen. Denn bekannt war, dass Pulsationen ohne physikalischen Reiz ausgelöst werden können (Klinke 1968). Seither war bekannt, dass diese sehr deutlich jenen Pulsationen gleichen, die zuvor durch tatsächliche akustische Reize ausgelöst wurden und zudem in derselben kortikalen Region auftreten. Bangert konnte 2001 dann zeigen, dass diese durch Imagination ausgelösten Potenziale kortikale Regionen betreffen, die sowohl für die initiierende Motorik als auch das vom Gehör erwartete Resultat zuständig sind. Damit war nachgewiesen, dass identische Neuronenverbände sowohl durch inneren als auch äußeren Impuls angeregt werden können und sich fortan periodisch entladen.

Die aus der Synchronisation im Gamma-Frequenz-Band hervorgehende Refraktärzeit der Neuronenverbände könnte Ursache für den – in dieser Studie leider nicht erfassten – Schwellenwert auditiv-sensomotorischer Kopplung sein: Sein Wert läge bei 40ms (Dahl 2001) oder gar 33 bis 34ms (Sternberg 1966, Ratcliff 1978, Rasch 1988, Singer 2001). Die Refraktärzeit entspräche damit dem in Frage 1b dieser Studie postulierten kognitiven Analogon zum neurophysiologischen Schwellenwert. Zudem mag sie erklären, warum das hiesige Experiment einen zweiten Schwellenwert bei 80ms Entkopplung ermittelte, zu dessen Seiten sich die Probanden für Schwellenwerte allerdings untypisch verhalten, weil er keinen Übergang vom einen Zustand zum anderen zeigt, sondern ein beiderseits identisches Verhalten der Probanden und selbst den Unterschied ausmacht (vergleiche auch Sasaki 1998). Sollten Entladungen etwa alle 40ms erfolgen, könnten die später eintreffenden akustischen Reize den Probanden besonders stark aufgefallen sein. Dass der somatosensorische Kortex und das posterior-parietale Assoziationsfeld bestimmende Regionen für die Entstehung von Schwellenwerten auditiv-sensomotorischer Kopplungen – und damit für Intermodale Netzwerke – seien könnten, legen die Studien von Müller (2000b) und Bangert (2001) nahe.

Ein Modell aus Netzwerken adaptiver Oszillatoren (Marolt 2004) mit vielfältig möglichen Einsatzzeiten könnte zudem wesentlich bessere Erklärungen für die menschliche Wahrnehmung und Produktion komplexer rhythmisch-metrischer Strukturen, der Polyrhythmik und dies insbesondere für mehrere Gliedmaßen erklären. Einzelne Referenzintervalle oder Taktgeber vermögen das nicht ohne weiteres. Überdies würde wie

[503] Vergleiche dazu Altenmüller 2000, S. 68.

zuvor bereits gefolgert schon die Metrik eines einfachen Vierteltaktes wenige Referenzintervalle oder Taktgeber vor erhebliche Schwierigkeiten stellen. Auch muss mit Blick auf die hiesigen Alternativhypothesen noch einmal betont werden, dass die Teilnehmerinnen und Teilnehmer in diesem Experiment eine um bis zu 30ms über den ursprünglichen Grundschlag verschleppte Motorik eingangs zeigten. Zwar ließe die Wirksamkeit eines einzelnen Referenzintervalles dies erklären, keinesfalls aber ein einzelner, statisch Innerer Taktgeber.

Das in dieser Studie unterschiedlich reaktive Verhalten von Rechtshändern gegenüber tendenziell eher beidhändig veranlagten Probanden kann wesentlich besser durch das Modell sich periodisch entladender – hemisphärisch lateralisierter und zuständiger – Neuronenverbände erklärt werden. Als Schnittstelle (Kurzzeitgedächtnis) zwischen exo- und endogenen Anregungen wären sie zudem Ort des Abgleichs zwischen Erwartungshaltung und Tatsächlichkeit: Erwartung drückte sich demnach in der Wahl, Aktivierung oder Markierung – ob ihrer Modalität oder Entladungsrate – vorab bevorzugter Neuronenverbände aus. Diese Form selektiver Aufmerksamkeit drückte sich in dieser Studie auch in den geringeren Schwankungen jener Probanden aus, die vorab über Entkopplungen und Unterdrückungen informiert waren.

Die zentrale Frage dieser Arbeit, ob sowohl eine auditive Rückkopplungsschleife als auch Innere Taktgeber beim Solovortrag im Klavierspiel grundsätzlich vorkommen und einander situativ ergänzen, kann im Sinn einer Theorie multimodal koaktivierbarer, adaptiver neuronaler Netze ohne zentralen Taktgeber mit relativer Wahrscheinlichkeit bejaht werden. Dass eine auditive Rückkopplungsschleife samt erinnertem Referenzintervall oder ein einzelner oder auch wenige Innere Taktgeber allein für so komplexe sensomotorische Handlungen in der Zeit – wie es das Klavierspiel darstellt – verantwortlich sind, erscheint durch die Befunde dieser Studie unwahrscheinlicher.

