

Verbesserung von digitalen Musikinstrumenten durch haptisches Feedback

Bachelorarbeit

Gian-Marco Schmid

Fakultät für Psychologie

Universität Basel

Oktober 2013

Betreuung: Mirjam Seckler, M. Sc. und Prof. Dr. Klaus Opwis
Allgemeine Psychologie und Methodologie
Forschungsschwerpunkt Mensch-Maschine Interaktion
Fakultät für Psychologie, Universität Basel

Kontaktadresse: Gian-Marco Schmid
Felmethalde 5
5073 Gipf-Oberfrick
gian-marco.schmid@stud.unibas.ch

Zusammenfassung

Professionelle Musiker verwenden neben der Wahrnehmung von auditiven und visuellen Reizen auch haptische Sinneseindrücke als Kontrollstrategien ihres musikalischen Ausdrucks (Järveläinen, Papetti, Schiesser, & Grosshauser, 2013). Digitale Musikinstrumente (DMIs) liefern dem Benutzer kein angemessenes haptisches Feedback, weshalb sich neue interdisziplinäre Forschungsinteressen mit der Gestaltung solcher Musikinstrumente befassen. Auf der Basis psychophysikalischer Forschung wird versucht haptisches Feedback adäquat in DMIs zu integrieren. Diese Erkenntnisse lassen bereits abschätzen, in wie fern sich konkrete Kontrollstrategien, wie zum Beispiel die Intonation durch haptisches Feedback verbessern lassen. Hinzu kommen integrative Prozesse der kognitiven Verarbeitung von Sinneseindrücken. Diese bilden die Grundlage einer ganzheitlichen Wahrnehmung und sind deshalb ebenfalls bei der Gestaltung von DMIs zu berücksichtigen. Wird dieses Wissen in Modelle der Mensch-Maschine Interaktion mit DMIs übertragen, ermöglicht dies die Erarbeitung von Design-Guidelines sowie die empirische Evaluation von haptischem Feedback in digitalen Musikinstrumenten. In dieser Arbeit wird der aktuelle Stand der Forschung in diesem Themenbereich dargestellt und diskutiert. Unter Zuhilfenahme von Forschungsergebnissen aus Psychologie, Musikwissenschaft und Design wird dieses interdisziplinäre Themengebiet dargestellt und unter dem Blickwinkel des angewandten Forschungszweiges der Mensch-Maschine Interaktion integriert.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
Inhaltsverzeichnis	3
Einleitung	4
Digitale Musikinstrumente	6
Fehlendes haptisches Feedback	8
Musiker im Kontext multisensorischer Wahrnehmung	9
Haptische Wahrnehmung im Allgemeinen	10
Musiker und haptische Reizinformationen	10
Der Nutzen taktiler Wahrnehmung am Beispiel der Intonation	11
Weitere psychophysikalische Eigenschaften der taktilen Wahrnehmung	13
Integrierte Sinneswahrnehmung – audio-haptische Korrelation	15
Bedeutung der Sinnesintegration in der Konzeption von DMIs	16
Haptisches Feedback in digitalen Musikinstrumenten	18
Modelle der Mensch-Maschine Interaktion für digitale Musikinstrumente	18
Design-Strategie für die Integration von taktilem Feedback	20
Evaluation von digitalen Musikinstrumenten	20
Empirische Ergebnisse zur Evaluation von haptischem Feedback in DMIs	22
Diskussion	24
Literaturverzeichnis	28

Einleitung

Die Interaktion eines Musikers mit seinem Instrument ist von multisensorischer Natur. Beim Musizieren mit klassischen Musikinstrumenten werden die verschiedenen Sinneswahrnehmungen für unterschiedliche Aufgaben, die der musikalischen Expressivität nützlich sind, verwendet. Beispiele dazu sind die auditive Wahrnehmung der Tonhöhe für die Überwachung der Intonation oder die Steuerung von rhythmischen Bewegungen durch die Empfindung kinästhetischer Reize. Digitale Musikinstrumente (DMIs) unterscheiden sich von klassischen Musikinstrumenten. Bei DMIs handelt es sich um Musikinstrumente mit einem vom Kontrollinterface trennbaren Klangerzeuger (Malloch, Birnbaum, Sinyor, & Wanderley, 2006). Die Klangerzeugung wird dementsprechend als *synthetisch* bezeichnet. Da DMIs im Vergleich zu klassischen Musikinstrumenten kein natürliches Feedback, wie z. B. die Vibration des Resonanzkörpers bei einem Cello liefern, muss dieses künstlich erzeugt werden (Bongers, 2000). Um ein solches Feedback sinnvoll zu gestalten, stellen sich diverse Fragen. Zu Beginn ist eine Auseinandersetzung mit den Eigenschaften und dem Nutzen des haptischen Feedbacks notwendig. So konnte unter anderem gezeigt werden, dass Musiker taktile Sinneseindrücke für die Kontrolle ihres musikalischen Ausdrucks verwenden (Chafe & O'Modhrain, 1996; Sundberg, 1979). Järveläinen, Papetti, Schiesser und Grosshauser (2013) gehen davon aus, dass das Zusammenwirken von taktilen, auditiven und kinästhetischen Reizinformationen eine zentrale Rolle in musikalischen Darstellungen mit akustischen Instrumenten spielt. Askenfelt und Jansson (1992) stellten die Frage nach dem Nutzen der wahrgenommenen Vibrationen von akustischen Instrumenten. Sie kommen zum Schluss, dass Vibrationen, insbesondere Bassinstrumentalisten, im Spielkontext eines Ensembles in der Intonation unterstützen. In grösseren Formationen sei es manchmal schwierig, das eigene Instrument klar zu hören. Weiter bemerken die Autoren, dass Pianisten die Wahrnehmung kinästhetischer Kräfte für die Steuerung der Rhythmik verwenden. Darüber hinaus vermittele Vibration das Gefühl eines Resonanz erzeugenden und auf die spezifische Interaktion

antwortenden Objektes. Dies gibt dem Musiker ein stärkeres Gefühl der Verbundenheit mit dem Instrument (Askenfelt & Jansson, 1992).

Järveläinen et al. (2013) konstatieren, dass die Entwicklung von erweiterten Musikinstrumenten einer Subklasse von DMIs oft fixiert auf Routine und Intuition sei. Dies führe zur Produktion von Unikaten. Selten werde ein systematischer Ansatz, wie z. B. die Erarbeitung von generellen Guidelines, in Betracht gezogen. Um dies zu „überwinden“, propagieren die Autoren einen wissenschaftlich fundierten, interdisziplinären Ansatz, welcher Experten aus Forschungsfeldern der Mensch-Maschine Interaktion, Musik, angewandter Psychologie und Ingenieurwissenschaften beinhalten soll. Als Ziel ihrer Arbeit definieren Järveläinen et al. (2013) die Identifizierung von Gesten und Aufgaben, bei welchen die auditive und taktile Wahrnehmung als wesentlich für die musikalische Darstellung gelten. Weiter wollen sie, basierend auf diesem Wissen, Guidelines für die Implikation von erweiterten Musikinstrumenten etablieren.

Als Einstieg in die Arbeit wird in den Begriff der digitalen Musikinstrumente eingeführt. In einem weiteren Schritt wird betrachtet, welchen Stellenwert die unterschiedlichen Sinnesqualitäten beim Musizieren einnehmen. Dabei liegt der Fokus dieser Arbeit auf der haptischen Wahrnehmung und insbesondere der Rolle der taktilen Empfindungen. Nach einer begrifflichen Erörterung wird anhand der Analogie zu klassischen Musikinstrumenten und am konkreten Beispiel der Intonation aufgezeigt, worin der Nutzen einer Integration von haptischem Feedback in DMIs liegt. Mit der Betrachtung von grundlegenden Modellen der Mensch-Maschine Interaktion wird die konzeptuelle Vorgehensweise bei der Integration von haptischem Feedback beschrieben. Zum Schluss stellt sich die Frage, welche Möglichkeiten sich bieten, um den Nutzen von haptischem Feedback zu messen und es wird diskutiert, wie digitale Musikinstrumente durch haptisches Feedback verbessert werden können.

