

1 **Schlagmann 2.0 - Bewegungsakustische Dimensionen interpersonaler Koordination im**

2 **Mannschaftssport**

3 Gerd Schmitz & Alfred O. Effenberg

4 Leibniz Universität Hannover, Institut für Sportwissenschaft, Am Moritzwinkel 6, 30167 Hannover

5

6

7 Korrespondierender Autor:

8 Gerd Schmitz

9 E-Mail: [gerd.schmitz@sportwiss.uni-hannover.de](mailto:gerd.schmitz@sportwiss.uni-hannover.de)

10 Tel.: 0511-7622191

11 Fax: 0511-7622196

## **Zusammenfassung**

Mannschaftssport erfordert neben der individuellen Bewegungskoordination auch die interpersonale Koordination der Bewegungen. Ein Beispiel ist das Rudern, bei dem die Technikkoordination und –synchronisation essenziell für die Erzeugung mannschaftlicher Synergieeffekte sind. In diesem Artikel wird ein Ansatz zur systematischen Untersuchung interpersonaler Koordinationsmechanismen vorgestellt, der zusätzliche Optionen zur unmittelbaren (sport-)praktischen Anwendung bietet. Ein zentrales Element ist die Methode der Bewegungssonifikation, mit der Bewegungsparameter im zeitlichen Verlauf akustisch abgebildet werden. Auf diese Weise können dynamische und kinematische Bewegungsinformationen selektiv vermittelt und ihre wahrnehmungs- und ausführungsseitigen Wirkungen verglichen werden.

In der vorliegenden Studie wurde die Wirkung sonifizierter kinematischer und dynamischer Bewegungsparameter auf Synchronisations- und Wahrnehmungsgenauigkeiten untersucht. Dazu ruderten Versuchspersonen auf einem Ruderergometer zu den Sonifikationen einer anderen Person und schätzten in einer separaten Aufgabe die Frequenzen gehörter Bewegungen der eigenen Person sowie der anderer Personen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Versuchspersonen ihre Ruderbewegungen in Abhängigkeit der dargebotenen Informationsart zeitlich variierten. Keine signifikanten Unterschiede ergaben sich hingegen bei der Schätzung der Bewegungsfrequenzen. Dennoch wurden eigene Bewegungsfrequenzen anders geschätzt als die Frequenzen anderer Personen. Dieser sogenannte Eigen/Fremd-Effekt wurde unter Berücksichtigung zweier Kovariaten signifikant: 1. der Leistung während der Synchronisationsaufgabe, und 2. der Fähigkeit, eigene sonifizierte Bewegungen zu identifizieren. Diese Ergebnisse deuten auf eine unmittelbare Ansteuerung motorischer Repräsentationen durch das Hören von Bewegungssonifikationen hin und lassen Rückschlüsse zur Struktur der Repräsentationen zu. Direkte Effekte für die Sportpraxis ergeben sich in Form einer gezielten interpersonalen Abstimmung und Synchronisation der individuellen Bewegungstechniken mittels zeitsynchroner Übermittlung kinematischer und dynamischer Bewegungsinformationen anderer Teammitglieder.

Schlüsselwörter: Interpersonale Koordination, Synchronisation, Sonifikation, Interne Modellierung

## Summary

Team sport requires individual and interpersonal coordination of movements. In rowing e.g., the coordination and synchronization of movement techniques is essential to create synergy effects of joint team rowing. Here, we provide a new approach for the systematic investigation of the mechanisms behind interpersonal coupling and discuss its direct applicability to sport practice. The key element is movement sonification, which describes the transformation of movement features into sound features. Thus, dynamic and kinematic movement information can be selectively conveyed and their perception-action effects be compared. The present study compared the impact of kinematic and dynamic sonifications on movement synchronization and perceptual accuracy. In a first session, the participants rowed on an indoor rower to sonifications of another person. In a second session, they listened to sonifications of their own and to those of other persons and estimated rowing frequencies.

In the synchronization task, the participants temporally adjusted their rowing movements in relation to the type of information provided. In the perceptual task, differences between conditions were not significant. However, estimation of movement frequencies differed when listening to own movements compared to listening to other movements. This own/other effect became significant after controlling 1. for the synchronization performance and 2. for the ability to identify own techniques on the basis of the sonifications. These variables significantly covaried with the own/other effect.

The results suggest that the listening to movement sonifications directly addresses motor representations and permits conclusions about the structure of those representations. Direct effects for sport practice are given by increased synchronization and enhanced interpersonal coordination of individual movement techniques by means of a transmission of kinematic and dynamic movement information to all team members at the same time.

## 1 **1 Einleitung**

2 Sportliche Leistungsfähigkeit unterliegt vielen Einflussfaktoren. Insbesondere im Mannschaftssport  
3 sind Sportler vielfältigen Reizen ausgesetzt, die sowohl bewusst als auch bewusstseinunabhängig  
4 Einfluss auf sensomotorische Prozesse und die strategische Bewegungsplanung ausüben. Gegenüber  
5 dem Individualsport besteht eine besondere Herausforderung in der Koordination der eigenen  
6 Bewegung mit den Bewegungen der Mannschaftskollegen. Dazu verwenden wir vor dem Hintergrund  
7 einer in den Kognitionswissenschaften üblichen Terminologie den Begriff der *interpersonalen*  
8 *Bewegungskoordination*. Das Mannschaftsrudern erfordert beispielsweise neben der Optimierung der  
9 eigenen Bewegungstechnik auch eine Optimierung der mannschaftlichen Synergieeffekte: z.B. durch  
10 strategische Platzierung der Ruderer im Boot in Abhängigkeit ihrer individuellen Technikausprägung  
11 oder durch Präzisierung der zeitlichen interpersonalen Synchronisation der Rudertechniken  
12 untereinander. Die vorliegende Forschungsarbeit stellt Ansätze zur grundlagenwissenschaftlichen  
13 Untersuchung interpersonaler Kopplungsmechanismen und –routinen vor, und dies zudem mit dem  
14 Anspruch einer direkten Anwendbarkeit in der Sportpraxis.

15

### 16 *1.1 Ansätze zur Untersuchung der Mechanismen interpersonalen Koordination*

17 Prozesse der interpersonalen Bewegungskoordination sind in den letzten Jahren zunehmend in  
18 den Fokus psychologischer und neurowissenschaftlicher Forschung gerückt. So haben sich  
19 beispielsweise die Forschungsschwerpunkte zur ‚Joint Action‘ oder zum ‚Interpersonal Coupling‘  
20 entwickelt, die gezielt Mechanismen interpersonalen Koordination untersuchen. Der überwiegende  
21 Anteil dieser Forschung ist in erster Linie laborexperimentell ausgerichtet. Die Übertragbarkeit  
22 laborexperimenteller Befunde in die Praxis kann jedoch begründet hinterfragt werden, da sich  
23 sportliche Situationen in der Regel durch einen hohen Komplexitätsgrad auszeichnen (Heuer, 1988)  
24 und in sportliche Handlungs- und Lernsituationen spezifische kognitive Funktionen eingebunden sind,  
25 deren Leistungsfähigkeit in hohem Maße erfahrungsanhängig ist (Zentgraf & Munzert, 2014). Der  
26 Entwicklung adäquater Ansätze und Methoden kommt daher in der Sportwissenschaft eine besondere  
27 Bedeutung zu, um entsprechende grundlagenwissenschaftliche Erkenntnisse von hoher externer

28 Validität zu gewinnen und das Wissen über menschliche Interaktionsprinzipien nachfolgend in der  
29 Sportpraxis gewinnbringend anwenden zu können.