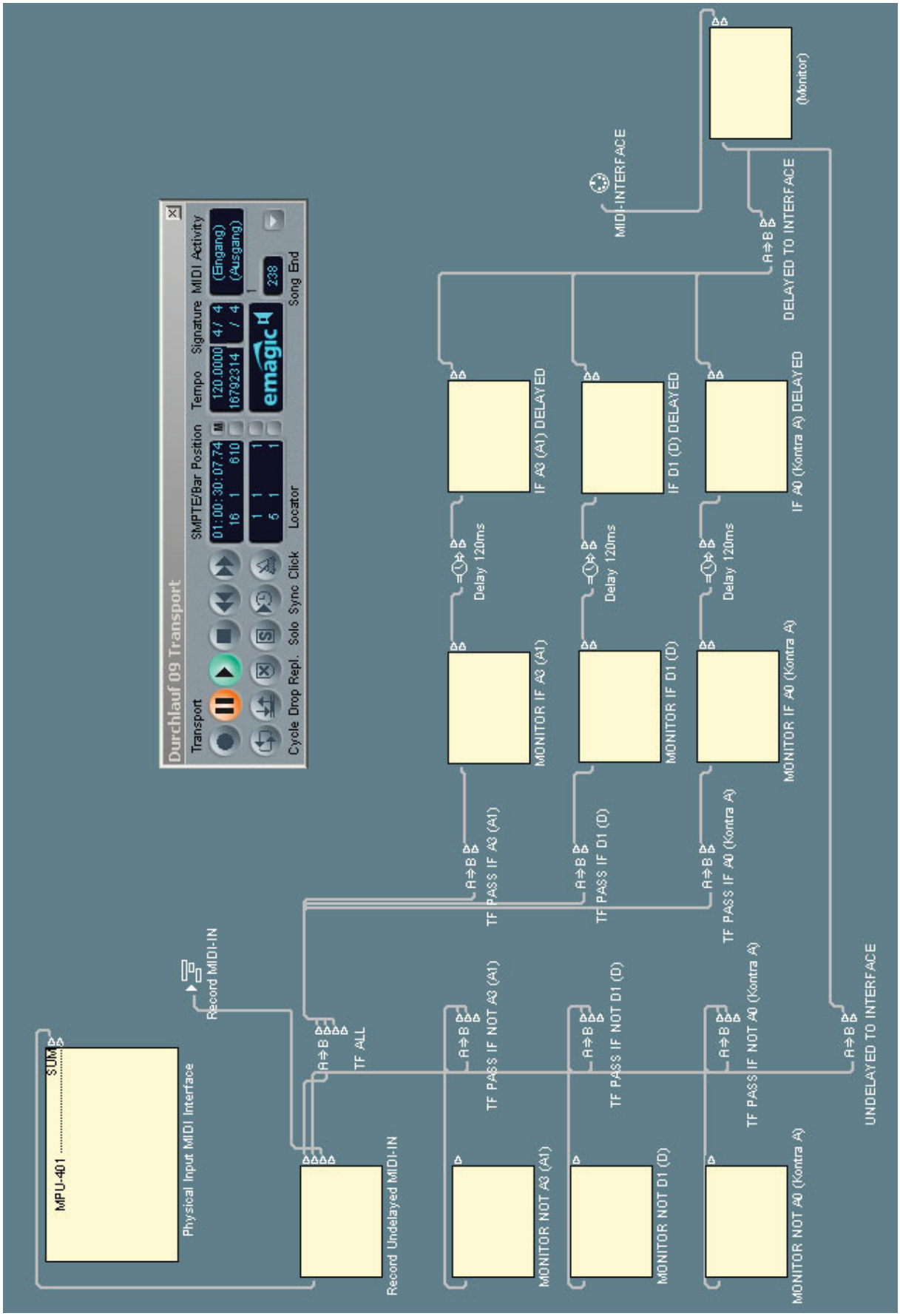
6. Anhang

6.1. Analyse des Notenbildes zur Auswahl der Störstellen

Note	Anzahl	Linke Hand, negative Kriterien	Kommentar
A1	1	Oktavsprung	geeignet
H1	-		
C	2	Nur durch Wechselnote voneinander getrennt	
D	1		geeignet
E	3	Nr. 1 ist erste Note, Nr. 3 direkt nach Pause	
F	2	Zweitletzter Wert vor Pause, danach Viertel	
G	3	Nr. 2 + 3 nur durch Wechselnote getrennt	
A	3	Oktavsprung	geeignet
H	2	Nur durch Wechselnote getrennt	
c	3	Nr. 1 vor Pause, 2 + 3 nur durch Wechselnote getrennt	
d	1	Wechsel auf Halbe folgt	
e	2	Teil der Schlussklausel	
f	1	Teil der Schlussklausel	

Note	Anzahl	Rechte Hand, negative Kriterien	Kommentar
e1	1	erste Note	
f1	1		geeignet
g1	2	nur durch Wechselnote getrennt	
a1	4	Nr. 1 recht früh, Nr. 4 Oktavsprung	geeignet
h1	4	durch Wechselnoten getrennt	
c2	7	zu häufig	
d2	6	zu häufig	
e2	3	Nr. 2 neuer Notenwert	geeignet
f2	-		
g2	1	Teil der Schlussklausel	
a2	1	Viertel folgen	

6.2. Logic-Verdrahtung



6.3. Verkürzter Händigkeitstest nach Oldfield

Händigkeitstest

Bitte geben Sie in der folgenden Liste an, welche Hand Sie für die jeweilige Tätigkeit bevorzugen, indem Sie ein Kreuz (X) in die entsprechende Spalte setzen. Wenn Sie in einem Fall keine Hand bevorzugen, tragen Sie bitte ein Kreuz in beide Spalten ein.

Versuchen Sie bitte alle Fragen zu beantworten. Lassen Sie nur dann eine Lücke, wenn Sie mit einer der Tätigkeiten überhaupt keine Erfahrungen haben.

	Links	Rechts
Schreiben	_____	_____
Zeichnen	_____	_____
Werfen	_____	_____
Schneiden	_____	_____
Zähne putzen	_____	_____
Messer (ohne Gabel)	_____	_____
Löffel	_____	_____
Besen (obere Hand)	_____	_____
Streichholz anzünden (Streichholz)	_____	_____
Schachtel aufmachen (Deckel)	_____	_____

Besitzen Sie linkshändige Verwandte und wenn ja,
in welchem Verwandtschaftsverhältnis? _____

Sehr geehrte Versuchsperson,

wir möchten um Ihre freiwillige Mitarbeit bei einer experimentellen Studie bitten: Es wird die Tempogestaltung beim Klavierspiel untersucht. Sie sollen ein einfaches Musikstück vom Blatt auf einem Digitalklavier spielen. Es gibt 14 Durchläufe. Sie können ihr Vortragstempo spontan wählen, sollen dies aber konstant und in allen Durchläufen möglichst gleich gestalten.
Wir würden uns freuen, wenn Sie bereit wären, an der Untersuchung teilzunehmen. Für weitere Fragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

_____
Prof. Dr. W. Auhagen

Hiermit erkläre ich mich bereit, an der von Prof. Dr. Auhagen durchgeführten Untersuchung teilzunehmen. Ich weiß, dass ich meine Zusage jederzeit widerrufen und die Experimente abbrechen kann.