Digitale Musikinstrumente

Wanderley und Depalle (2004) definieren DMIs als computerbasierte Instrumente, die über Gestik gesteuert werden können und in Echtzeit computergenerierten Ton erzeugen. Die Kommunikation zwischen den beiden unabhängigen Komponenten (Interface und Computer) erfolgt in der Übertragung digitaler Protokolle, wie z. B. dem MIDI-Standard¹. Um digitale Musikinstrumente genauer einzugrenzen, ist die Betrachtung einer Klassifikation von Musikinstrumenten sinnvoll. Diese können auf unterschiedliche Weise eingeteilt werden. Da sich hier der Fokus auf Instrumente bzw. die Benutzerschnittstelle von solchen ohne natürliches haptisches Feedback richtet, eignet sich die Hornbostel-Sachs-Systematik (Sachs, 1965), eine physikalische Klassifikation. Sachs unterscheidet seit 1948 fünf Hauptgruppen von Instrumenten anhand der Art des schwingenden Körpers. Digitale Musikinstrumente werden unter den sogenannten elektrophenen Instrumenten („Stromklinger“) aufgeführt. DMIs wiederum werden von Miranda und Wanderley (2006) nach ihrer Ähnlichkeit zu bestehenden (klassischen) Musikinstrumenten in vier Stufen unterteilt: (1) erweiterte Musikinstrumente (Abbildung 1), (2) instrumenten-ähnliche Benutzerschnittstellen (z.B. die Klaviatur eines E-Pianos), (3) instrumenten-inspirierte Benutzerschnittstellen und (4) alternative Benutzerschnittstellen (Abbildung 2). Um einen besseren Eindruck darüber zu geben, was digitale Musikinstrumente sind, werden im Folgenden zwei Beispiele dargestellt – das erste repräsentativ für den Beginn des vierstufigen Kontinuums von Miranda und Wanderley (2006) und das zweite für das Ende.

¹ MIDI steht als Akronym für Musical Instrument Digital Interface und bezeichnet die Spezifikation eines Kommunikationsschemas für digitale Musikgeräte. MIDI gilt als Industriestandard für digitale Musikinstrumente (Loy, 1985).



Abbildung 1. Das elektronisch erweiterte akustische Piano versetzt über Elektromagnete die Saiten in Schwingung (aus McPherson & Kim, 2013, S. 135).

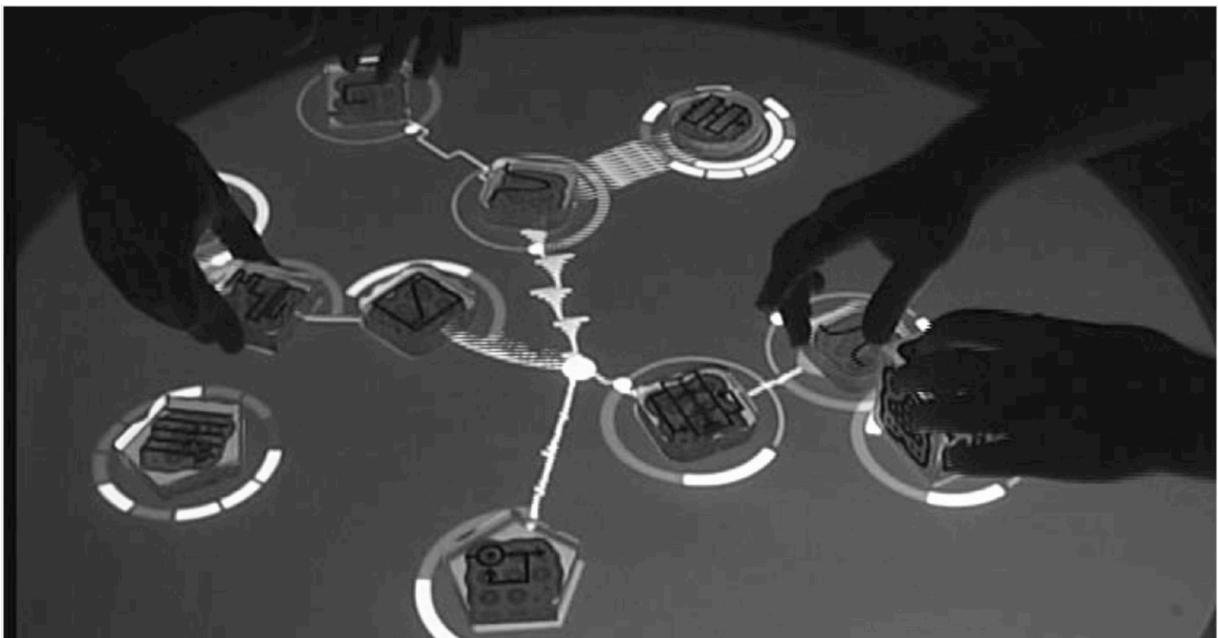


Abbildung 2. Der reactTable ist ein runder Tisch auf welchem mehrere Personen (Musiker) einen Klang-Output durch die Interaktion mit physischen Objekten, die verschiedene Klang- oder Rhythmusparameter darstellen, generieren (aus Jordà, Geiger, Alonso, & Kaltenbrunner, 2007, S. 142).

Fehlendes haptisches Feedback

Järveläinen et al. (2013) halten fest, dass DMIs trotz ihrer Fähigkeit verschiedene Inputgesten zu verwenden, haptisches Feedback – wenn überhaupt – nur als Nebenprodukt der eingebauten Mechanismen liefern. Auch Gunther und O’Modhrain (2003) bemerken, dass in vielen neuen digitalen Musikinstrumenten haptisches Feedback schwach oder gar nicht vorhanden sei. Der dadurch fehlende Link zwischen Künstler und DMI verhindere laut Järveläinen et al. (2013), dass ein vergleichbares Interaktionsgefühl wie mit klassischen Instrumenten zustande komme. Daraus folgern Järveläinen et al. (2013), dass zukünftige DMIs mit eingebautem, haptischem Feedback eine erweiterte Bespielbarkeit, mehr Darstellungsmöglichkeiten und eine höhere musikalische Expressivität begünstigen. Auch Marshall und Wanderley (2011) betonen, dass haptisches Feedback in „klassischen“ Musikinstrumenten zu einer engen Kopplung zwischen dem Künstler und seinem Instrument führe. Da in DMIs ein vergleichbares haptisches Feedback fehle, käme dieses enge Interaktionsgefühl selten zustande. Wofür Musiker haptische Reizinformationen konkret benötigen, wird im folgenden Kapitel genauer beleuchtet. Da Musiker für die Kontrolle ihres Ausdrucks vor allem auch ihr Gehör und die visuelle Wahrnehmung benutzen, wird als Nächstes versucht, eine Gewichtung der Sinnesmodalitäten vorzunehmen.

Musiker im Kontext multisensorischer Wahrnehmung

Die multisensorische Wahrnehmung ist die Basis von komplexen Kontrollstrategien, die es Musikern erlauben, ihr Spiel zu überwachen bzw. aktiv zu reflektieren und entsprechend anzupassen. Die meisten Autoren sind sich darüber einig, dass primär das Hören als Quelle von Informationen für unterschiedliche Kontrollstrategien dient. So hält Chafe (1993) fest, dass Informationen über den auditiven Kanal primären Charakter haben. Für Verrillo (1992) ist auditives Feedback die wichtigste Ressource der Kontrolle über Tonhöhe und Lautstärke. Er bemerkt aber, dass dieses oft nur begrenzt nutzbar ist, da es zu Störungen des auditiven Kanals kommen kann, wie zum Beispiel durch den Klang anderer Instrumente im Orchester. Auch Overholt, Berdahl und Hamilton (2011) betonen, dass sich Musiker stark auf das hörbare Feedback verlassen müssen. Trotzdem würden dem Musiker visuelle und haptische Informationen Orientierung in Bezug auf die Interaktion der Hände mit dem Interface bieten. Die visuelle Wahrnehmung gelte dabei beim Musizieren mit anderen Musikern als wesentlich für den Blickkontakt oder die Sichtkontrolle der Bewegungen der eigenen Hände und Beine. Chafe (1993) ordnet in einer Hierarchie der Wichtigkeit unterschiedlicher Sinneswahrnehmungen beim Musizieren die Haptik nach dem Hören als zweite essentielle Wahrnehmungsqualität ein. Als Beispiel nennt er das Cello, welches über fünf Kontaktpunkte mit dem Musiker taktil bzw. kinästhetisch verbunden ist (an beiden Beinen und Händen sowie der Brust). Loosch (2003) erachtet besonders die Hände für Musiker neben dem Gehör als essentiell. Er vergleicht die Belastungen der Hände des Musikers mit denen von Hochleistungssportlern. Die Hände beschreibt er als hochsensible Sinnesorgane – sensorisch und motorisch. An der Hautoberfläche ermöglichen insgesamt acht verschiedene Rezeptorarten die Wahrnehmung von Reizqualitäten, wie Tastempfindungen, Schmerz und Juckreiz, Wärme, Kälte, Querkräfte, Bewegungen der Hauthaare und Hautverformungen. Overholt et al. (2011) wiederum gehen davon aus, dass das haptische Feedback es dem Künstler erlaubt, am schnellsten auf das Verhalten des Musikinstrumentes zu reagieren.