30 Ein interessanter und in die Sportwissenschaft adaptierbarer Ansatz zur Untersuchung  
31 komplexer Interaktionsmechanismen kommt aus der Musikwissenschaft. So schlagen D'Ausilio,  
32 Novembre, Fadiga und Keller (2014) zur systematischen Analyse interpersonaler Koordination bei  
33 Musikern vor, Untersuchungsparadigmen miteinander zu kombinieren, die unterschiedliche  
34 Ausprägungen bezüglich interner und ökologischer Validität besitzen. Grundlegende Mechanismen  
35 interpersonaler Koordination lassen sich in Experimenten untersuchen, in denen zwei Personen  
36 gemeinsam musizieren (bi-direktionale Synchronisation) oder eine einzelne Person zu einer  
37 musikalischen Aufnahme einer anderen Person musiziert (uni-direktionale Synchronisation). Der  
38 Komplexitätsgrad der Interaktionen lässt sich erhöhen, indem Wechselwirkungen in Kleingruppen,  
39 z.B. Ensembles, oder in Gruppen mit einem Dirigenten oder auch in Bands untersucht werden, die vor  
40 Publikum spielen. Durch systematische Erhöhung der interagierenden Einheiten (Gruppen mit/ohne  
41 Dirigenten oder Zuschauern) steigen Komplexitätsgrad und ökologische Validität. Allerdings geht  
42 dieser Vorteil mit einer Reduktion der internen Validität einher, was verstärkt Unschärfen bei kausalen  
43 Erklärungsmodellen mit sich bringt.

44 Dieser musikwissenschaftliche Ansatz erscheint im erweiterten Rahmen auch auf sportliche  
45 Situationen anwendbar und könnte sogar als eine grundlegende Bezugsbasis für die  
46 sportwissenschaftliche Untersuchung interpersonaler Bewegungskoordination fungieren. Die erste der  
47 beiden hier vorgestellten Studien folgt diesem Ansatz, indem das basale Untersuchungsparadigma von  
48 D'Ausilio et al. (2014) zur uni-direktionalen Synchronisation zur Untersuchung der Wirkung  
49 unterschiedlicher Bewegungsinformationen (Kinematik / Dynamik) auf die Synchronisation von  
50 Ruderbewegungen angewandt wird. In einer zweiten, an die Embodiment-Forschung angelehnten  
51 Studie, werden zugrundeliegende, wahrnehmungsbasierte Mechanismen untersucht, indem dieselben  
52 Versuchspersonen auf Basis kinematischer oder dynamischer Bewegungsinformationen  
53 Bewegungsfrequenzen schätzen und eigene Bewegungsmuster identifizieren.

54

55 *1.2 Annahmen zu den Mechanismen interpersonaler Koordination*

56 Die Qualität interpersonaler Bewegungskoordination ist stark von Prozessen der  
57 Bewegungswahrnehmung und -antizipation abhängig. So tendieren zwei Personen unwillkürlich dazu,  
58 ihre Bewegungsfrequenzen einander anzupassen, sobald sie sich gegenseitig visuell oder akustisch  
59 wahrnehmen (Demos, Chaffin, Begosh, Daniels & Marsh, 2012; Richardson, Marsh, Isenhower,  
60 Goodman & Schmidt, 2007). Zudem lassen sich Grad und Umfang sensomotorischer Koordination  
61 und Synchronisation anhand der individuellen Fähigkeit zur Antizipation von Bewegungsereignissen  
62 und –effekten prognostizieren (Pecenka & Keller, 2011; Sebanz & Knoblich, 2009).

63 Empirische Studien zu dem Themenfeld Embodiment liefern zunehmend Belege für die Beteiligung  
64 des motorischen Systems an der Bewegungswahrnehmung: So wird z.B. die Prognosequalität von  
65 Bewegungshandlungen vom Grad des motorischen Könnens sowie den spezifischen  
66 Handlungserfahrungen beeinflusst (Agliotti, Cesari, Romani & Urgesi, 2008; Knoblich & Flach,  
67 2001). Knoblich, Seigerschmidt, Flach und Prinz (2002) erklären derartige Phänomene mit einer  
68 internen Simulation der beobachteten Bewegung durch das eigene motorische System. Eine  
69 Simulation durch ein System, das diese Bewegung selbst produzieren kann, verläuft  
70 dementsprechend erfolgreicher als die Simulierung durch ein System, das dazu nicht in der Lage ist.

71 Maes, Leman, Palmer und Wanderley (2014) argumentieren, dass sowohl inverse Modellierung als  
72 auch Vorwärtsmodellierung - die beiden zentralen Funktionsmodule interner Modelle -  
73 Wahrnehmungsprozesse moderieren. Vorwärtsmodelle dienen dabei unter anderem der Simulation der  
74 sensorischen Konsequenzen einer Bewegungshandlung, die durch Integration mit den tatsächlichen  
75 sensorischen Informationen Einfluss auf die Wahrnehmungspräzision nehmen (Shadmehr, Smith &  
76 Krakauer, 2010). Es wird zudem angenommen, dass dieser Mechanismus die Identifikation der  
77 eigenen Bewegung ermöglicht (Knoblich et al., 2002). Damit ist zu erklären, warum auch noch  
78 deutlich maskierte und mittels Point-Light-Display dargestellte Bewegungen als eigene Bewegungen  
79 identifiziert werden können (Loula, Prasad, Harber & Shiffrar, 2005). Bemerkenswert ist dabei, dass  
80 der Identifikationseffekt graduell und proportional zu einer Änderung räumlicher oder zeitlicher  
81 Bewegungskomponenten abnimmt (Blackmore, Wolpert & Frith, 2000). Auf Basis dieser

82 Argumentation lassen sich über die Identifikationsrate Rückschlüsse auf die Güte einer internen  
83 Modellierung bei der Bewegungsbeobachtung ziehen.