_____ _____
Halle, den Unterschrift

6.4. Fragebogen für die Probanden

Fragebogen

zum Versuch „*auditiv-sensomotorischer Kopplung beim Klavierspiel*“

Versuchsdatum: _____ Versuchsnummer: _____

1. Zur Person
Name: _____
Vorname: _____
Geburtsdatum: _____
Alter: _____
Geschlecht: _____
Beruf: _____

2. Ausbildung
Schulart und -abschluss: _____
Berufsausbildung (Studium oder Lehre, in welchem Fach?): _____

3. Musikalischer Ausbildungs- und Wissensstand
Spielen Sie (ein) Musikinstrument(e)? _____
Welche(s) und seit wann? _____
Haben Sie früher Instrumental- oder Gesangsunterricht bekommen? _____
Wann und für welche(s) Instrument(e)? _____
Bekommen Sie zur Zeit Instrumental- oder Gesangsunterricht? _____
Seit wann und für welche(s) Instrument(e)? _____

4. Gewohnheiten des Instrumentalspiels
Wie oft spielen/üben Sie wöchentlich? _____
Wie lange jeweils? _____
Spielen/Singen Sie in einem Ensemble? Welcher Art? _____
Spielen Sie hauptsächlich klassische Musik,
moderne Musik, Jazz, andere? _____

5. Selbsteinschätzung zur eigenen instrumentalen Fertigkeit
Versuchen Sie bitte Ihre Fähigkeiten bei folgenden Aufgaben auf einer Skala von 1 bis 5 einzustufen (1=“sehr gut“, 5=“weniger gut“)

Technik: _____
Gehörbildung: _____
Auswendigspiel: _____
Timing: _____
Vom-Blatt-Spiel: _____
Improvisation: _____

6.5. Literaturverzeichnis

(Alan 1971) L. G. Allan, A. B. Kristofferson und E. W. Wiens: Duration Discrimination of Brief Light Flashes. In: Perception and Psychophysics, 9, 1971. S. 327-334.

(Altenmüller 2000) Eckart Altenmüller, Maria Schuppert u. a.: Neuronale Grundlagen der Verarbeitung musikalischer Zeitstrukturen. In: Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch. Hrsg. von Katharina Müller und Gisa Aschersleben. Bern u. a.: Verlag Hans Huber 2000. S. 59-78.

(Aschersleben 2000a) Gisa Aschersleben: Zeitliche Steuerung einfacher motorischer Handlungen. In: Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch. Hrsg. von Katharina Müller und Gisa Aschersleben. Bern u. a.: Verlag Hans Huber 2000. S. 137-158.

(Aschersleben 2000b) Gisa Aschersleben und Jochen Müsseler: Datierung visueller Reize bei einer raum-zeitlichen Wahrnehmungstäuschung (Kappa-Effekt). In: Dynamische Perzeption. Hrsg. von G. Baratoff und H. Neumann. Sankt Augustin: Infix 2000. S. 163-166.

(Atkinson 1968) R. C. Atkinson und R. M. Shiffrin: Human memory: A proposed system and its control processes. In: The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory. Hrsg. von K. W. Spence. New York: Academic Press 1968. S. 89-195.

(Atkinson 1971) R. C. Atkinson und R. M. Shiffrin: The control of short-term memory. In: Scientific American, 1971. S. 82-90.

(Auhagen 1995) Wolfgang Auhagen: Kategorienbildung bei der Wahrnehmung des musikalischen Tempos. In: Systematische Musikwissenschaft, 3/1, 1995. S. 175-186.

(Auhagen 1998) Wolfgang Auhagen und Veronika Busch: The Influence of Articulation on Listeners' Regulation of Performed Tempo. In: Controlling Creative Processes in Music. Hrsg. von Reinhard Kopiez und Wolfgang Auhagen. Frankfurt am Main: Lang 1998. (=Schriften zur Musikpsychologie und Musikästhetik, 12). S. 69-93.

(Auhagen 2000) Wolfgang Auhagen und Piet G. Vos: Experimental methods in tonality induction research. A review. In: Music Perception, 17, 2000. S. 417-436.

(Auhagen 2008) Wolfgang Auhagen: Rhythmus und Timing. In: Musikpsychologie. Das neue Handbuch. Hrsg. von Herbert Bruhn, Reinhard Kopiez und Andreas C. Lehmann. Reinbek: Rowohlt 2008. S. 437-457.

(Backhaus 2006) Klaus Backhaus, Bernd Erichson u.a.: Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer 2006.

(Baddeley 1974) Alan. D Baddeley und Graham Hitch: Working Memory. In: Recent Advances in Learning and Motivation. Bd. 3. Hrsg. von G. Bower. New York: Academic Press 1974. S. 47-90.

(Baddeley 1986) Alan D. Baddeley: Working Memory. Oxford: Oxford University Press 1986.

(Baddeley 1998) Alan D. Baddeley, Susan. E. Gathercole and Constanza Papagno: The phonological loop as a language-learning device. In: Psychological Review, 105, 1, 1998. S. 158-173.

(Bangert 2001) Marc Bangert: Auditiv-sensomotorische Integration bei komplexen hochtrainierten Wahrnehmungs- und Verhaltensleistungen: Analyse kortikaler Koaktivierungsprozesse am Beispiel des Klavierspiels. Hannover: Biol.-nat.-wiss. Diss. 2001. [Digital].

(Bangert 2006) Marc Bangert, Thomas Peschel, Gottfried Schlaug u.a.: Shared networks for auditory and motor processing in professional pianists: Evidence from fMRI conjunction. In: NeuroImage, 30, 2006. S.917-926.

(Barry 1990) Barbara R. Barry: Musical Time. The Sense of Order. Stuyvesant: Pendragon Press 1990.

(Baumann 1994) Dorothea Baumann: Improvisierte Musik und Gehirn. In: Improvisation 2. Mit Beiträgen von Peter Widmer u. a. Hrsg. von Walter Fähndrich. Winthertur: Amadeus 1994.

(Beichelt 2003) Frank E. Beichelt und Douglas C. Montgomery (Hrsg.): Teubner-Taschenbuch der Stochastik. Wahrscheinlichkeitstheorie, Stochastische Prozesse, Mathematische Statistik. 1. Auflage. Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag/GWV Fachverlage 2003.

(Békésy 1960) Georg von Békésy: Experiments in hearing. Translated and edited by E. G. Wever. New York u. a.: McGraw-Hill Company 1960.

(Bortz 2000) Jürgen Bortz, Gustav A. Lienert u.a.: Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik. 2., korrigierte und aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2000.

(Bortz 2003) Jürgen Bortz und Gustav A. Lienert: Kurzgefasste Statistik für die klinische Forschung. Leitfaden für die verteilungsfreie Analyse kleiner Stichproben. 2., aktualisierte und bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2003.

(Bortz 2005) Jürgen Bortz: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 6., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Heidelberg: Springer 2005.

(Böttcher 1989) Cornelia Böttcher: Aufmerksamkeitsabhängige Änderungen im akustisch evozierten Hirnpotential des Menschen. Berlin: Med. Diss. 1989. [Masch.].