Die haptische Wahrnehmung scheint also durchaus von entscheidender Bedeutung für Musiker zu sein. Das mögliche Kontinuum der Nützlichkeit reicht dabei von ergänzend bis unabdingbar (Chafe, 1993; Loosch, 2003; Overholt et al., 2011; Verrillo, 1992).

Um haptische Modalitäten erfolgreich in DMIs zu integrieren, stellen sich diverse Fragen: Es interessiert zuerst grundsätzlich, wodurch sich die haptische Wahrnehmung von den anderen Sinneswahrnehmungen unterscheidet und wofür Musiker sie konkret einsetzen können. In einem weiteren Schritt muss untersucht werden, ob der Nutzen von haptischem Feedback auf DMIs übertragen werden kann und wie dieser gemessen werden kann.

Haptische Wahrnehmung im Allgemeinen

Die haptische Wahrnehmung umfasst die taktile und die kinästhetische (auch propriozeptive) Wahrnehmung (Rovan & Hayward, 2000). Zur den taktilen Empfindungen gehören die Wahrnehmung von Druck, Konturen, Texturen, Oberflächenbeschaffenheit, reibungsbasierte Wahrnehmungen oder thermische Empfindungen. Entsprechend wird die taktile Empfindung von Schwingungen als „vibrotaktil“ bezeichnet. Kinästhetische Sinneswahrnehmungen betreffen die Fähigkeit, die Lage des Körpers, Bewegungen und Gewicht zu beurteilen. Spezifische Rezeptoren reagieren auf die Spannung der Muskeln und Sehnen oder die Bewegung der Gelenke. Neben der Beschreibung der genannten sensorischen Wahrnehmungen wird der Begriff der Haptik auch in Bezug auf die Motorik verwendet. Um zum Beispiel Objekte mit den Händen zu ertasten, sind Sensorik und Motorik gleichzeitig erforderlich (Hayward, Astley, Cruz-Hernandez, Grant, & Robles-De-La-Torre, 2004).

Musiker und haptische Reizinformationen

Musiker steuern aktiv ihre musikalische Expressivität bzw. ihren Ausdruck. Die Kontrolle darüber erreichen sie durch eine konstante Verhaltensreflektion. Dabei gelten haptische Sinneseindrücke als sehr wichtig. So bezeichnen Rován und Hayward (2000) die haptische Wahrnehmung als zentralen Sinneskanal für die Performance mit einem Musikinstrument.

Musiker beurteilen Resonanz und Genauigkeit ihres Spiels über die haptische Wahrnehmung. Die Bedeutung sei so zentral, weil die motorische Kontrolle nicht von der haptischen Wahrnehmung getrennt werden könne (Rovan & Hayward, 2000). So wird zum Beispiel die Bewegung eines Fingers laufend über die Verarbeitung von sensorischen Informationen kontrolliert und mittels der Motorik angepasst. Die Haptik ist unter dieser Betrachtung verantwortlich für das Funktionieren rudimentärer, reflexiver Prozesse und damit Grundlage von komplexen motorischen Reaktionen. Bis sich ein Musiker voll und ganz auf seine haptische Wahrnehmung verlassen kann, scheint er über einiges an Übung verfügen zu müssen. Denn Keele (1973) konnte zeigen, dass Anfänger häufiger Gebrauch von visuellem Feedback machen als Profis, die ihr Instrument hauptsächlich über taktile und kinästhetische Sinnesempfindungen kontrollieren. Keele (1973) erklärt weiter, dass nur das haptische Feedback schnell genug sei, um dem Künstler die Kontrolle über die musikalische Expression zu ermöglichen. Auch Rován und Hayward (2000) gehen davon aus, dass haptische Feedbackkanäle psychologisch und physiologisch schneller als die visuelle Informationsverarbeitung gekoppelt sind.

Der Nutzen taktile Wahrnehmung am Beispiel der Intonation.

Bongers (2000) bezeichnet den Tastsinn als wichtige Informationsquelle über den Klang, da die Manipulation eines Musikinstrumentes zu Beginn des Prozesses der Klangerzeugung steht. Er beschreibt daher taktiles Feedback auch als artikulatorisches Feedback. Damit ist gemeint, dass zum Beispiel ein Pianist, wenn er eine Taste drückt, über das taktile Feedback wahrnehmen kann, wie fest er diese drückt. O'Modhrain (2001) berichtet über den Umstand, dass die taktile Wahrnehmung der Selbstüberwachung in musikalischen Darbietungen dient. Die Selbstüberwachung basiert auf Prozessen, welche als Kontrollstrategien bezeichnet werden können und ermöglichen es dem Musiker in der Darstellung „Höchstleistungen“ zu erzielen (Järveläinen et al., 2013). Als Beispiele für solche Kontrollstrategien werden Intonation, Timing, die Kontrolle der Lautstärke oder die Steuerung der Klangfarbe genannt

(Järveläinen et al., 2013; O'Modhain, 2001). Die Intonation bezieht sich auf die komplexe Anpassung der Tonhöhe (Mürbe, Pabst, Hofmann, & Sundberg, 2002). Die Grundlage für ein erfolgreiches Intonieren ist dementsprechend eine optimale Wahrnehmung der Tonhöhe. Die Tonhöhenwahrnehmung kann als Sensitivität zur Frequenz eines Stimulus beschrieben werden (Roy & Hollins, 1998). Birnbaum und Wanderley (2007) erachten sie als fundamental und schreiben ihr sowohl auditiv als auch vibrotaktile eine essentielle Bedeutung zu. Trotzdem sei gerade die vibrotaktile Wahrnehmung der Tonhöhe begrenzt. Einerseits ist die wahrnehmbare Bandbreite an Frequenzen in diesem Sinneskanal klein und die Genauigkeit der Unterscheidung von Tonhöhen schlechter als auditiv (vgl. Verrillo, 1992). Verrillo (1992) untersuchte die Frage, ob Musiker vibrotaktile Empfindungen ergänzend zur auditiven Wahrnehmung für die Kontrolle der Intonation benutzen. Verrillo begründet den Fokus auf das taktile System mit Gemeinsamkeiten zum auditiven System. Beide Sinnesqualitäten basieren auf Rezeptoren, die auf mechanische Veränderungen reagieren und Musik stelle im Grunde genommen eine mechanische Veränderung der Umwelt dar. Verrillo konnte zeigen, dass die Sensitivität der Erkennung von Schwingungen in der Handfläche bei einer Frequenz von 250 Hz ein Maximum erreicht. Eine Zunahme der Sensitivität wurde im Bereich von 40 bis 250 Hz und eine starke Abnahme im Bereich von 250 bis 1000 Hz gemessen.

Im Vergleich dazu liegt der wahrnehmbare Frequenzbereich des Gehörs zwischen 20 und 20'000 Hz (Bear, Connors, & Paradiso, 2009) mit einer maximalen Sensitivität bei 3000 – 4000 Hz (Verrillo, 1992). Viele Instrumente beginnen erst bei rund 500 Hz, was die Verwendung von vibrotaktilem Feedback zum Intonieren in Frage stellt. Verrillo (1992) kommt aber trotzdem zum Schluss, dass für Sänger und Orchesterinstrumente vibrotaktilen Feedback bis zu einer Frequenz von 1000 Hz in begrenztem Ausmass nützlich für die Kontrolle der Intonation sein könne. Rován & Hayward (2000) zeigen auf, dass im Frequenzbereich von 70 bis 800 Hz taktile zwischen acht bis zehn Stufen unterschieden werden können. Verrillo (1992) verweist zudem auf unterschiedliche qualitative

Wahrnehmungen von bestimmten Frequenzbereichen. Tiefe Frequenzen unter 100 Hz werden als „brummend“ und auf der Haut klar lokalisierbar beschrieben. Höhere Frequenzen werden als diffus, weniger klar lokalisierbar und sanfter wahrgenommen. Daraus lässt sich ableiten, dass vibrotaktiler Feedback mindestens ergänzend hilfreich bei der Intonation sein kann.

Birnbaum und Wanderley (2007) untersuchten unter anderem die vibrotaktilen Eigenschaften der Tonhöhenwahrnehmung für die Erarbeitung eines Designkonzepts zu vibrotaktiler Feedback in DMIs. Die Autoren kommen zu Schluss, dass DMIs dadurch ihren akustischen „Vorfahren“ ähnlicher werden. Auf diese Studie wird unter dem Punkt *Design-Strategie* genauer eingegangen. Im folgenden Abschnitt werden weitere psychophysikalische Eigenschaften der taktilen Wahrnehmung dargestellt, welche die Wichtigkeit ihrer Berücksichtigung bei der Gestaltung von DMIs unterstreichen. Mit der Illustration des somatosensorischen Homunculus werden die hochsensiblen taktilen Zentren beim Menschen ersichtlich.