84

### 85 *1.3 Das Potential der Bewegungssonifikation zur Untersuchung interpersonaler Koordination*

86 Eine besondere Herausforderung bei Studien zur interpersonalen Koordination und  
87 Bewegungswahrnehmung besteht in der Kontrolle der Informationsvermittlung zwischen interagieren  
88 Personen: Aus methodischer Sicht muss die vermittelte Information kontrollierbar und eindeutig  
89 beschreibbar sein; aus Anwendersicht müssen Bewegungsinformationen bewegungsbegleitend  
90 wahrnehmbar und ausführungsseitig umsetzbar sein. Entsprechende Ansatzpunkte bietet die Methode  
91 der *Sonifikation*, bei der Parameter kontinuierlich akustisch abgebildet werden (Hermann, Hunt &  
92 Neuhoff, 2011). Effenberg (1996, 2005) adaptierte den ursprünglich nicht auf menschliche  
93 Bewegungen angelegten Sonifikationsansatz mit der Prämisse einer ökologisch orientierten  
94 Bewegungskodierung für die Sportwissenschaft, um Bewegungswahrnehmung und  
95 Bewegungsregulation in unterschiedlichen Zusammenhängen zu unterstützen. Leitgedanke zur  
96 Gestaltung einer *Bewegungssonifikation* ist die strukturelle Analogie der neu generierten akustischen  
97 Bewegungsinformation zu natürlichen Bewegungsinformationen unterschiedlicher Sinnesmodalitäten.  
98 Diese strukturelle Analogie wird über eine direkte Nutzung dynamischer oder/und kinematischer  
99 Bewegungsmerkmale für die Soundmodulation erreicht. Die entstehenden bewegungsdefinierten  
100 Soundsequenzen enthalten neuartige auditive Bewegungsinformationen, die an audiomotorischen  
101 Schnittstellen im ZNS unmittelbar regulationswirksam werden können. Die strukturelle Analogie  
102 dieser bewegungsdefinierten Sounds sollte jedoch darüber hinausgehend auch die gezielte Einbindung  
103 multisensorischer Funktionen des Zentralnervensystems in die Bewegungswahrnehmung und die  
104 Verhaltensregulation ermöglichen. Tatsächlich konnten Scheef et al. (2009) zeigen, dass die  
105 Betrachtung einer Bewegungssequenz mit sonifizierter Bodenreaktionskraft eines Hock-Streck-Sprungs  
106 eine im Vergleich zur rein visuellen Beobachtung deutlich erhöhte, supraadditive Aktivierung des für  
107 die Wahrnehmung bewegter Objekte zuständigen Areals V5/MT hervorruft, was mit einer erhöhten  
108 Leistung bei der Schätzung von Sprunghöhen der beobachteten Person einhergeht.

109           Insgesamt ist Schallereignissen ein hoher Informationsgehalt über Bewegungen zu  
110 prognostizieren, da Bewegungsereignisse die Voraussetzung für hörbare Oszillationen der  
111 Luftmoleküle darstellen: Das Ohr ist im Grunde ein Bewegungssensor. Ein aktueller Artikel von  
112 Pizzera und Hohmann (2015) beschreibt den umfassenden Beitrag natürlicher Bewegungsgeräusche zu  
113 der Bewegungswahrnehmung und der motorischen Kontrolle. Die hohe Plastizität der elektronischen  
114 Soundsynthese erweitert diesen natürlichen Zusammenhang von Bewegung und resultierendem  
115 Schallereignis nochmals, indem z.B. auch stumme Bewegungsphasen hörbar gemacht werden und  
116 verschiedene Bewegungsmerkmale parallel akustisch abgebildet werden können. Tatsächlich  
117 unterstützten kontinuierliche bewegungsdefinierte Sonifikationen

- 118       • die Präzision der Bewegungswahrnehmung (Effenberg, 2005; Scheef et al., 2009),
- 119       • das Erkennen und Unterscheiden von alltäglichen Handlungsmustern (Vinken et al., 2013),
- 120       • motorische Kontrollprozesse (Cesari, Camponogara, Papetti, Rocchesso & Fontana, 2014;  
121       Effenberg, 2005),
- 122       • motorisches Lernen (Effenberg, Fehse, Schmitz, Krueger & Mechling, 2016; Sigrist, Rauter,  
123       Marchal-Crespo, Riener & Wolf, 2015), sowie
- 124       • Interaktionen mehrerer Personen (Schaffert, Mattes & Effenberg, 2011; Varni et al., 2012).

125 Offenbar eröffnen Transformationen von dynamischen/kinematischen Bewegungsinformationen in die  
126 auditive Modalität neben der Unterstützung der individuellen Verhaltensregulation auch neuartige  
127 Ansätze im Bereich interpersonaler Bewegungswahrnehmung und Handlungskoordination, indem  
128 vermehrt Informationen vermittelt oder spezifische Bewegungsinformationen gezielt verstärkt werden.

129

#### 130 *1.4 Wirkungen von Sonifikationen unterschiedlicher Bewegungsparameter*

131           Die Wirkung einer Sonifikation scheint von der Auswahl der Bewegungsparameter und deren  
132 Transformation in akustische Signale abzuhängen. In Feldstudien zum Rudern beobachtete Schaffert  
133 (2011) signifikante Geschwindigkeitsvorteile bei Sonifikation gemeinsam erzeugter Bootseffekte (der  
134 Bootsbeschleunigung), während Dubus und Bresin (2014) weder eine Wirkung unterschiedlicher

135 Sonifikationen auf die Bootsgeschwindigkeit noch auf die Schlagzahl von Ruderern fanden. Die  
136 Autoren begründen diese Unterschiede mit Bezug auf die verschiedenen Sonifikationsformen in den  
137 beiden Studien. Ein ähnliches Phänomen findet sich in Studien zum motorische Lernen: So belegen  
138 Sigrist et al. (2015) in einem Fall eine signifikante Verbesserung der Ruderlernleistung mit  
139 Sonifikation. In einem anderen Fall zeigen sie, dass eine Sonifikation wirkungslos sein und ggf. auch  
140 kognitiv überfordern kann (Sigrist et al., 2013).

141         Dubus und Bresin (2013) weisen darauf hin, dass systematische Untersuchungen zur Wirkung  
142 von Sonifikationen unterschiedlicher Bewegungsparameter auf Wahrnehmung und  
143 Bewegungsverhalten nahezu fehlen, für eine weitere wissenschaftliche Fundierung der Methode aber  
144 erforderlich sind. Beispielsweise könnten die Vertonungen kinematischer und dynamischer Parameter  
145 unterschiedliche Effekte erzielen. So fanden zwei bildgebende Studien teils überlappende, teils  
146 divergierende Gehirnaktivierungen bei audiovisueller Wahrnehmung von Bewegungen, deren auditive  
147 Komponente auf verschiedenen Bewegungssonifikationen beruhte. Während Scheef et al. (2009) für  
148 eine dynamische Sonifikation von Bodenreaktionskräften einer Sprungbewegung die Aktivierungen  
149 von wahrnehmungsbezogenen Gehirnbereichen betonten, berichteten Schmitz et al. (2013) für eine  
150 kinematische Sonifikation von Bewegungsamplituden beim Brustschwimmen primär von einer  
151 erhöhten Aktivierung des Action-Observation-Systems und subkortikaler Areale, die typischerweise in  
152 Prozesse der motorischen Kontrolle involviert sind. Eine eindeutige Schlussfolgerung zu  
153 unterschiedlichen Wirkungen dynamischer und kinematischer Parameter ist allerdings auf Basis dieser  
154 Studien nicht möglich, da sie sich nicht nur in den sonifizierten Bewegungsparametern, sondern auch  
155 in den Bewegungsarten sowie den Versuchsdesigns unterscheiden. Die vorliegende  
156 verhaltensorientierte Studie setzt an diesem Punkt an und vergleicht unter einheitlichen Bedingungen,  
157 ob sich Sonifikationen produzierter Kräfte (dynamisch) von Sonifikationen der aus der  
158 Kraftproduktion resultierenden Bewegungsamplituden (kinematisch) unterschiedlich auf  
159 Wahrnehmungsleistungen und Koordinationsleistungen auswirken.