(Brandt 1992) Michael Brandt: Gehirn und Sprache. Fossile Zeugnisse zum Ursprung des Menschen. Berlin: Pascal Verlag 1992. (=Studium Integrale: Paläontologie).

(Bruhn 2000) Herbert Bruhn: Zur Definition von Rhythmus. In: Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch. Hrsg. von Katharina Müller und Gisa

Aschersleben. Bern u. a.: Verlag Hans Huber 2000. S. 41-56.

(Bruhn 2008) Herbert Bruhn, Reinhard Kopiez und Andreas C. Lehmann. Musikpsychologie. Das neue Handbuch. Reinbek: Rowohlt 2008.

(Buonomano 2005) Dean V. Buonomano: A Learning Rule for the Emergence of Stable Dynamics and Timing in Recurrent Networks. In: Journal of Neurophysiology, 94, 2005. S. 2275-2283.

(Burr 2006) David Burr und Concetta Morrone: Time Perception. Space-Time in the Brain. In: Current Biology, 16, 5, 2006. S. 171-173.

(Busch 2005) Veronika Busch: Tempoperformance und Expressivität. Eine Studie zwischen Musikpsychologie und Musiktherapie. In: Schriften zur Musikpsychologie und Musikästhetik, Band 13. Hrsg. von Helga de la Motte-Haber. Frankfurt am Main: Lang 2005.

(Büttner 1996) U. W. Büttner: Akustisch evozierte Potentiale. In: Evozierte Potentiale. Hrsg. von M. Stoehr, J. Dichgans, U. W. Büttner, Ch. W. Hess und Eckardt Altenmüller. Berlin: Springer 1996. S. 411-486.

(Claus 1987) D. Claus, R. Linsenmeier, u.a.: Somato-sensory evoked potentials following tactile skin stimulation. In: EEG MEG, 18, 1987. S. 115-121.

(Crowder 1994) Robert G. Crowder und Ian Neath: The Influence of Pitch on Time Perception in Short Melodies. In: Music Perception, 12/4, 1994. S. 379-386.

(Dahl 2001) Sofia Dahl und Roberto Bresin: Is the player more influenced by the auditory than the tactile feedback from the instrument. In: Proceedings of DAFx01. Limerick: 2001. S. 194-197.

(Dennerlein 2009) Barbara Dennerlein: Die Frau, die sogar Kirchenorgeln zum Grooven bringt. Interview. In: Pressemitteilung der Stadt Erding vom 31.08.2009 zu den Erdinger Jazz-Tagen 2009.

(Eccles 1999) John C. Eccles: Die Evolution des Gehirns - die Erschaffung des Selbst. 3. Auflage. München: Piper 1999.

(Finney 1997) Steven A. Finney: Auditory feedback and musical keyboard performance. In: Music Perception, 15, 1997. S. 153-174.

(Finney 2003) Steven A. Finney und Caroline Palmer: Auditory feedback and memory for music performance: Sound evidence for an encoding effect. In: Memory & Cognition, 31, 1, 2003. S. 51-64.

(Fischer 2004) Timo Fischer, M. Nusseck und Herbert Bruhn: Der Einfluss von Knowledge of Result bei einfachen Synchronisationsaufgaben. Eine Untersuchung mit Lehramtsstudierenden der Universität Flensburg. In: Tagungsband zur Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Musikpsychologie. Paderborn: 2004.

(Fischer 2005) Timo Fischer, M. Nusseck und Herbert Bruhn: Timing Precision in Synchronization Tapping and Effects of Training. In: Preceedings of the 8th Tübingen Perception Conference. Tübingen 2004. S. 61.

(Fisher 1936) Ronald Aylmer Fisher: The use of multiple measurements in taxonomic problems. In: Annals of Eugenics, 7, 1936. S. 179-188.

(Fraisse 1980) Paul Fraisse: Les synchronisations sensori-motrices aux rhythmes. In: Anticipation et comportement. Hrsg. von J. Requin. Paris: Centre National 1980. S. 233-257.

(Friederici 2003) Angela D. Friederici und Sonja A. Kotz: The brain basis of syntactic processes: functional imaging an lesion studies. In: NeuroImage, 20, 2003. S. 8-17.

(Gehrke 1996) J. Gehrke: Afferente Informationsverarbeitung und die Synchronisation von Ereignissen. München: Med. Diss. 1996. [Digital].

(Gottschewski 1993) Hermann Gottschewski: Tempoarchitektur – Ansätze zu einer speziellen Tempotheorie. Oder: Was macht das “Klassische“ in Carl Reineckes Mozartspiel aus? In: Musiktheorie, 8/2, 1993. S. 99-117.

(Hahne 2004) Anja Hahne, Korinna Eckstein u.a.: Brain Signatures of Syntactic and Semantic Processes during Children’s Language Development. In: Journal of Cognitive Neurosciene, 16, 7, 2004. S. 1302-1318.

(Hartung 1993) Joachim Hartung, Bärbel Elpert u.a.: Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. 9., durchgesehene Auflage. München, Wien: Oldenbourg 1993.

(Haslinger 2005) B. Haslinger, P. Erhard u.a.: Transmodal Sensorimotor Networks during Action Observation in Professional Pianists. In: Journal of Cognitive Neuroscience. 17, 2, 2005. S. 282-293.

(Hebb 1959) Donald Olding Hebb: The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory. 5. Auflage. New York: Wiley 1959.

(Karmarkar 2007) Uma. R. Karmarkar und Dean V. Buonomano: Timing in the absence of clocks: Encoding time in neural network states. In: Neuron, 53, 2007. S.427-438.

(Keele 1968) Steven W. Keele: Movement control in skilled motor performance. Psychological Bulletin, 70, 1968. S. 387-403.

(Keele 1985) Steven W. Keele, Robert A. Pokorny u.a.: Do Perception and Motor Production share Common Timing Mechanisms? A Correlational Analysis. In: Acta Psychologica 60/2-3, 1985. S. 173-191.

(Keller 2007) Peter E. Keller, Günther Knoblich u.a.: Pianists duet better when they play with themselves: On the possible role of action simulation in synchronization. In: Consciousness and Cognition, 16, 2007. S. 102-111.

(Klinke 1968) R. Klinke, H. Fruhstorfer u.a.: Evoked responses as a function of external and stored information. In: Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 25, 1968. S. 119-122.

(Koelsch 2002) Stefan Koelsch, Thomas C. Gunter u.a.: Bach Speaks: A Cortical ‘Language-Network’ Serves the Processing of Music. In: NeuroImage, 17, 2002. S. 956-966.