Weitere psychophysikalische Eigenschaften der taktilen Wahrnehmung.

Es konnte experimentell bestätigt werden, dass eine zunehmende taktile Sensitivität mit einer höher werdenden Temperatur zusammenhängt (Bolanowski & Verrillo, 1982; Verrillo & Bolanowski, 1986). Alter und taktile Sensitivität sind hingegen negativ korreliert (Gescheider, Bolanowski, Hall, Hoffman, & Verrillo, 1994), wobei der Sensitivitätsverlust ab einem Alter von 65 Jahren höher ist als davor. Diese Abnahme kann vermutlich durch die Verminderung der Dichte der Rezeptoren in der Haut erklärt werden (Bolton, Winkelmann, & Dyck, 1966). Geschlechterunterschiede treten ab einem Alter von 65 Jahren auf, wobei Frauen eine höhere Sensitivität aufwiesen als Männer. Diese kommen laut Bolton et al. (1966) durch einen höheren Verlust eines bestimmten Mechanorezeptortypes bei Männern ab 65 Jahren (der Meissnerschen Zellen) zustande. Die Qualität der taktilen Wahrnehmung in unterschiedlichen Regionen des Körpers ist bedingt durch die Dichte der Rezeptoren und die korrespondierende neuronale Repräsentation.

Die illustrative Darstellung des *neuronalen Homunculus* (Abbildung 3) entsteht, wenn die Körperteile eines Menschen in Relation auf die Grösse der für die Sensorik bzw. Motorik relevanten Hirnareale (somatosensorischer und motorischer Cortex) abgebildet werden. Im entstandenen Bild sind die taktilen Zentren ersichtlich, die neuronal stark repräsentiert und damit hochempfindlich sind. Der Homunculus verdeutlicht die hohe taktile Sensitivität der Hände und Lippen, welche in der Interaktion mit Musikinstrumenten besonders wichtig sind. Der motorische Homunculus gleicht dem somatosensorischen, was den engen Zusammenhang von Haptik bzw. Sensorik und Motorik aufzeigt. Bei Musikern scheinen zudem die dafür spezifischen Areale im Gehirn noch deutlicher ausgeprägt zu sein. Eine bildgebende Studie mit Pianisten zeigt, dass die graue Substanz unter anderem in somatosensorischen und motorischen Arealen grösser sind als bei Nicht-Musikern (Gaser & Schlaug, 2003). Diese Areale sind mit der Tastwahrnehmung und der Steuerung der Hände assoziiert.

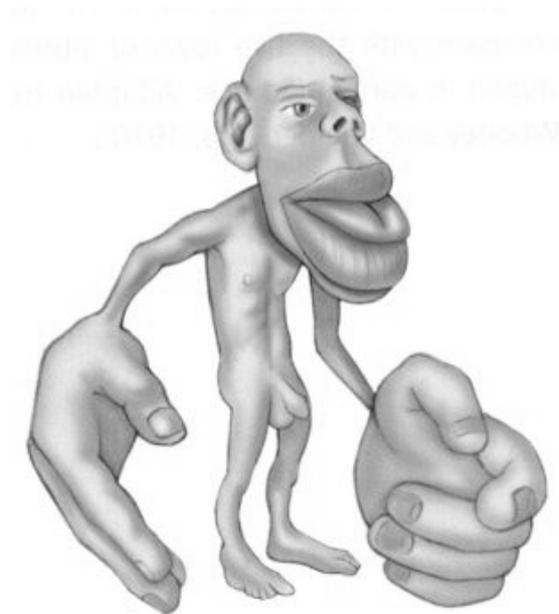


Abbildung 3. Illustrativer somatosensorischer Homunculus (aus Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A., 2009, p. 445, Abb. 12.19)

Integrierte Sinneswahrnehmung – audio-haptische Korrelation

Die Autoren Lagarde und Kelso (2006) bemerken, dass in der Wahrnehmungsforschung nach der Jahrtausendwende Forschung zur multisensorischen Sinnesintegration an Prominenz gewonnen hat. Obwohl die Sinne als einzelne isolierte Entitäten bestehen, sei das Wissen darüber, wie sie eine ganzheitliche Erfassung der Umwelt formen, bisher nicht gründlich erforscht. Die ganzheitliche Sinneswahrnehmung ermöglicht es dem Menschen, sich in der Umwelt zu orientieren. Dadurch können wir unser Verhalten mittels konstanter Reflexion der bewussten und unbewussten Wahrnehmung von Sinnesreizen den gegebenen Umständen anpassen (Bresciani et al., 2005). Unser Verhalten wird also in der Regel über die Wahrnehmung verschiedener Sinne gesteuert. Eine Handlung, wie zum Beispiel an eine Türe klopfen, wird in ihrer Ausführung über visuelles, auditives und taktiles Feedback kontrolliert. Wird ein Kanal dabei gestört, ist es wahrscheinlich, dass das zentrale Nervensystem die Wahrnehmungen der anderen Sinnesmodalitäten benutzt, um diese zu einer als kohärent empfundenen Wahrnehmung zu integrieren. Damit wird sichergestellt, dass die Wahrnehmung der Umwelt einer gewissen Ordnung unterstellt ist (vgl. Ro, Ellmore, & Beauchamp, 2012).

Ro et al. (2012) gehen davon aus, dass sich der Hörsinn evolutionär aus dem Tastsinn entwickelt haben könnte. Diese Annahme ist nicht abwegig, denn beide Wahrnehmungsqualitäten (taktil und auditiv) reagieren auf Vibration. Die gemeinsame Herkunft beider Sinne könne laut den Autoren auch ein Grund für die stark integrierte Wahrnehmung bestimmter Geräusche sein. Zum Beispiel führe das Kratzen mit den Fingernägeln an einer Wandtafel oft zu starken körperlichen Empfindungen („Gänsehaut“).

Motiviert durch Untersuchungen zur visuell-auditiven Sinnesintegration untersuchten Bresciani et al. (2005), wie akustische Signale die taktile Wahrnehmung beeinflussen. Probanden wurden an der Fingerspitze berührt und waren gleichzeitig akustischen Stimuli („Beeps“) ausgesetzt. Wurde entweder ein akustisches Signal mehr oder eines weniger

gegeben, als korrespondierend die Fingerspitze berührt wurde, beeinflusste dies die Wahrnehmung insofern, dass Probanden jeweils signifikant von mehr oder weniger Berührungen berichteten, obwohl sich die tatsächliche Anzahl dieser nicht veränderte. Dieses Ergebnis bestätigt die Beeinflussung der taktilen Wahrnehmung durch die auditive Sinnesverarbeitung. Altinsoy (2012) berichten von ähnlichen taktilen Illusionen, die durch veränderte akustische Signale induziert werden können. In ihrem Experiment mit einem elektronischen Schlagzeug, führte die Erhöhung der Lautstärke zu einem stärker empfundenen taktilen Feedback, obwohl dieses konstant gleich gehalten wurde.

O'Modhrain und Essl (2004) beeinflussen mit ihrer *PebbleBox* die Wahrnehmung von Eigenschaften physischer Objekte durch die Variation von auditivem Feedback. Die *PebbleBox* ist eine Holzkiste, welche mit Kieselsteinen gefüllt ist. Mit einer Hand kann der Benutzer mit den Kieselsteinen interagieren. Ein Mikrofon in der Box registriert dabei das akustische Resultat dieser Interaktion. Der Klang kann digital so verändert werden, dass die Bewegung der Kieselsteine einmal so tönt, als wäre die Box mit Wasser und ein anderes Mal mit Eiswürfeln gefüllt. Franinovic und Salter (2013) schildern, dass sich die Empfindung der jeweils gleichen Kieselsteine in Abhängigkeit des unterschiedlichen auditiven Feedbacks für den Benutzer verändert.

Bedeutung der Sinnesintegration in der Konzeption von DMIs.