160

161

## 162 *1.5 Interne Modellierung auf Basis von Sonifikationen?*

163 Dass die kinematische Bewegungs-sonifikation offenbar auch zu eine Aktivierung motorischer  
164 Areale anregt (Schmitz et al. 2013), führt zu der Frage, ob die Wahrnehmung sonifizierter  
165 Bewegungen interne Modellierungen oder Simulationen der beobachteten Bewegungen induzieren. In  
166 einer Studie zur Wahrnehmungsgenauigkeit und Bewegungsmusterdifferenzierung von  
167 Leistungsruderern fanden Schmitz und Effenberg (2012) Belege für eine erfolgreiche Identifikation  
168 der eigenen Technik auf Basis der Sonifikation von kinematischen und dynamischen  
169 Bewegungsparametern. Allerdings konnten die Bewegungseffekte auf Basis von Sonifikationen  
170 eigener Techniken nicht genauer als auf Basis von Sonifikationen anderer Personen geschätzt werden.  
171 Bei einer internen Modellierung der gehörten Bewegungen wären sowohl die Identifikation als auch  
172 eine erhöhte Qualität bei der Effektschätzung eigener Bewegungen zu erwarten gewesen. Die Autoren  
173 erklären die Diskrepanz ihrer Ergebnisse mit Bezug auf den Hinweis von Knoblich et al. (2002), nach  
174 dem Effekte von Bewegungen anderer Personen qualitativ vergleichbar zu den Effekten eigener  
175 Bewegungen geschätzt werden können, sofern die Bewegungsaufgabe nur wenige Freiheitsgrade  
176 umfasst bzw. sich die Bewegungsmuster der beteiligten Personen sehr ähneln. Es verbleibt jedoch ein  
177 Zweifel an der Plausibilität dieser Schlussfolgerung, da bei Schmitz und Effenberg (2012) alle  
178 Versuchspersonen über modalitäts-konforme perzeptuomotorische Expertise verfügten, d.h. sie hatten  
179 Sonifikationen ihrer eigenen Bewegung vorab in Echtzeit erlebt. Somit könnte die Identifikation der  
180 eigenen Technik auf rein perzeptueller Basis statt mithilfe einer internen Modellierung erfolgt sein, in  
181 dem die Versuchspersonen einen aktuellen sensorischen Eindruck mit ähnlichen gespeicherten  
182 Eindrücken (ggf. unbewusst) verglichen.

183

## 184 *1.6 Forschungsfragen*

185 Mit der vorliegenden Studie werden daher zwei Fragestellungen bearbeitet: (1) Wirken sich  
186 Sonifikationen dynamischer und kinematischer Bewegungsparameter unterschiedlich auf  
187 Wahrnehmungsleistung und interpersonale Koordination von Bewegungen aus? (2) Induziert die

188 Wahrnehmung sonifizierter Bewegungen bei Personen, die über keine modalitätskonforme  
189 perzeptuomotorische Expertise verfügen, eine interne Modellierung der Bewegungen?  
190 Die Wirkung der Sonifikation kinematischer und dynamischer Bewegungsparameter auf  
191 interpersonale Koordinationsleistungen wurden in einer Aufgabe zur Synchronisation eigener  
192 Ruderbewegungen zu den Sonifikationen von Ruderbewegungen einer anderen Person untersucht.  
193 Wahrnehmungseffekte wurden mittels eines Vergleichs der Leistungen beim Schätzen von  
194 Bewegungsfrequenzen der eigenen Person sowie der Bewegungen anderer Personen untersucht. Da  
195 die Versuchspersonen vor der Wahrnehmungsuntersuchung noch keine Sonifikation ihrer eigenen  
196 Bewegungen erlebt hatten, wurde zusätzlich mittels Identifikationsaufgabe geprüft, inwieweit diese  
197 Versuchspersonen eine Sonifikation ihrer eigenen Bewegung in Bezug zu ihren intern repräsentierten  
198 Bewegungsmustern setzen können.

199

## 200 **2 Methodik**

201 An der Studie nahmen elf Männer und vier Frauen im Alter von  $22,0 \pm 3,7$  Jahren teil. Die  
202 Untersuchungspersonen, alle aktive Leistungsruderer mit Platzierungen bei nationalen oder  
203 internationalen Ruderwettkämpfen, waren nach eigenen Angaben gesund und frei von psychischen  
204 oder neurologischen Beeinträchtigungen.

205 Die Studie wurde in der vorliegenden Form durch die Ethikkommission der Leibniz  
206 Universität Hannover genehmigt. Alle Versuchspersonen gaben schriftlich ihr Einverständnis zur  
207 Teilnahme an der Studie und zur anonymisierten Verwendung ihrer Daten.

208

### 209 *2.1 Synchronisationsstudie (Studie I)*

210 Als Modell diente ein 22-jähriger Leistungsruderer mit Top-Platzierungen bei internationalen  
211 Wettkämpfen, der von zwei Landesrudertrainern wegen seiner Bewegungstechnik für diese Studie  
212 ausgewählt worden war. Für die Stimuluserstellung ruderte er mit vorgegebenen Geschwindigkeiten  
213 auf einem Ruderergometer (Concept II), das mit Technik und Software des Instituts für Forschung und

214 Entwicklung von Sportgeräten Berlin (FES) ausgestattet war und über Dehnungsmessstreifen und  
215 Inkrementalgeber verfügte (Effenberg et al., 2011). Über die Sensorik konnten die Griff(auszug)kraft,  
216 die Stemmbrettkraft beider Beine, die Auszuglänge und die Rollsitze position mit einer Abtastrate von  
217 100 Hz erfasst werden. Diese Parameter wurden mit der Software MLMini des Instituts für  
218 Computergrafik, Universität Bonn, sonifiziert. Dazu wurden Minimum und Maximum der Griffkraft  
219 und der Auszuglänge auf die Midi-Tonhöhen C4 und C6 (Violin-Klang), sowie Minimum und  
220 Maximum der summierten Stemmbrettkraft beider Beine und die Rollsitze position auf die Midi-  
221 Tonhöhen C2 und C4 (Harmonica-Klang) abgebildet. Parameterverläufe zwischen den Extrema  
222 wurden somit über Tonhöhenänderungen hörbar.