(Koelsch 2005) Stefan Koelsch: Ein neurokognitives Modell der Musikperzeption. In: Musiktherapeutische Umschau 26, 4, 2005. S. 365-381.

(Koelsch 2008) Stefan Koelsch und Erich Schröger: Neurowissenschaftliche Grundlagen der Musikwahrnehmung. In: Musikpsychologie. Das neue Handbuch. Hrsg. von Herbert Bruhn, Reinhard Kopiez und Andreas C. Lehmann. Reinbek: Rowohlt 2008. S. 393-412.

(Kopiez 1996) Reinhard Kopiez: Aspekte der Performanceforschung. In: Handbuch der Musikpsychologie. 2., erg. Auflage. Hrsg. von Helga de la Motte-Haber. Laaber: Laaber 1996. S. 505-587.

(Kopiez 1998) Reinhard Kopiez und Wolfgang Auhagen: Controlling creative processes in music. In: Schriften zur Musikpsychologie und Musikästhetik, Band 12. Hrsg. von Helga de la Motte-Haber. Frankfurt am Main: Lang 1998.

(Kopiez 2005) Reinhard Kopiez: Musikalischer Rhythmus und seine wahrnehmungs-psychologischen Grundlagen. In: Aus dem Takt. Rhythmus in Kunst, Kultur und Natur. Hrsg. von Christa Brüstle, Nadia Ghattas, Clemens Risi u.a. Bielefeld: Transkript 2005. S. 127-148.

(Kornhuber 1965) Hans H. Kornhuber und Lüder Deecke: Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale. In: Pflügers Archiv European Journal of Physiology, 284, 1965. S. 1-17.

(Kreiß 2006) Jens-Peter Kreiß und Georg Neuhaus: Einführung in die Zeitreihenanalyse. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.

(Kirstofferson 1967) A. B. Kristofferson: Attention and psychological time. In: Acta psychologica, 27, 1967. S. 93-100.

(Kristofferson 1977) A. B. Kristofferson: A real-time criterion theory of duration discrimination. In: Perception and Psychophysics 21/2, 1977. S. 105-117.

(LaBerge 1995) David LaBerge: Attentional Processing in Music Listening. A Cognitive Neuroscience Approach. In: Psychomusicology 14, 1995. S. 20-33.

(LaRue 1995) Jacques LaRue, Chantal Bard u.a.: Is proprioception important for the timing of motor activities? In: Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 73, 1995. S. 255-261.

(Langner 2002) Jörg Langner: Musikalischer Rhythmus und Oszillation. In: Schriften zur Musikpsychologie und Musikästhetik. Hrsg. von Helga de la Motte-Haber. Frankfurt am Main: Lang 2002.

(Maess 2001) Burkhard Maess, Stefan Koelsch u.a.: Musical syntax is processed in Broca's area: an MEG study. In: Nature Neurosciene, 4, 5, 2001. S. 540-545.

(Maidhof 2006) Clemens Maidhof, Martina Rieger u.a.: Processing of self-made and induced errors in musicians. In: Proceedings of the 9th International Conference on Music Perception & Cognition (ICMPC9). Hrsg. von Mario Baroni, Anna Rita Addessi u.a. Bologna 2006. S. 109.

(Marolt 1999) Matija Marolt: A comparison of feed forward neural network architectures for piano music transcription. In Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC 1999). Peking 1999. S. 314-316.

(Marolt 2002) Matija Marolt, A. Kavcic u.a.: On detecting note onsets in piano music. Proceedings of the Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON 2002), Kairo 2002. S. 385-389.

(Marolt 2004) Matija Marolt: Networks of adaptive oscillators for partial tracking and transcription of music recordings. In: Journal of New Music Research, 33, 1, 2004. S. 49-59. Online http://lgm.fri.uni-lj.si/~matic/clanki/jmnr.pdf dort S. 1-23.

(Massaro 1996) Dominic W. Massaro und Geoffrey R. Loftus: Sensory and Perceptual Storage. In: Memory. Handbook of Perception and Cognition. Hrsg. von Elizabeth Ligon Bjork und Robert A. Bjork. San Diego: Academic Press 1996. S. 67-99.

(Mäki-Patola 2005) Teemu Mäki-Patola: Musical Effects of Instrument Latency. In: Proceedings of Suomen musiikintutkijoiden 9. valtakunnallinen symposium, 17-19 March. Jyväskylä: 2005. S. 1-4.

(Meumann 1894) Ernst Meumann: Untersuchungen zur Psychologie und Ästhetik des Rhythmus. In: Philosophische Studien, 10, 1894. S. 249-322 und 383-430.

(Michon 1985) John A. Michon: The compleat time experiencer. In: Time, Mind and Behavior. Hrsg. von J. A. Michon und Janet. L. Jackson. Berlin: Springer 1985. S. 21-52.

(Migliore 2001) M. Migliore, L. Messineo u.a.: Quantitative Modeling of Perception and Production of Time Intervals. In: Journal of Neurophysiology, 86, 2001. S. 2754-2760.

(Müller 2000a) Katharina Müller: Die Verarbeitung musikalischer Zeitstrukturen – Ein spezifischer Prozess? Kommentar zu Altenmüller et al. In: Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch. Hrsg. von Katharina Müller und Gisa Aschersleben. Bern u. a.: Verlag Hans Huber 2000. S. 79-82.

(Müller 2000b) Katharina Müller: Neurophysiologische Methoden zur Analyse zeitlicher Steuerungsmechanismen im Gehirn In: Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch. Hrsg. von Katharina Müller und Gisa Aschersleben. Bern u. a.: Verlag Hans Huber 2000. S. 293-310.

(Musial 2000) Frauke Musial: Die Walsh-Fourier-Spektralanalyse: Eine Methode zur zeitreihenanalytischen Auswertung binärer und ordinal skalierter Daten. In: Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch. Hrsg. von Katharina Müller und Gisa Aschersleben. Bern u. a.: Verlag Hans Huber 2000. S. 315-347.

(Näätänen 1985) Risto Näätänen: Selective attention and stimulus processing: Reflections in event-related potentials, magnetemcephalogram and regional blood flow. In: Attention and Performance. Hrsg. von M. I. Posner and O. S. M. Marin. Hillsdale/New York: Lawrence Erlbaum 1985. S. 355-373.

(Nakajima 1991) Yoshitaka Nakajima, Gert ten Hoopen u.a.: A New Illusion of Time Perception. In: Music Perception, 8/4, 1991. S. 431-448.

(Noorden 1999) Leon van Noorden und Dirk Moelants: Resonance in the perception of musical pulse. In: Journal of New Music Research, 28, 1999. S. 43-66.