Die integrierte Sinneswahrnehmung hat beim Spielen von „klassischen“ Instrumenten mit natürlichem Feedback (z. B. die Resonanz des Klangkörpers) eine entscheidende Funktion. Multisensorisch wahrnehmbare Reize, die einen gemeinsamen Ursprung haben, werden durch das zentrale Nervensystem automatisch integriert (Bresciani et al., 2005). Dieser Prozess optimiere die Wahrnehmung insofern, dass redundante Informationen ausgeblendet werden. Die konstante Kontrolle bzw. Reflexion des musikalischen Ausdrucks ist nur dadurch möglich, dass einzelne Handlungen über audio-haptisches und visuelles Feedback immer wieder neu wahrgenommen und beurteilt werden können. In klassischen Musikinstrumenten

korreliert das haptische Feedback auf natürliche Weise mit dem auditiven Feedback. Bei DMIs muss dieses künstlich erzeugt werden. Welche korrespondierenden Reize haptisch dargestellt werden sollen, ist von entscheidender Bedeutung, da damit der Fokus der Wahrnehmung von bestimmten Eigenschaften, wie z. B. die Tonhöhe verbessert werden kann. Die Ergebnisse von Bresciani et al. (2005) lassen vermuten, dass auditives und haptisches Feedback in einer bestimmten Art und Weise gekoppelt sein müssen, um die Reize richtig zu interpretieren. Die Autoren folgern aus ihren Ergebnissen, dass taktile Signale mit verzögerten auditiven Signalen besser integriert werden, als wenn diese zeitlich früher wahrgenommen werden. Sie schreiben dies dem Umstand zu, dass akustische Reize im Alltag im Vergleich zu taktilen Empfindungen generell verzögert sind, da Schall eine gewisse Zeit benötigt, bis er das Ohr erreicht. Wenn dies in der Integration in DMIs berücksichtigt wird, kann die Interaktion möglichst authentisch gestaltet werden. Denn die Wahrnehmung sei an erlernten physikalischen Gesetzmässigkeiten der Umwelt ausgerichtet (Bresciani et al., 2005). Auch die gezielte Nutzung von taktilen Illusionen (vgl. Altinsoy, 2012) spielt in der Konzeption von DMIs eine wichtige Rolle. Dadurch kann wie die Studie bestätigt die Wahrnehmung von Kräften erheblich beeinflusst werden. Dies könnte wiederum das Verhalten des Musikers verändern.

Haptisches Feedback in digitalen Musikinstrumenten

Grosshauser und Hermann (2009) begründen den Zusatz von haptischen Feedback-Systemen mit drei Punkten: Zusätzliche haptische Informationen (1) stören die visuelle Sinneswahrnehmung nicht, welche beim Musizieren bereits durch das Notenlesen oder die Kommunikation mit Mitmusikern beschäftigt ist, (2) lenken in lauten bzw. bereits auditiv ausgelasteten Situationen, wie Konzerten, nicht ab und (3) ermöglichen es, das gegebene Feedback auf dasselbe Medium zu beziehen, welches als Output für das Musikinstrument dient. Für die Konzeption digitaler Musikinstrumente haben sich Interaktionskonzepte durchgesetzt, die in analoger Weise von klassischen Musikinstrumenten übernommen oder leicht abgeändert wurden. Entsprechend sind in der Klassifikation von DMIs von Miranda und Wanderley (2006) die Stufen 1-3 (siehe Seite 6) Vertreter dieser Konzept-Übernahmen. Als Paradebeispiel dafür steht das elektronische Piano (in Abgrenzung zum elektrischen Piano), bei welchem das Interaktionskonzept der Klaviatur 1:1 übernommen wurde. Eine entsprechende bereits stark etablierte haptische Konzeptübernahme in digitalen Pianos ist die Tastengewichtung. Ähnliche Analogien können auch beim digitalen Schlagzeug sowie elektronischen Blas- und Saiteninstrumenten gefunden werden. Als Basis für diese Interaktionskonzepte werden häufig Modelle der Mensch-Maschine Interaktion herangezogen. Diese verdeutlichen die Zusammenhänge zwischen dem Benutzer (Musiker) und dem System (Musikinstrument).

Modelle der Mensch-Maschine Interaktion für digitale Musikinstrumente

Die Interaktion mit digitalen Musikinstrumenten bezeichnen Wanderley und Orio (2002) als einen hochspezialisierten Bereich innerhalb der Mensch-Maschine Interaktion (eng. *human-computer interaction, HCI*). Das Ziel der Interaktion mit einem digitalen Musikinstrument ist laut den Autoren die erfolgreiche bi-direktionale Kommunikation zwischen dem Künstler und dem Computer. Gemäss Bongers (2000) ist die Interaktion zwischen Mensch und Maschine bedingt durch Kontrolle und Feedback. Interaktion findet durch eine Schnittstelle statt, die

reelle Aktionen in digitale Signale umwandelt. Das System wiederum gibt dem Benutzer Feedback, um Kontrolle zu ermöglichen. Daraus entsteht ein klassischer Mensch-Maschine Interaktionskreislauf (Abbildung 4).

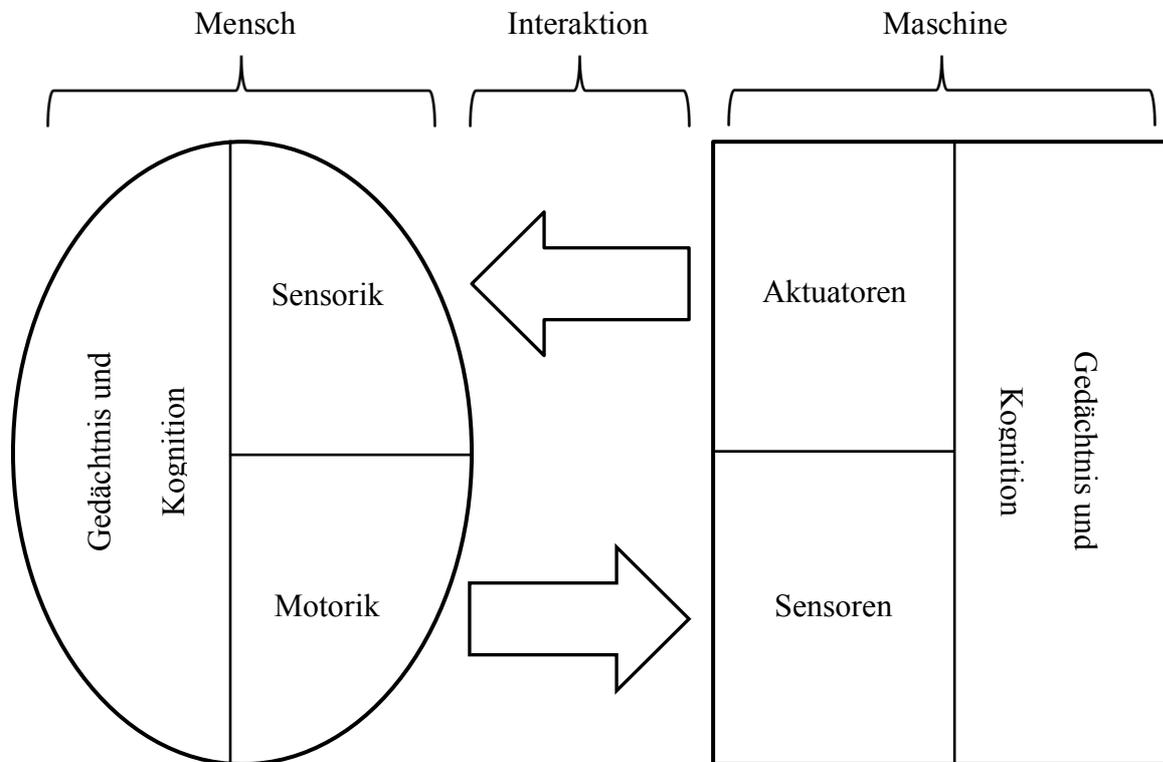


Abbildung 4. Modell der Interaktion eines Künstlers (*Mensch*) mit einem digitalen Musikinstrument (*Maschine*) (adaptiert nach Bongers, 2000).

Bongers (2000) beschreibt weiter, dass der Interaktionskreislauf beginnt, wenn der Benutzer das System aktiviert. Zum Beispiel drückt der Musiker eine Taste auf dem digitalen Piano (Motorik). Das System erfasst diesen Tastendruck durch Sensoren und verarbeitet diese Information (Gedächtnis und Kognition). Anschliessend generiert das System einen Output, der aus einem Ton und einem haptischen Feedback bestehen kann (Aktuatoren). Dies wird wiederum durch den Benutzer erfasst (Sensorik) und entsprechend interpretiert (Gedächtnis und Kognition). Die beidseitige Nennung von Gedächtnis und Kognition soll die Wichtigkeit intelligenter Systeme in DMIs hervorheben. Wenn dies das System nicht könne, verhalte es sich reaktiv, anstatt interaktiv (Birnbaum, 2007).