223           Auf Basis dieser Sonifikationssystematik wurden drei Bewegungsmodelle erstellt, zu denen  
224 die Versuchspersonen angewiesen wurden, synchron zu rudern. In der *Kontrollbedingung* wurde  
225 lediglich der Beginn eines jeden Ruderzugs (Minimum der Auszuglänge) durch einen diskreten Ton  
226 von 100 ms Dauer angezeigt. Darüber hinaus wurde Meeresrauschen ohne Bewegungsbezug  
227 eingespielt, um die zu erwartenden Geräusche des Lüftungsrad und des Rollsitze zu maskieren. In  
228 der Bedingung *Kinematik* wurden stattdessen die Sonifikationen der Griff- und Rollsitzeamplitude und  
229 in der Bedingung *Dynamik* die Sonifikationen der Griffkraft und der Stemmbrettkraft präsentiert. Die  
230 Abfolge der Versuchsbedingungen Dynamik, Kinematik und Kontrolle waren ausbalanciert. Um für  
231 die Versuchspersonen in allen Bedingungen gleichmäßige Ausgangsgeschwindigkeiten zu erzeugen,  
232 begann jedes Modell mit fünf Ruderschlägen bei einer Schlagfrequenz von 23,8 Schlägen pro Minute.  
233 Hierbei wurde lediglich die Akustik der Kontrollbedingung eingespielt. Anschließend folgten fünf  
234 Blöcke mit jeweils 29 Ruderschlägen bei 21,5, 22,9, 23,8, 24,8 und 26 Schlägen pro Minute mit der  
235 für die jeweilige Bedingung spezifischen Akustik. Die Abfolge der Blöcke war über die  
236 Versuchspersonen ausbalanciert.

237           Die Versuchspersonen wurden instruiert, ihre eigene Technik mit der des gehörten Ruderers  
238 zu synchronisieren, so als ob sie mit ihm zusammen rudern würden. Unmittelbar vor jeder Bedingung  
239 wurde ihnen mitgeteilt, welche Bewegungsparameter zu hören seien und dass ansteigende Töne  
240 entweder ansteigenden Kräften oder nach hinten zunehmenden Bewegungsamplituden entsprechen  
241 würden.

242 Zur Wahrnehmung der akustischen Signale und Maskierung externer Geräusche trugen die  
243 Versuchspersonen In-Ear-Kopfhörer (AKG K 330). Die Lautstärke wurde interaktiv mit den  
244 Versuchspersonen eingestellt, sodass die Ruderergometergeräusche subjektiv nicht mehr zu hören  
245 waren. Unmittelbar vor Beginn der Messung hörten die Versuchspersonen dann für jeweils 30  
246 Sekunden einen Ausschnitt aus dem folgenden Rudermodell zur Gewöhnung an den entsprechenden  
247 Klang.

248 Die zeitliche Zuordnung zwischen gehörter und nachvollzogener Bewegung erfolgte auf Basis  
249 einer kombinierten Video-Audio-Analyse. Das FES-System generiert zum Beginn eines Ruderschlags  
250 ein Triggersignal, welches mittels Kistler-Synchronisationsbox (Typ 5610) zur Ansteuerung einer  
251 LED genutzt wurde (optisches Triggersignal). Das LED-Signal wurde während des Ruderns der  
252 Versuchspersonen mit einer Philips CCD-Kamera (Typ LDH 0803/30, 25 Hz) erfasst und digital  
253 aufgezeichnet (Sony VideoCapture 6.0b). Mit derselben Software wurde zeitgleich ein Kanal des  
254 Audiosignals aufgenommen. In diesem Kanal waren diskrete Tonsignale zum jeweiligen Beginn eines  
255 Ruderzugs zu hören (akustisches Triggersignal). Das Audiosignal des anderen Kanals (ohne diskreten  
256 Ton) wurde mechanisch dupliziert und über Kopfhörern den Versuchspersonen zweikanalig zugeführt.  
257 Die Zeitpunkte der optischen und akustischen Triggersignale wurden mithilfe der Software Adobe  
258 Professional Pro CS4 bestimmt und Ihre zeitliche Differenz als Synchronisationsfehler definiert.  
259 Positive Synchronisationsfehler zeigen dabei an, dass der sonifizierte Ruderer seinen Ruderschlag vor  
260 den nachvollziehenden Ruderern (Versuchspersonen) beginnt. Auf Basis dieser  
261 Triggersignaluordnung konnte dann anhand der durch die FES-Software berechneten Länge der  
262 Zugphase die zeitliche Abweichung zwischen Rudermodell und Versuchspersonen zum Ende der  
263 Zugphase berechnet werden.

264 In jeder Bedingung wurden separat für jeden Geschwindigkeitsblock ein konstanter und ein  
265 variabler Synchronisationsfehler berechnet. Für die Berechnung wurden die Schläge 6-29 eines jeden  
266 Geschwindigkeitsblocks berücksichtigt, da während der Schläge 1 bis 5 a priori eine hohe Variabilität  
267 aufgrund des vollzogenen Geschwindigkeitswechsels erwartet worden war. Das Außerachtlassen der  
268 ersten 5 Schläge sowie die Bedeutung der Triggersignale wurde den Versuchspersonen mitgeteilt. Der  
269 konstante Fehler  $kF$  wurde als arithmetischer Mittelwert der zeitlichen Abweichungen zwischen  
10

270 Rudermodell und Versuchsperson zum Beginn des Ruderschlags und zum Ende der Zugphase  
271 berechnet, der variable Fehler  $vF$  als die entsprechenden Standardabweichungen.  $kF$  und  $vF$  wurden  
272 dann messwiederholten Varianzanalysen mit den Innersubjektfaktoren Zeitpunkt (2), Bedingung (3)  
273 und Geschwindigkeitsstufe (5) zugeführt. Bei Verletzung der Zirkularitätsannahme (Signifikanz im  
274 Mauchley-Test) wurde eine Korrektur der Freiheitsgrade gemäß der Greenhouse-Geisser Prozedur  
275 vorgenommen. Post-Hoc-Analysen wurden mittels Newman-Keuls Test durchgeführt.

276

## 277 *2.2 Identifikations- und Schätzaufgabe (Studie 2)*

278 Alle Versuchspersonen nahmen 8 Monate später an einer Wahrnehmungsstudie teil. Dazu  
279 wurden von jeder Versuchsperson jeweils zwei einzelne Ruderzüge bei jeweils fünf unterschiedlichen  
280 Geschwindigkeiten aus der Kontrollbedingung der Synchronisationsstudie sonifiziert. Die Sonifikation  
281 erfolgte auf dieselbe Weise wie für die Synchronisationsaufgabe. Allerdings wurden die  
282 Rudersonifikationen hinsichtlich Kraft und Bewegungsamplitude zyklusweise normiert, sodass alle  
283 Ruderzyklen dieselben minimalen und dieselben maximalen Tonhöhen hatten. Mögliche Unterschiede  
284 zwischen den Sonifikationen wurden somit auf die Tonhöhenverläufe beschränkt, welche letztendlich  
285 die Parameter-Zeit-Verläufe widerspiegeln. Die Stimuli-Dauer variierte aufgrund der  
286 Schlagfrequenzen zwischen 2,03 und 3,12 Sekunden.