(Oldfield 1971) R. C. Oldfield: The Assessment and Analysis of Handedness: The Edinburgh Inventory. In: Neuropsychologia, 9, 1971. S. 97-114.

(Paillard 1949) J. Paillard: Quelque données psychophysiologiques realtives au déclenchement de la commande. L'Année Psychologique, 48, 1949. S. 28-47.

(Pfordresher 2003) Peter Q. Pfordresher: Auditory Feedback in Music Performance: Evidence for a Dissociation of Sequencing and Timing. In: Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 29, 5, 2003. S. 949–964.

(Piroth 2005) Hans Georg Piroth: Zur Sprachlautkonstituierung im phonetischen Wahrnehmungsprozess. Psycho- und elektrophysiologische Untersuchungen. Berlin, New York: De Gruyter 2005. (=Linguistik: Impulse und Tendenzen, 7).

(Pitman 1937) E. J. G. Pitman: Significance tests which may be applied to samples from any population. In: Royal Statistical Society Supplement, 4, 1937. S. 119-130 und 225-232.

(Povel 1985) Dirk-Jan Povel und Peter Essens: Perception of Temporal Patterns. In: Music Perception 2/4, 1985. S. 411-440.

(Prinz 1997) W. Prinz: Perception and action planning: In: European Journal of Cognitive Psychology, 9, 1997. S. 129-154.

(Rasch 1988) Rudolf. A. Rasch: Timing and synchronization in ensemble performance. In: Generative Processes in Music. Hrsg. von John A. Sloboda. Oxford: Claredon 1988. S. 70-90.

(Repp 1998) Bruno H. Repp: Effects of Auditory Feedback Deprivation on Parameters of Expressive Piano Performance. In: Proceedings of the Fifth International Technological Directions in Music Education Conference. San Antonio 1998. S. 96-101.

(Rötter 1996) Günther Rötter: Zeit- und Rhythmuswahrnehmung. In: Handbuch der Musikpsychologie. 2.,ergänzte Auflage. Hrsg. von Helga de la Motte-Haber. Laaber: Laaber 1996. S. 483-504.

(Rötter 2000) Günther Rötter: Zeitwahrnehmung und die Produktion von Zeitabläufen innerhalb komplexer musikalischer Zusammenhänge. In: Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch. Hrsg. von Katharina Müller und Gisa Aschersleben. Bern u. a.: Verlag Hans Huber 2000. S. 111-132.

(Sachs 2006) Lothar Sachs und Jürgen Hedderich: Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R. Zwölfte, vollständig neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2006.

(Sasaki 1998) Takayuki Sasaki, Yoshitaka Nakajima u.a.: Categorical Rhythm Perception As a Result of Unilateral Assimilation in Time-Shrinking. In: Music Perception 16/2, 1998. S. 201-222.

(Shaffer 1982) L. H. Shaffer: Rhythm and Tempo in Skill. Psychological Review, 89/2, 1982. S. 109-122.

(Shigeno 1986) Sumi Shigeno: The auditory tau and kappa effects for speech and nonspeech stimuli. In: Perception and Psychophysics, Bd. 40/1. 1986. S.9-19.

(Schulze 1978) Hans-Henning Schulze: The Detectability of Local and Global Displacements in Regular Rhythmic Patterns. In: The Psychological Research, 40, 2. Berlin/Heidelberg: 1978. S. 173-181.

(Schulze 2000) Peter M. Schulze: Beschreibende Statistik. 4., ergänzte Auflage. München/Wien: Oldenbourg 2000.

(Singer 1997) Wolf Singer, A. K. Engel u.a.: Neuronal assemblies: necessity, signature and detectability. In: Trends in Neuroscience, 1, 7, 1997. S. 252-261.

(Singer 2001) Wolf Singer: Consciousness and the binding problem. In: Annals of the New York Academy of Science, 929, 2001. S.123-146.

(Singer 2007) Wolf Singer: Understanding the Brain. In: European Molecular Biology Organization Reports, 8, 2007. S. 16-19.

(Snyder 2001) Bob Snyder: Music and Memory. An Introduction. Cambridge: The MIT Press 2001.

(Stein 2005) Richard B. Stein, E. Roderich Gossen u.a.: Neuronal Variability: Noise or part of the signal. In: Nature Reviews. Neuroscience. 6, 2005. S. 389-397.

(Sternberg 1966) Saul Sternberg: High-speed scanning in human memory. Science, 153, 1966. S. 652-654.

(Sternberg 1969) Saul Sternberg: Memory-scanning: Mental processes revealed by reaction-time experiments. In: American Scientist, 57, 1969. S. 421-457.

(Sternberg 1982) Saul Sternberg, Ronald L. Knoll u.a.: Timing by skilled musicians. In: The Psychology of Music. Hrsg. von Diana Deutsch. Orlando: Academic press 1982. S. 181-269.

(Takahashi 2006) Noriyuki Takahashi und Minoru Tsuzaki: Effects of auditory feedback in the practice phase of imitating a piano performance. In: Proceedings of the 9th International Conference on Music Perception & Cognition (ICMPC9). Hrsg. von Mario Baroni, Anna Rita Addessi u.a. Bologna 2006. S. 1612-1618.

(Toiviainen 2008) Petri Toiviainen: Musikalische Wahrnehmung und Kognition im Computermodell. . In: Musikpsychologie. Das neue Handbuch. Hrsg. von Herbert Bruhn, Reinhard Kopiez und Andreas C. Lehmann. Reinbek: Rowohlt 2008. S. 476-489.

(Tomita 2005) Masahiko Tomita und Jos J. Eggermont: Cross-Correlation and Joint Spectro-Temporal Receptive Field Properties in Auditory Cortex. In: Journal of Neurophysiology, 93, 2005. S. 378-392.

(Ullén 2003) Frederik Ullén, Hans Forssberg u.a.: Neural Networks for the Coordination of the Hands in Time. In: Journal of Neurophysiology, 89, 2003. S. 1126-1135.

(Vath 2001) Nuria Vath: EEG-Kohärenzanalysen zu kognitiven Prozessen im Arbeitsgedächtnis. Göttingen: Math. nat. wiss. Diss. 2001. [Digital].

(Vargha-Khadem 1997) Faraneh Vargha-Khadem, Lucinda J. Carr u.a.: Onset of speech after left hemispherectomy in a nine-year old boy. In: Brain, 120, 1997. S. 159-182.