Design-Strategie für die Integration von taktilem Feedback

Birnbaum und Wanderley (2007) präsentieren eine Design-Strategie für musikalisches vibrotaktilen Feedback in DMIs unter der Berücksichtigung von psychophysikalischen Forschungsergebnissen zur vibrotaktilen Wahrnehmung. Die Autoren fordern, dass die Integration von vibrotaktilen Feedback in DMIs für Designer von hoher Priorität sein sollte. Damit die erzeugten Vibrationen für den Künstler als bedeutsam und eng mit dem Klangfeedback verbunden wahrgenommen werden, wird von den Autoren das vibrotaktile System erörtert. In ihrem Modell berücksichtigen sie vier Dimensionen: (1) die Wahrnehmung der Tonhöhe (*pitch*), (2) die Wahrnehmung der Lautstärke (*loudness*), (3) die Wahrnehmung der Klangfarbe bzw. -helligkeit (*brightness*) und (4) die Wahrnehmung der Hüllkurve bzw. der Verlauf der Amplitude (*envelope*). Diese Dimensionen wenden sie auf das psychophysikalische Vier-Kanal-Modell der Mechanorezeptoren der Tastempfindung von Bolanowski, Gescheider, Verrillo und Checkosky (1988) an. Das Modell beschreibt vier unterschiedliche Rezeptorarten. Diese unterscheiden sich in der Frequenzbandbreite, der Kurvenform und damit der Sensitivität gegenüber spezifischen Frequenzen, sowie der Reizqualität (Vibration oder Druck). Darauf basierend entwickelten die Autoren technische Spezifikationen für die Aktuatoren, die das taktile Feedback erzeugen.

Evaluation von digitalen Musikinstrumenten

In diesem noch sehr jungen Forschungsbereich existieren bisher wenige Standards bezüglich Evaluationsmethoden. Hauptsächlich werden verwandte Systeme, wie bewährte HCI-Methoden (z. B. „*think aloud*“) übernommen und auf gegebene Fragestellungen angepasst (O’Modhrain, 2011). Einen Versuch für einen methodischen Rahmen der Evaluation von DMIs wagt O’Modhrain (2011). Er reflektiert Arbeiten zu Evaluationskonzepten von DMIs und betont, dass evaluative Fragen im Bezug auf DMIs aus verschiedenen Perspektiven betrachtet werden müssen. Deshalb sei eine breitere Auslegung des Evaluationsbegriffes nötig, als dies HCI-typisch ist. O’Modhrain (2011) präsentiert ein an vier Anspruchsgruppen

ausgerichtetes methodologisches Raster für die Evaluation von digitalen Musikinstrumenten. Für die Evaluation von haptischen Modalitäten interessiert in erster Linie die vom Autor beschriebene Perspektive des Künstlers. Die anderen drei Anspruchsgruppen werden hier nicht näher erläutert. Künstler stellen laut O'Modhrain (2011) die wichtigste Anspruchsgruppe dar. Wenn ein Instrument nicht erfolgreich die musikalische Intention des Darstellers in Klang übersetzen könne, verfehle es seine fundamentale Funktion als Musikinstrument. DMIs sollten beispielsweise herausfordernd sein, damit könne die Förderung von Virtuosität begünstigt werden.

Wanderley und Orio (2002) wählen einen ähnlichen Ansatz, lehnen sich aber im Gegensatz zu O'Modhrain an methodische Grundlagen der Mensch-Maschine Interaktion an. Basierend auf ausgewählten Faktoren der Benutzerfreundlichkeit entwickeln sie spezifische musikalische Aufgaben. Diese möchten sie als Massstäbe verwenden. Die ausgewählten Faktoren der Benutzerfreundlichkeit sind: Erlernbarkeit, Explorierbarkeit, Kontrollierbarkeit von einzelnen Klangparametern (wie z.B. die Steuerung der Tonhöhe) sowie Kontrollierbarkeit vom Rhythmus (Timing). Basierend auf diesen Faktoren sehen Wanderley und Orio musikalische Aufgaben in folgenden Bereichen: Kontrolle der Tonhöhe (bzw. Intonation), musikalische Gesten (Vibrato, Glissandi, etc.), musikalische Phrasierung (Spielbarkeit von Skalen und Arpeggios in verschiedenen Tempi) und Kontrolle der Rhythmik (Genauigkeit des Spiels bei verschiedenen Rhythmen in unterschiedlichen Tempi). Für jede musikalische Aufgabe könne laut den Autoren ein möglicher Grad der Mehrstimmigkeit sowie eine subjektive Messung der Einfachheit erhoben werden. Für die Einschätzung der Erlernbarkeit erachten Wanderley und Orio (2002) die Messung der vorausgegangen Übungszeit als sinnvolle Grösse.

Empirische Ergebnisse zur Evaluation von haptischem Feedback in DMIs.

Empirische Evaluationsstudien zu DMIs sind zurzeit noch Rarität. Insbesondere die Evaluation von haptischem Feedback in DMIs. Eine der wenigen Studien darüber liefern Marshall und Wanderley (2011). Sie haben speziell für künftige evaluative Studien zu vibrotaktilen Feedback in DMIs den „Viblotar“ entwickelt - ein DMI im Monochord-Design², das mit zwei Händen gespielt werden kann. Um vibrotaktilen Feedback zu generieren, wurden im „Viblotar“ zwei kleine Boxen integriert, die den Resonanzkörper des Instrumentes in Schwingung versetzen. Die Idee dieser Form von taktilen Feedback entnahmen Marshall und Wanderley (2011) konzeptuell von einem klassischen Musikinstrument, wie z. B. einer akustischen Gitarre, die ebenfalls über einen schwingenden Resonanzkörper verfügt. Die Autoren liessen den „Viblotar“ von fünf Versuchspersonen testen. Um das Spielgefühl des Instrumentes zu bewerten, liessen Marshall und Wanderley (2011) die Versuchspersonen fünf Charakteristika einschätzen. Die Manipulation bestand darin, dass jeweils vibrotaktilen Feedback ein- oder ausgeschaltet war. Eine Versuchsperson wurde dabei jeweils beiden Bedingungen ausgesetzt (*within-subject design*). Folgende fünf Dimensionen wurden bewertet: (1) Bewertung der Einfachheit der Bedienbarkeit (*Ease of use*), (2) gefühlte Kontrolle über das Instrument (*Controllability*), (3) wie stark die Aufmerksamkeit in das Spiel des Instrumentes eingebunden wurde (*Engagement*), (4) wie unterhaltend das Instrument war (*Entertainment*) und (5) wie viel Potential im Instrument für künftige Darstellungen gesehen wurde (*Potential for further performance*). Die Resultate deuten darauf hin, dass vibrotaktilen Feedback in DMIs eine verstärkte Kopplung des Künstlers mit dem Instrument begünstigt (Charakteristikum 3: *Engagement*). Die Autoren berichten ebenfalls von einem leicht höheren „Unterhaltungsfaktor“ (Charakteristikum 4: *Entertainment*). Erstaunlicherweise wurde der Faktor „Kontrolle“ (Charakteristikum 2: *Controllability*) bei gegebenem vibrotaktilen

² Das Monochord ist ein länglicher Resonanzkasten, der mit mindestens einer Saite bespannt ist. In der Antike wurde es als Messinstrument zur Darstellung von musikalischen Intervallen (Noltensmeier & Massenkeil, 1996)

Feedback weniger stark wahrgenommen. Die Autoren meinen hier, dass dieses Resultat möglicherweise ein Artefakt sei, schliessen aber auch andere Gründe nicht aus. Dass der Faktor der erlebten Kontrollierbarkeit des Instrumentes nicht erhöht wurde, erklären die Autoren mit Bezug auf Keele (1973). Keele geht davon aus, dass professionelle Musiker vibrotaktilen Feedback häufiger benutzen würden als Anfänger. Im Experiment von Marshall und Wanderley (2011) handelte es sich um Anfänger. Dies lässt laut den Autoren die Möglichkeit offen, dass es zusätzliches haptisches Feedback für Anfänger schwieriger macht, mit einem Instrument zu spielen.

In einer explorativen Evaluationsstudie zur Rolle von vibrotaktilem Feedback bei Musikinstrumenten untersuchte Birnbaum (2004) subjektive Einschätzungen von Musikern zum Spiel mit der *Touch Flute*. Diese ist ein digitales Musikinstrument, basierend auf der Idee eines akustischen Holzblasinstrumentes. Aktuatoren für taktiles Feedback wurden in Tasten, die mit den Fingerspitzen bedient werden sowie in das Mundstück eingebaut. Die Kontrolle der Lautstärke erfolgt über Messung des Atemdrucks und die Kontrolle der Tonfrequenz über die Bedienung vier möglicher Tastenpositionen. In der Versuchsanordnung wurde das taktile Feedback entweder ein- oder ausgeschaltet. Die befragten Musiker fühlten sich mit gegebenen haptischen Reizen stärker mit der *Touch Flute* verbunden. Das Instrument wurde als verbessert in Bezug auf das natürliche Verhalten beurteilt. Ohne taktiles Feedback wurde das Interaktionsgefühl als kalt oder distanziert beschrieben.

In einer weiteren explorativen Studie wurde vibrotaktilen Feedback in einem digitalen Piano evaluiert (Fontana, Civolani, Papetti, del Bello, & Bank, 2011). Gefragt wurde dabei nach der erlebten Klangqualität. Das vibrotaktile Feedback wurde durch zwei zusätzlich eingebaute Bass-Vibrationserzeuger dargeboten. Die Resultate zeigen, dass vibrotaktilen Feedback eine signifikante Verbesserung der Klangwahrnehmung bewirkte.