287 Jede Versuchsperson hörte 120 Stimuli in randomisierter Reihenfolge: je 10 Stimuli der  
288 Kinematik und Dynamik der eigenen Person sowie die entsprechende Anzahl zweier anderer Personen  
289 des jeweils gleichen Geschlechts, die über eine ähnliche Trainings- und Wettkampferfahrung  
290 verfügten. Entsprechend wurden die Stimuli jeder Person bei jeweils zwei anderen Personen  
291 eingesetzt. Die Stimuluspräsentation erfolgte mittels der Psychtoolbox (PTB-3) der Software Matlab  
292 R2012a auf einem Notebook der Marke Dell XLS 15 (2\*2.4 GHz, 8 GB RAM). Nach 60 Stimuli  
293 wurde eine fünfminütige Pause eingelegt.

294 Die Versuchspersonen wurden aufgefordert, unter den Sonifikationen ihre eigene Bewegung  
295 zu identifizieren und die Schlagfrequenz der gehörten Bewegung zu schätzen. Dazu tippten sie nach  
296 jedem Stimulus zunächst das Ergebnis für die Identifikation („y“ für ja, „n“ für nein), und

297 anschließend die gehörte Schlagfrequenz ein. Die Eingabeprozedur wurde anhand von 4 Probestimuli  
298 geübt. Zu vier weiteren Probestimuli erfolgte eine Rückmeldung über die tatsächliche Schlagfrequenz,  
299 nicht jedoch über die Zuordnung zur eigenen Technik. Die Versuchspersonen wurden instruiert, die  
300 Richtigkeit bzw. Genauigkeit der Antwort zu priorisieren. Sie erhielten weder eine Information  
301 darüber, wie oft sie ihre eigene Technik hören, noch wie viele unterschiedliche Personen sie hören  
302 würden. Die Aufgabe wurde retrospektiv als intensiv aber nicht erschöpfend bewertet.

303           Zur Quantifizierung der individuellen Identifikationsleistungen und möglicher  
304 Antworttendenzen wurde für die Identifikationsaufgabe gemäß Signalentdeckungstheorie das nicht-  
305 parametrische Sensitivitätsmaß  $A'$  und das nicht-parametrische Entscheidungskriterium  $B''$  berechnet  
306 (Stanislav & Todorov, 1999). Als abhängige Variable der Schlagfrequenzschätzung wurde die  
307 Differenz zwischen der geschätzten und der gegebenen Schlagfrequenz berechnet. Ein positiver Wert  
308 indiziert, dass eine Versuchsperson eine höhere Schlagfrequenz schätzte als tatsächlich zu hören war.  
309 Der arithmetische Mittelwert einer jeden Versuchsperson in jeder Bedingung wurde als konstanter  
310 Fehler  $kF$ , die zugehörige Standardabweichung als variabler Fehler  $vF$  definiert.

311           Diese Werte wurden messwiederholten Varianzanalysen mit dem Innersubjektfaktor  
312 Bedingung (2) zugeführt. Bei der Analyse der Schlagfrequenzschätzung wurde zudem der  
313 Innersubjektfaktor Eigen/Fremd (2) aufgenommen. Um Zusammenhänge zwischen den  
314 Synchronisations- und Identifikationsleistungen mit der Schätzleistung zu prüfen, wurden die  
315 individuellen Mittelwerte der Fehler aus der Kontrollbedingung der Synchronisationsaufgabe sowie  
316 die individuellen Sensitivitätsmaße  $A'$  der Identifikationsaufgabe hinsichtlich ihrer Eignung als  
317 Kovariaten für die Schlagfrequenzschätzungen überprüft. Der Synchronisationsfehler repräsentiert  
318 dabei ein Maß für die zeitliche Exaktheit der Bewegungsausführung in Bezug zur Schätzung des  
319 Intervalls zwischen zwei diskreten Zeitsignalen und ist somit unabhängig vom Parameter-Zeitverlauf.  
320 Das Sensitivitätsmaß hingegen steht in Bezug zum Parameter-Zeit-Verlauf und ist aufgrund des  
321 Versuchsdesigns unabhängig von der Länge des Ruderschlags.

322           Das Testen von Unterschieden zwischen Mittelwerten zu konstanten Referenzwerten wurde  
323 mittels T-Tests für einzelne Stichproben durchgeführt. Das Signifikanzniveau wurde auf <5%

324 festgelegt. In einem mehrfaktoriellen Versuchsdesign ist davon auszugehen, dass jeder zusätzliche  
325 Faktor die Gesamtvarianz erhöht. Daher wurde eine Effektgröße gewählt ( $\eta_p^2$ ), die für jeden Faktor die  
326 Höhe der partiellen Varianzaufklärung angibt.

327 Alle Tests wurden mit dem Programm Statistica 12 durchgeführt.

328

### 329 **3 Ergebnisse**

#### 330 *3.1 Synchronisation*

331           Abbildung 1 zeigt exemplarische Ruderschläge einer Versuchsperson bei zeitgleicher  
332 Präsentation des jeweils selben Ruderschlags des Rudermodells, der auf unterschiedliche Arten  
333 akustisch dargeboten wurde. Es ist ersichtlich, dass die zeitliche Bewegungssteuerung in Abhängigkeit  
334 der Sonifikation variiert. Insbesondere bei dynamischer Sonifikation beginnt die Versuchsperson die  
335 Zugphase früher als der sonifizierte Ruderer. Dies zeigt sich konstant über alle Parameter.

336

#### 337 **Abbildung 1**

338

339           Die konstanten Fehler  $kF$  aller Versuchspersonen zu Beginn und Ende der Zugphase sind in  
340 Abbildung 2 dargestellt. Die  $kF$  unterscheiden sich zwischen den Versuchsbedingungen signifikant  
341 ( $F(2, 28) = 65,13, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,82$ ). Versuchspersonen und Rudermodell weichen in der  
342 Kontrollbedingung, d.h. beim Hören eines diskreten Tons zu Beginn des Ruderschlags, zeitlich  
343 geringfügig voneinander ab. Richtung und Größe der zeitlichen Abweichung ändern sich beim Hören  
344 einer Sonifikation. Die Versuchspersonen beginnen und beenden die Zugphase bei dynamischer  
345 Sonifikation zeitlich deutlich vor dem Modell, bei kinematischer Sonifikation nach dem Modell. Im  
346 Post-Hoc-Test sind alle Unterschiede zwischen den Bedingungen hoch signifikant (jeweils  $p < 0,01$ ).