(Vos 1992) Piet G. Vos, Eric. L. Helsper u.a.: Tracking simple rhythms under pseudo-synchronization conditions. In: Proceedings of the Fourth Rhythm Workshop: Rhythm Perception and Production. Hrsg. von C. Auxiette, C. Drake and C. Gerards Bourges: o. A. 1992. S. 37-42.

(Vos 1997) Piet G. Vos, Marcel van Assen u.a.: Perceived tempo change is dependent on base tempo and direction of change: Evidence for a generalized version of Schulze's (1978) internal beat model. In: Psychological Research, 59, 1997. S. 240-247.

(Voss 2004) Werner Voss: Taschenbuch der Statistik. 2., verbesserte Auflage. München/Wien: Hanser 2004.

(Voutsas 2004) Kyriakos Voutsas, Gerald Langner u.a.: Ein bionisches neuronales Netz zur Periodizitätsanalyse. In: Bionik - Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaft. Hrsg. von T. Rossmann und C. Tropea. Springer: Berlin, Heidelberg u.a. 2004. S. 443-460.

(Walz 2004) Guido Walz: Lexikon der Statistik. Mit ausführlichem Anwendungsteil von Barbara Grabowski. 1. Auflage. München: Elsevier 2004.

(Wassenhove 2008) V. van Wassenhove, Dean V. Buonomano u.a.: Distortions of Subjective Time Perception Within and Across Senses. In: PLoS ONE 3, e1437. 2008. S. 1-13.

(Zakay 1996) Dan Zakay und Richard A. Block: The role of attention in time estimation processes. In: Time, Internal Clocks and Movement. Hrsg. von Maria A. Pastor und Julio Artieda. Amsterdam u. a.: Elsevier 1996. (=Advances in Psychology, Bd. 115). S. 143-164.

6.6. Glossar

ADSR: Abkürzung für Attack, Decay, Sustain und Release. Diese vier Parameter bilden die Hüllkurve (Envelope) eines MIDI-Tons, also seinen Verlauf, auch Envelope-Generator genannt.

afferente Nervenfaser: Nervenbahnen, die von einem Sinnesorgan zum Zentralnervensystem führen. Ggs.: **efferent**.

Aktionspotenzial: Elektrische Spannungsänderung mit Aktionsströmen bei der Erregung von Nerven, Muskeln, Drüsen (Biochem.).

auditiv/**auditorisch**: 1 (a) Das Gehör betreffend, zum Gehörsinn oder -organ gehörend (Medizin); (b) fähig, Sprachlaute wahrzunehmen und zu analysieren. In Bezug auf das menschliche Gehör (Medizin); 2. vorwiegend mit Gehörsinn begabt (Psychologie).

bilateral: Auf beiden Seiten gelegen (Medizin).

bimodal/**intermodal**: Zwei oder mehr Sinnesmodalitäten einschließend. Ggs.: **intramodal**.

Broca-Zentrum: Sprachmotorisches Zentrum im Gehirn.

efferente Nervenfaser: Nervenleitung vom Zentralnervensystem in die Peripherie führend, etwa in die Muskulatur.

Gyrus: Gehirnwindung (Medizin, Psychologie).

Koaktivierung: Gemeinsame Aktivierung räumlich getrennter, also nicht zu einem Nervenzellverband gehörender Regionen im Gehirn.

Klang: Aus Grund- und Teiltönen zusammengesetzte, vom Gehör wahrgenommene und stets periodische Schwingungen der Luft (Schallschwingungen) mit sinusförmigem Schwingungsverlauf. Nicht nur Anzahl und Stärke (Amplituden) der Teiltöne gegenüber dem Grundton, sondern auch das Verhältnis ihrer Schwingungszahlen zueinander bestimmen die Art der Klangerscheinung. Das Schwingungsverhältnis ist harmonisch bei ganzzahligen Proportionen der Teiltöne zum Grundton wie 1:2:3: usw. Unharmonische Klangverhältnisse entstehen bei Bruchproportionen, wie sie bei dreidimensional schwingenden Körpern (Glocken, Platten, Stäbe) entstehen.

Kognitionswissenschaften: Oberbegriff für Forschungsdisziplinen, die sich mit menschlicher Erkenntnis befassen (lat. cognitio: Bekanntschaft, Erkenntnis, Vorstellung). Dazu zählen neben der Neurobiologie und der Künstliche-Intelligenz-Forschung auch Philosophie, Psychologie, Linguistik und die Anthropologie. Sie versuchen interdisziplinär und mit naturwissenschaftlichen Methoden gemeinsame Kernfragen zu beantworten: Wie nimmt der Mensch die Welt wahr? Wie speichert er Wissen? Wie ruft er es ab, gibt es weiter und wendet es an? Eine zentrale Rolle spielt dabei die Idee, dass unser Gehirn **mentale Repräsentationen** erschafft.

Kortex: (1) Äußere Zellschichten eines Organs. (2) Hirnrinde.

Latenz: Die durch die Nervenleitung bedingte Zeit zwischen Reizeinwirkung und Reaktion (Psychologie).

Lernen: bewirkt erfahrungsbedingte und relativ dauerhafte Verhaltensänderungen. Wir lernen unter anderem durch regelmäßige Kopplung bestimmter Reize, durch Beobachtung und Imitation, durch Ausprobieren nach dem Prinzip „Versuch und Irrtum“ oder durch Neustrukturierung bereits gelernten Materials. Lernvorgänge beeinflussen nachweislich die Stärke von Nervenverbindungen (Synapsen) im Gehirn.

Mentale Repräsentation: Als mentale Repräsentation bezeichnen Hirnforscher, Psychologen und Philosophen jene inneren Zustände, die als Bausteine des Bewusstseins und Gedächtnisses fungieren. Sie enthalten Informationen, die das Verhalten der betreffenden Personen bestimmen und ihr Handeln in der Umwelt überhaupt erst ermöglichen. Das Konzept der Repräsentation markiert eine Abkehr vom Behaviorismus. Es gibt viele Indizien dafür, dass die „naive“ Vorstellung falsch ist, die Welt spiegele sich in unserem Kopf schlicht wider. Vielmehr sind auch mentale Repräsentationen einfacher Dinge sehr komplex. Schon die anatomische Feinstruktur der Hirnrinde legt nahe, dass dort keine einfache Abbildung stattfindet: Es gibt weit mehr Querverbindungen zwischen einzelnen Neuronenverbänden als Nervenbahnen von den Sinnesorganen kommen. So etwa verarbeitet das denkende Hirn sinnvolle Buchstabenreihen anders als sinnlose.