Diskussion

Die Erforschung der Integration von haptischen Modalitäten in digitale Musikinstrumente liegt im Trend. Dies nicht zuletzt, weil die technologischen Voraussetzungen heute günstig sind (Birnbaum & Wanderley, 2007). Des Weiteren sind sich verschiedene Autoren einig, dass digitale Musikinstrumente durch haptisches Feedback verbessert werden können (Chafe & O'Modhrain, 1996; Järveläinen et al., 2013; Sundberg, 1979). Musiker verwenden haptisches Feedback für diverse Faktoren, welche die musikalische Expressivität oder ein positives Interaktionsgefühl mit dem Instrument begünstigen. Weitere häufig genannte Faktoren sind die Kontrolle der Tonhöhe (Intonation), der Lautstärke oder der Rhythmik. Zudem scheint haptisches Feedback das positive Spielgefühl im Bezug auf die Verbundenheit mit dem Instrument sowie die Klangwahrnehmung zu begünstigen.

Psychophysikalische Betrachtungen spielen eine wichtige Rolle im Interfacedesign (Birnbaum, 2007). Die Integration von haptischem Feedback in DMIs sei nur dann effektiv, wenn die spezifischen Wahrnehmungseigenschaften haptischer Stimuli berücksichtigt werden. Birnbaum verweist auf Faktoren, wie die Wahrnehmungsschwelle haptischer Reize, den Komfort sowie die zeitliche Veränderungen von Reizen. Birnbaum und Wanderley (2007) entwickelt basierend auf einem psychophysikalischen Modell eine Designstrategie für taktilen Feedback. Diese Vorgehensweise begründen sie in einer Analogie zum auditiven Feedback. Die Gestaltung dessen sei nur unter der Berücksichtigung von psychoakustischen Modellen effektiv. Deshalb fordern sie, dass die Integration von haptischem Feedback auf dem Verständnis der haptischen Wahrnehmung aufbaut. Ohne dieses Wissen könne haptisches Feedback nicht adäquat gestaltet werden (Birnbaum, 2007). Damit gemeint ist unter anderem die Kenntnis von Wahrnehmungsschwellen unterschiedlicher Vibrationen. Basierend auf diesen Grundlagen, die unter anderem von Rovin und Hayward (2000), Verrillo und Bolanowski (1986) oder Verrillo (1985, 1992) erarbeitet wurden, können Ableitungen für spezifische nützliche Faktoren getroffen werden, wie zum Beispiel die

Verbesserung der Intonation. Die Erkenntnisse zeigen aber auch die Grenzen von dieser Form des Feedbacks auf. Die taktile Wahrnehmung verfügt im Vergleich zum auditiven Kanal über eine geringe Sensitivität gegenüber Frequenzen. Dies lässt vermuten, dass sich taktile Empfindungen weniger gut für die Kontrolle der Intonation eignen. Wenn dann würden Bassinstrumentalisten am meisten davon profitieren (Askenfelt & Jansson, 1992). Trotzdem scheinen aber auch professionelle Violinisten die Vibration als Form des Feedbacks zu schätzen. So gibt es Aussagen von Profis, dass sie beim Spiel stets ein schulterfreies Kleid tragen (Askenfelt & Jansson, 1992). Dementsprechend werden im Zusammenhang mit haptischem Feedback verschiedene Faktoren genannt, welche die Interaktion positiv beeinflussen sollen. Das Beispiel der Intonation zeigt aber auch, dass die haptische Wahrnehmung begrenzt ist. Darum braucht es ein besseres Verständnis darüber, welche Faktoren wichtiger sind als andere und wie gross der Beitrag der Haptik in den verschiedenen Kontrollstrategien ist.

Eine Lösung für dieses Problem liefern evaluative Ansätze. Dazu sind zurzeit wenige empirische Forschungsergebnisse vorhanden. Künftige Evaluationsstudien, die mittels der Messung von musikalischen Aufgaben den Nutzen der Haptik genauer differenzieren, könnten dies ändern (vgl. Wanderley & Orió, 2002). Darüber hinaus wäre der mögliche Nutzen dann auch quantifizierbar und könnte in adäquater Weise den Kosten einer Implikation von haptischen Technologien in DMIs gegenübergestellt werden. Für die Betrachtung eher genereller Messkonstrukte, ist der Evaluationsansatz von Marshall und Wanderley (2011) interessant. Aussagen darüber, wie einfach das Instrument zu spielen ist, die generell gefühlte Kontrolle und die wahrgenommene Verbundenheit mit dem Instrument sind damit möglich. Dabei ist zu beachten, dass diese Konstrukte im Vergleich zu musikalischen Aufgaben stärker von subjektiver Natur sind, da sie von persönlichen und ästhetischen Urteilen abhängen (Wanderley & Orió, 2002). Gerade hier wären objektivierbare Ansätze nötig, wie z. B. die Anwendung standardisierter Fragebögen, um subjektive Urteile zu

unterstützen. Methodisch ist an der Studie von Marshall und Wanderley (2011) zu kritisieren, dass die Stichprobe mit fünf Versuchspersonen eher klein ist. Die dadurch mit Vorsicht zu interpretierenden Resultate deuten darauf hin, dass haptisches Feedback zu einer stärker erlebten Verbundenheit mit dem Instrument führt.

Vorerst kontraintuitiv ist, dass sich die zusätzliche haptische Information möglicherweise negativ auf die erlebte Kontrolle über das Instrument auswirkt (Marshall & Wanderley, 2011). Laut McDermott, Gifford, Bouwer und Wagy (2013) werden Musikinstrumente nicht zwingend verbessert, wenn sie einfacher zu benutzen sind. Gerade die Schwierigkeit ein bestimmtes Level an Professionalität auf einem Musikinstrument zu erreichen, sei eine wichtige Herausforderung und Motivation beim Musizieren. Dafür spricht der Bildungshintergrund und damit verbundene Trainingsaufwand von professionellen Orchesterinstrumentalisten. Diese Betrachtung stellt die Messung der Einfachheit der Benutzung von Marshall und Wanderley (2011) generell in Frage. Weiter zeigt die Kritik von McDermott et al. (2013), dass HCI-Konzepte nicht ohne Weiteres in die Konzeption, Gestaltung und Testung von digitalen Musikinstrumenten übernommen werden können. Der Aspekt der Benutzerfreundlichkeit muss deshalb im Kontext der Gestaltung von digitalen Musikinstrumenten angepasst werden. Diese Sichtweise vertritt auch O'Modhain (2011), der eine breitere Auslegung des Evaluationsbegriffes verlangt. Seine Lösung für diese Problematik sind Evaluationskonzepte, die an den relevanten Anspruchsgruppen ausgerichtet sind. Demzufolge macht z. B. die vorhin kritisierte Messung der Einfachheit der Benutzung unter bestimmten Rahmenbedingungen wieder Sinn. Denn möglicherweise kann es bei einem bestimmten DMI gerade die Idee sein, ein möglichst einfach zu bespielendes Instrument zu entwickeln.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass haptisches Feedback sowohl das Interaktionsgefühl mit dem digitalen Musikinstrument verbessern kann, als auch der Musiker in Bezug auf die Kontrollierbarkeit seiner musikalischen Expressivität profitiert. Bei der

Gestaltung haptischem Feedback sollten psychophysikalische Erkenntnisse berücksichtigt werden, da dadurch zusätzliches Feedback zielführend in DMIs integriert werden kann. Für die Evaluation von haptischem Feedback können Modelle und Methoden der Mensch-Maschine Interaktion herangezogen werden, müssen aber auf den Kontext des haptischen Feedbacks in DMIs angepasst werden.

Literaturverzeichnis

- Altinsoy, M. E. (2012). The quality of auditory-tactile virtual environments. *Journal of the Audio Engineering Society*, 60(1/2), 38–46.
- Askenfelt, A., & Jansson, E. V. (1992). On vibration sensation and finger touch in stringed instrument playing. *Music Perception*, 9(3), 311–350.
- Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2009). Neurowissenschaften. In M. F. Bear, B. W. Connors, & M. A. Paradiso (Eds.), *Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie* (3. Auflage., pp. 427–468). Heidelberg: Springer.
- Birnbaum, D. M. (2004). *The Touch Flute: Exploring roles of vibrotactile feedback in music performance*. Project Report (pp. 1–4). Montreal.
- Birnbaum, D. M. (2007). *Musical vibrotactile feedback* (Unpublished master's thesis). McGill University, Montreal, Canada.
- Birnbaum, D. M., & Wanderley, M. M. (2007). A systematic approach to musical vibrotactile feedback. *Proceedings of the International Computer Music Conference* (pp. 397–404). Copenhagen, Denmark.
- Bolanowski, S. J., Gescheider, G. A., Verrillo, R. T., & Checkosky, C. M. (1988). Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(5), 1680–1694. doi:10.1121/1.397184
- Bolanowski, S. J., & Verrillo, R. T. (1982). Temperature and criterion effects in a somatosensory subsystem: A neurophysiological and psychophysical study. *Journal of Neurophysiology*, 48(3), 836–855.