347           Die  $kF$  unterscheiden sich signifikant zwischen dem Beginn und dem Ende der Zugphase  
348 (Zeitpunkt:  $F(1, 14) = 20,77, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,60$ ). Da diese Fehler die zeitlichen Abweichungen  
349 zwischen Versuchspersonen und sonifiziertem Ruderer repräsentieren, zeigt dies, dass der durch das

350 zeitliche Verhältnis von Zug- und Freilaufphase gestaltete Bewegungsrhythmus der Versuchspersonen  
351 signifikant von dem Bewegungsrhythmus des Rudermodells abweicht. Ein Einfluss der  
352 Versuchsbedingung auf diesen Effekt kann nicht nachgewiesen werden, da die Interaktion  
353 Bedingung\*Zeitpunkt nicht statistisch signifikant ist ( $F(2, 28) = 3,33, p > 0,05, \eta_p^2 = 0,19$ ).

354 Die  $kF$  verändern sich zudem mit zunehmender Geschwindigkeit ( $F(4, 56) = 19,82, p < 0,001,$   
355  $\eta_p^2 = 0,59$ ), wobei leichte Unterschiede zwischen den beiden analysierten Bewegungszeitpunkten  
356 auftreten (Geschwindigkeitsstufe\*Zeitpunkt:  $F(4, 56) = 5,43, p < 0,05, \eta_p^2 = 0,28$ ). Weitere Effekte  
357 sind nicht signifikant.

358

### 359 **Abbildung 2**

360

361 Die variablen Fehler  $vF$  sind in Abbildung 3 dargestellt. Mit zunehmender Schlagfrequenz  
362 nehmen die  $vF$  ab, steigen aber bei der höchsten Stufe wieder an. Entsprechend sind der Haupteffekt  
363 Geschwindigkeitsstufe ( $F(4, 56) = 4,48, p < 0,05, \eta_p^2 = 0,24$ ), sowie im Post-Hoc-Test die Differenzen  
364 zwischen den Schlagfrequenzen 24,8 und 21,5 ( $p < 0,01$ ) sowie 24,8 und 26,0 ( $p < 0,05$ ) signifikant.

365 Auch beim  $vF$  unterscheiden sich die Versuchsbedingung signifikant ( $F(2, 28) = 4,60,$   
366  $p < 0,05, \eta_p^2 = 0,25$ ). Sie sind bei der kinematischen Sonifikation signifikant geringer als bei der  
367 dynamischen Sonifikation und als in der Kontrollbedingung (jeweils  $p < 0,05$ ). Kein signifikanter  
368 Unterschied ergibt sich zwischen dynamischer Sonifikation und Kontrollbedingung. Darüber hinaus  
369 sind keine weiteren Effekte signifikant.

370

### 371 **Abbildung 3**

372

373

### 374 3.2 Identifikationsaufgabe

375 Bei kinematischen Sonifikationen benannten die Versuchspersonen in  $32,74 \pm 21,48\%$  der  
376 Fälle eine Technik als ihre eigene, bei dynamischen Sonifikationen in  $33,43 \pm 17,60\%$  der Fälle.  
377 Damit weichen die Nennungen nicht signifikant von der 33,33-prozentigen  
378 Auftretenswahrscheinlichkeit der personenbezogenen Stimuli ab (Kinematik:  $t(14) = -0,108, p > 0,05,$   
379 Dynamik:  $t(14) = 0,021, p > 0,05$ ).

380 Auf Basis der individuellen Antwort-Raten wurde für jede Versuchsperson ein individueller  
381 Identifikationsindex (Sensitivitätsmaß  $A'$ ) berechnet. Zudem wurde geprüft, ob die Versuchspersonen  
382 zu progressiven oder konservativen Entscheidungen tendierten (Entscheidungskriterium  $B''$ ).  $B''$   
383 betrug bei kinematischer Sonifikation  $0,11 \pm 0,20$  und bei dynamischer Sonifikation  $0,08 \pm 0,24$ . Eine  
384 einfaktorielle Varianzanalyse über die Entscheidungskriterien ergibt keine signifikanten Unterschiede  
385 zwischen den Bedingungen ( $F(1, 14) = 0,14, p > 0,05, \eta_p^2 = 0,01$ ). Zudem sind beide Werte nicht  
386 signifikant unterschiedlich von 0 (Kinematik:  $t(14) = 2,09, p > 0,05$ ; Dynamik:  $t(14) = 1,345,$   
387  $p > 0,05$ ), sodass keine Antworttendenz belegt werden kann.  $A'$  betrug bei kinematischer Sonifikation  
388  $0,47 \pm 0,13$  und bei dynamischer Sonifikation  $0,53 \pm 0,17$ . Eine Varianzanalyse indiziert keine  
389 signifikanten Unterschiede zwischen den Bedingungen ( $F(1, 14) = 2,83, p > 0,05, \eta_p^2 = 0,08$ ), und  
390 keiner der beiden Werte weicht signifikant vom Zufallswert 0,5 ab (Kinematik:  $t(14) = -0,788,$   
391  $p > 0,05$ , Dynamik:  $t(14) = 0,581, p > 0,05$ ). Im Durchschnitt gelang den Versuchspersonen demnach  
392 die Identifikation der eigenen Technik nicht.

393 Die Entscheidungszeiten betragen bei dieser Aufgabe  $4,65 \pm 1,54$  s. Eine Varianzanalyse der  
394 Entscheidungszeiten mit den messwiederholten Faktoren Bedingung und Eigen/Fremd resultiert in  
395 keinen signifikanten Effekten.

396

397

#### Abbildung 4

398

399

400 3.3 Leistung bei der Schätzung von Schlagfrequenzen

401           Abbildung 4 stellt die parameterübergreifend berechneten Sensitivitätsindizes dar, d.h. sie  
402 spiegeln die Identifikationsleistungen der einzelnen Versuchspersonen wider, die sie unabhängig  
403 davon erzielten, ob sie eine kinematische oder eine dynamische Sonifikation hörten. Sowohl diese  
404 Werte als auch individuellen Mittelwerte der Synchronisationsleistung in der Kontrollbedingung  
405 wurden als Kovariaten bei der Analyse der Schätzleistungen berücksichtigt, sofern sie signifikant zur  
406 Varianzaufklärung beitragen.

407           Die konstanten und variablen Fehler der Schlagfrequenzschätzungen sind in Abbildung 5  
408 dargestellt. Die Versuchspersonen gaben bei kinematischen Sonifikationen zu hohe (positive  $kF$ ) und  
409 bei dynamischen Sonifikationen zu geringe (negative  $kF$ ) Schlagfrequenzen an. Die Unterschiede  
410 zwischen den Sonifikationen sind allerdings nicht signifikant ( $F(1, 12) = 0,84, p > 0,05, \eta_p^2 = 0,07$ ).  
411 Jedoch sind - wie auch in der Synchronisationsaufgabe - die variablen Fehler  $vF$  bei kinematischer  
412 Sonifikation signifikant geringer als bei dynamischer Sonifikation ( $F(1, 14) = 11,63, p < 0,01,$   
413  $\eta_p^2 = 0,45$ ).