MIDI: Schnittstellen-Standard mit eigenem Protokoll. Die 1983 international eingeführte digitale Normschnittstelle (Musical Instrument Digital Interface) ermöglicht das Verbinden elektrischer Musikgeräte wie Synthesizer, Sampler, Keyboards, Computer, Mischpulte, Effektgeräte, Peripheriegeräte. Zuvor hatten Hersteller eigene Schnittstellen verwendet. Die MIDI-Schnittstelle ist ein digitales, serielles Interface mit einer Übertragungsrate von 31250 Baud. Das Datenformat beträgt 8 Bits mit einem Start- und einem Stopbit. Die Übertragung erfolgt über eine 5mA-Stromschleife und einen Optokoppler. Da MIDI-Geräte dadurch nicht direkt elektrisch verbunden sind, können keine Brummschleifen entstehen. Die Befehle für die Übertragung von Noten, Spielhilfen, Soundnummern, Synchronisations-Steuerung und vieles mehr sind festgelegt. So werden Tonhöhe, Anschlagstärke (z. B. auf einer Klaviaturtaste), Instrumentalklang als Zahlenwerte von 0 bis 127 kodiert.

Motorik: Gesamtheit der willkürlichen aktiven Muskelbewegungen (Medizin). Ggs. **Motilität**.

motorisch: (1) Die Motorik betreffend. (2) Einen Muskelreiz aussendend und über Nerven weiterleitend (Medizin).

perimotorisch: Während der Bewegungsausführung.

peripher: Am Rande befindlich.

Perzeption: (1) Sinnliches Wahrnehmen als erste Stufe der Erkenntnis (Philosophie). (2) Reizaufnahme durch Sinneszellen oder -organe (Medizin, Biologie).

Repräsentation: (1) Zentralnervöse Entsprechung einer peripheren Reizkonstellation (mentales Abbild). (2) Topographisch eingrenzbares kortikales oder subkortikales Gebiet der neuronalen Verarbeitung von 1.

Sensomotorik: Durch Reize bewirkte Gesamtaktivität in sensorischen und motorischen Teilen des Nervensystems und des Organismus von Lebewesen sowie Steuerung und Kontrolle der Bewegungen (Psychologie).

sensorisch: Die Sinnesorgane oder die Aufnahme von Sinneswahrnehmungen sowie –empfindungen betreffend.

Stimulus: (äußerer) Reiz.

taktil: Das Tasten, den Tastsinn betreffend (Medizin).

temporal: Zu den Schläfen gehörend.

Timing: (1) Bestimmung und Wahl des für einen beabsichtigten Effekt günstigsten Zeitpunktes zum Beginn eines Handlungsablaufs (besonders im Sport). (2) Synchrone Abstimmung verschiedener Handlungen aufeinander. (3) Zeitliche Steuerung (Technik).

Ton: Einzelne, vom Gehör wahrgenommene und stets periodische Schwingung der Luft (Schallschwingung) mit sinusförmigem Schwingungsverlauf (auch: reiner Ton). Im Unterschied zum Klang (natürlicher Ton) nur elektrisch herstellbar.

Wavetable: Klangsynthese-Methode in Verwendung des Dateiformats .wav zur Erstellung von Audioklängen. Digital oder analog gespeicherte Klänge können derart in den Speicher einer Soundkarte geladen werden. Über Steuerbefehle (MIDI) können die Klänge an periphere Geräte weitervermittelt werden. So zur Ausgabe an einen Verstärker oder zur Bearbeitung in Sequenzern. Die historisch gesehen erste Soundkarte mit einem Wavetable-Synthesizer (Multisound) emulierte einen Studio-Synthesizer und konnte auf maximal 383 gespeicherte Klänge zurückgreifen. Insgesamt konnten 32 Stimmen gleichzeitig ausgegeben werden. Ein wichtiger Parameter einer Wavetable-Soundkarte ist der vorhandene Speicherplatz, nicht nur weil Samples in CD-Qualität entsprechend groß sind, sondern auch deswegen, weil man für ein Instrument wegen der Klangtreue oft mehrere Samples speichert.

Wernicke-Zentrum: Das für das Sprachverstehen zuständige sensorische Sprachzentrum wird allgemein als die Brodmanschen Felder 41, 22, 21, 40, 39 und 37 bezeichnet. Man vermutet, dass zwischen dieser Region und dem in der Fissura Sylvii verborgenen Temporalfeld eine besondere Beziehung besteht.

Dank

Mein Dank gilt im besonderen Maße Herrn Professor Dr. Wolfgang Auhagen, der das Projekt auch über die räumliche Distanz und trotz meiner Berufstätigkeit intensiv und jederzeit hilfreich unterstützte und auch in schwierigen Momenten stets auf die besondere Themenstellung verwies.

Ausdrücklich möchte ich den Probanden der verschiedenen Institute in Halle danken, die beim Blick auf das Notenmaterial den Kopf schüttelten, weil sie zunächst und verständlicherweise keine Herausforderung darin sehen konnten. Dennoch waren die meisten der Studierenden auch ohne Hinweise auf die Versuchsanordnung sofort bereit zu glauben, dass sie mit einem Lächeln den Versuchsraum verlassen würden.

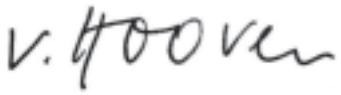
Den Assistenten am musikwissenschaftlichen Institut der Martin-Luther-Universität möchte ich danken, dass ich ihre festen Zeiten im Akustikstudio durcheinander bringen durfte. Dies gilt zudem für Frau Dr. Veronika Busch und Herrn Dr. Clemens Wöllner.

Ohne das Wissen der Firma Just Keyboards GmbH Berlin hätte diese Dissertation vermutlich Startschwierigkeiten besessen. Mein Dank gilt insbesondere Herrn Robert Sieck für seine Geduld bei meinen Fragen zum Einsatz von Logic, die mit dem wahren Logic-Leben wenig zu tun haben. Dem Kundenservice der Firma Yamaha möchte ich für die prompten Antworten auf meine Fragen danken; das gilt auch für die Redaktion des Fachmagazins Keyboards.

Christiane gilt mein ganzer Dank für das über Gebühr anhaltende Verständnis und ihre Geduld während so vieler verdissertierter Wochenenden und Abende.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, die von mir am heutigen Tag eingereichte Dissertation zum Thema „Auditive Einflussgrößen bei der zeitlichen Handlungsplanung im Klavierspiel: Analyse auditiv-sensomotorischer Kopplungen“ selbstständig verfasst, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen kenntlich gemacht zu haben.



Neuruppin, den 16. März 2009 Andreas van Hooven