- Bolton, C. F., Winkelmann, R. K., & Dyck, P. J. (1966). A quantitative study of Meissner's corpuscles in man. *Neurology*, *16*(1), 1–9. doi:10.1212/WNL.16.1.1
- Bongers, B. (2000). Physical Interfaces in the electronic arts: Interaction theory and interfacing techniques for real-time performance. In M. M. Wanderley & M. Battier (Eds.), *Trends in gestural control of music* (pp. 41–70). Paris: Ircam - Centre Pompidou.
- Bresciani, J.-P., Ernst, M. O., Drewing, K., Bouyer, G., Maury, V., & Kheddar, A. (2005). Feeling what you hear: auditory signals can modulate tactile tap perception. *Experimental brain research*, *162*(2), 172–180. doi:10.1007/s00221-004-2128-2
- Chafe, C. (1993). Tactile audio feedback. *Proceedings of the International Computer Music Conference* (pp. 76–79). Waseda University, Japan.
- Chafe, C., & O'Modhrain, S. (1996). Musical muscle memory and the haptic display of performance nuance. *ICMC Proceedings 1996* (pp. 1–4). Hong Kong University of Science and Technology, China.
- Fontana, F., Civolani, M., Papetti, S., del Bello, V., & Bank, B. (2011). An exploration on the influence of vibrotactile cues during digital piano playing. *Proceedings of the 8th Sound and Music Computing Conference* (pp. 273–278). Padua, Italy.
- Franinovic, K., & Salter, C. (2013). The experience of sonic interaction. In Karmen Franinovic & S. Serafin (Eds.), *Sonic interaction design* (pp. 39–75). Cambridge: MIT Press.
- Gaser, C., & Schlaug, G. (2003). Brain structures differ between musicians and non-musicians. *The Journal of Neuroscience*, *23*(27), 9240–9245.

Gescheider, G. A., Bolanowski, S. J., Hall, K. L., Hoffman, K. E., & Verrillo, R. T. (1994).

The effects of aging on information-processing channels in the sense of touch:

I. Absolute sensitivity. *Somatosensory & Motor Research*, *11*(4), 345–357.

Grosshauser, T., & Hermann, T. (2009). Augmented haptics - An interactive feedback system

for musicians. In M. E. Altinsoy, U. Jekosch, & S. Brewster (Eds.), *Haptic and Audio*

Interaction Design (pp. 100–108). Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-642-04076-

4_11

Gunther, E., & O'Modhrain, S. (2003). Cutaneous grooves: Composing for the sense of

touch. *Journal of New Music Research*, *32*(4), 369–381.

doi:10.1076/jnmr.32.4.369.18856

Hayward, V., Astley, O. R., Cruz-Hernandez, M., Grant, D., & Robles-De-La-Torre, G.

(2004). Haptic interfaces and devices. *Sensor Review*, *24*(1), 16–29.

doi:10.1108/02602280410515770

Järveläinen, H., Papetti, S., Schiesser, S., & Grosshauser, T. (2013). Audio-tactile feedback in

musical gesture primitives: Finger pressing. *open-access article*.

Jordà, S., Geiger, G., Alonso, M., & Kaltenbrunner, M. (2007). The reacTable: Exploring the

synergy between live music performance and tabletop tangible interfaces. *Proceedings of the 1st international conference on tangible and embedded interaction* (pp. 139–146).

Baton Rouge, Louisiana, USA: ACM Press. doi:10.1145/1226969.1226998

Keele, S. W. (1973). *Attention and human performance*. Pacific Palisades, California:

Goodyear Pub. Co.

- Lagarde, J., & Kelso, J. A. S. (2006). Binding of movement, sound and touch: multimodal coordination dynamics. *Experimental brain research*, 173(4), 673–688.
doi:10.1007/s00221-006-0410-1
- Loosch, E. (2003). Das Spiel des Musikers. Anmerkungen aus sinnesphysiologischer, psychomotorischer und psychologischer Sicht. *Das Orchester*, 51(1), 31 – 36.
- Loy, G. (1985). Musicians make a standard: The MIDI phenomenon. *Computer Music Journal*, 9(4), 8–26.
- Malloch, J., Birnbaum, D., Sinyor, E., & Wanderley, M. M. (2006). Towards a new conceptual framework for digital musical instruments. *Proceedings of the 9th Int. Conference on Digital Audio Effects* (pp. 49–52). Montreal, Canada.
- Marshall, M. T., & Wanderley, M. M. (2011). Examining the effects of embedded vibrotactile feedback on the feel of a digital musical instrument. *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression* (pp. 399–404). Oslo, Norway.
- McDermott, J., Gifford, T., Bouwer, A., & Wagdy, M. (2013). Should music interaction be easy? In S. Holland, K. Wilkie, P. Mulholland, & A. Seago (Eds.), *Music and Human-Computer Interaction* (pp. 29–47). London: Springer. doi:10.1007/978-1-4471-2990-5_2
- McPherson, A. P., & Kim, Y. E. (2013). Piano technique as a case study in expressive gestural interaction. In S. Holland, K. Wilkie, P. Mulholland, & A. Seago (Eds.), *Music and Human-Computer Interaction* (pp. 123–138). London: Springer. doi:10.1007/978-1-4471-2990-5_7
- Miranda, E. R., & Wanderley, M. M. (2006). *New digital musical instruments: Control and interaction beyond the keyboard*. Middleton, Wisconsin: AR Editions.

Mürbe, D., Pabst, F., Hofmann, G., & Sundberg, J. (2002). Significance of auditory and kinesthetic feedback to singers' pitch control. *Journal of Voice*, *16*(1), 44–51.

Noltensmeier, R., & Massenkeil, G. (1996). *Das Neue Lexikon der Musik*. (R. Noltensmeier, G. Rothmund-Gaul, & G. Massenkeil, Eds.). Stuttgart, Weimar: Metzler.

O'Modhrain, S. (2001). *Playing by feel: Incorporating haptic feedback into computer-based musical instruments* (Doctoral dissertation). Stanford University, Stanford, CA, USA.

O'Modhrain, S. (2011). A framework for the evaluation of digital musical instruments. *Computer Music Journal*, *35*(1), 28–42.

O'Modhrain, S., & Essl, G. (2004). PebbleBox and CrumbleBag: Tactile interfaces for granular synthesis. *Proceedings of the 2004 conference on new interfaces for musical expression* (pp. 74–79). National University of Singapore.

Overholt, D., Berdahl, E., & Hamilton, R. (2011). Advancements in actuated musical instruments. *Organised Sound*, *16*(02), 154–165. doi:10.1017/S1355771811000100

Ro, T., Ellmore, T. M., & Beauchamp, M. S. (2013). A neural link between feeling and hearing. *Cerebral cortex*, *23*(7), 1724–1730. doi:10.1093/cercor/bhs166

Rovan, J., & Hayward, V. (2000). Typology of tactile sounds and their synthesis in gesture-driven computer music performance. In M. Wanderly & M. Battier (Eds.), *Trends in gestural control of music* (pp. 1–15). Paris: Editions IRCAM.

Roy, E. a., & Hollins, M. (1998). A ratio code for vibrotactile pitch. *Somatosensory & Motor research*, *15*(2), 134–145.

Sachs, C. (1965). *The history of musical instruments*. New York: Courier Dover Publications.

Sundberg, J. (1979). Chest vibrations in singers. *STL-QPSR*, 20(1), 49–64.

Verrillo, R. T. (1985). Psychophysics of vibrotactile stimulation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77(1), 225–232.

Verrillo, R. T. (1992). Vibration sensation in humans. *Music Perception*, 9(3), 281–302.

Verrillo, R. T., & Bolanowski, S. J. (1986). The effects of skin temperature on the psychophysical responses to vibration on glabrous and hairy skin. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 80(2), 528–532.

Wanderley, M. M., & Depalle, P. (2004). Gestural control of sound synthesis. *Proceedings of the IEEE* (Vol. 92, pp. 632–644). doi:10.1109/JPROC.2004.825882

Wanderley, M. M., & Orio, N. (2002). Evaluation of input devices for musical expression: Borrowing tools from HCI. *Computer Music Journal*, 26(3), 62–76.

doi:10.1162/014892602320582981