414           Die Analyse der  $kF$  bestätigt signifikante Kovariationen sowohl des Sensitivitätsindex als auch  
415 der motorischen Synchronisationsleistung mit dem Faktor Eigen/Fremd ( $A'$ :  $F(1, 12) = 6,02, p < 0,05,$   
416  $\eta_p^2 = 0,33$ ;  $kF$  Kontrollbedingung der Synchronisationsaufgabe:  $F(1, 12) = 5,76, p < 0,05, \eta_p^2 = 0,32$ ).  
417 Unter Kontrolle, d.h. nach Herauspartialisieren dieses Einflusses, ist zudem der Haupteffekt  
418 Eigen/Fremd signifikant und belegt unterschiedliche Schätzleistungen beim Wahrnehmen eigener und  
419 fremder Bewegungen ( $F(1, 12) = 4,80, p < 0,05, \eta_p^2 = 0,27$ ). Andere Ergebnisse der  $kF$  sind nicht  
420 signifikant. Bei den variablen Fehlern  $vF$  sind weder die motorische Synchronisationsleistung  
421 ( $F(1, 12) = 0,30, p > 0,05, \eta_p^2 = 0,03$ ) noch der Sensitivitätsindex ( $F(1, 12) = 0,52, p > 0,05,$   
422  $\eta_p^2 = 0,04$ ) signifikante Kovariaten für den Faktor Eigen/Fremd. Auch treten hier keine weiteren  
423 signifikanten Ergebnisse auf.

424

425

**Abbildung 5**

426

427 Die Entscheidungszeiten bei dieser Aufgabe betragen  $4,11 \pm 2,01$ . Weder der Haupteffekt  
428 Eigen/Fremd ( $F(1, 14) = 0,17, p > 0,05, \eta_p^2 = 0,02$ ) noch die Interaktion Bedingung\*Eigen/Fremd sind  
429 signifikant ( $F(1, 14) = 0,15, p > 0,05, \eta_p^2 = 0,01$ ). Allerdings trafen die Versuchspersonen ihre  
430 Entscheidung bei den kinematischen Sonifikationen signifikant schneller als bei den dynamischen  
431 Sonifikationen ( $F(1, 14) = 7,64, p < 0,05, \eta_p^2 = 0,35$ ).

432

#### 433 **4 Diskussion**

434 Die vorliegende Studie untersucht in Anlehnung an ein Konzept von D'Ausilio et al. (2014)  
435 Mechanismen interpersonaler Bewegungskoordination am Beispiel des Ergometerruderns. Es wurde  
436 geprüft, ob 1. Sonifikationen von Griff- und Stembrettkräften auf einem Ruderergometer  
437 wahrnehmungs- und bewegungsbezogen andere Wirkungen erzielen als Sonifikationen der aus den  
438 Kraftproduktionen resultierenden Parameter Griffauszug und Rollsitzeigenschaft, sowie ob 2. beim Hören  
439 eigener Bewegungen andere Wahrnehmungsleistungen erzielt werden als beim Hören von  
440 Bewegungen anderer Personen. Ein entsprechender Unterschied wäre als Hinweis auf eine interne  
441 Modellierung der gehörten Bewegung zu deuten (Knoblich und Flach, 2001).

442 Zur Bewertung der bewegungsbezogenen Wirkung wurden die Versuchspersonen  
443 aufgefordert, synchron zu den Sonifikationen einer anderen Person zu rudern. Es konnte belegt  
444 werden, dass die Versuchspersonen ihre Ruderbewegungen zwischen den Versuchsbedingungen  
445 zeitlich variierten. Bei Vorgabe eines diskreten Reizes zu Beginn des Ruderschlags betrugen die  
446 zeitlichen Abweichung zum Rudermodell mit -25 ms zu diesem Zeitpunkt nahezu Null. Diese geringe  
447 Abweichung erscheint zunächst erstaunlich, da die diskreten Signale in Abhängigkeit der  
448 Schlagfrequenz lediglich alle 2300 bis 2800 ms zu hören waren und einer natürlichen  
449 Bewegungsvariabilität unterlagen. Diese Abweichung passt jedoch zu dem oft beobachteten  
450 Phänomen der 'Negative Mean Asynchrony' (z.B. Repp, 2005): Bei Synchronisationsaufgaben zu  
451 diskreten Reizen wird in der Literatur von negativen Synchronisationsfehlern berichtet, die einer dem  
452 Synchronisationsziel zeitlich vorgelagerten Bewegungskoordination entsprechen. Obwohl die meisten  
453 Erkenntnisse dazu auf Tapping-Studien beruhen, kann dieses Phänomen auch bei großmotorischen

454 Bewegungen auftreten. So berichten McIntosh, Brown, Rice & Thaut (1997) von negativen  
455 Synchronisationsfehlern in Höhe von ca. 70 ms beim Gehen zu Musik. Allerdings schreiben  
456 Aschersleben (2002) und Repp (2005), dass derartige Synchronisationsfehler nur bis zu Inter-  
457 Stimulus-Intervallen von ca. 1500 bis 2500 ms auftreten. Bei größeren Intervallen würden  
458 Versuchspersonen dazu tendieren, Signale nicht mehr zu antizipieren, sondern auf sie zu reagieren.  
459 Dies zeigt sich auch in einer Studie von Roger and Craig (2011), scheint jedoch nicht auf die  
460 vorliegende Studie zuzutreffen, da die konstanten Fehler mit zunehmendem Inter-Stimulus-Intervall  
461 nicht zu- sondern abnehmen und deutlich unterhalb der für Reaktionen zu erwartenden zeitlichen  
462 Latenzen liegen. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Versuchspersonen der vorliegenden  
463 Studie hoch geübt darin sind, derartige Schlagfrequenzen einzuhalten, während Versuchspersonen  
464 vieler anderer Studien Aufgaben mit für sie ungewohntem Timing ausführen.

465 Bei Vorgabe der kinematischen oder dynamischen Sonifikation ändert sich der konstante  
466 Fehler im Vergleich zur Kontrollbedingung. Dies könnte in Teilen über die Kontinuität der Stimuli  
467 begründet werden. Grundlagenorientierte Studien zeigen, dass Synchronisationsleistungen zu  
468 diskreten und kontinuierlichen Tönen unterschiedlich verlaufen (Varlet, Martin, Issartel, Schmidt &  
469 Bardy, 2012). Nach Roger und Craig (2011) treten geringere Synchronisationsfehler bei diskreten im  
470 Vergleich zu kontinuierlichen Tönen auf. Dieser Befund kann die vorliegenden Ergebnisse jedoch  
471 nicht vollständig erklären, da die konstanten Fehler unter kinematischer und dynamischer Sonifikation  
472 im Vergleich zur Kontrollbedingung in entgegengesetzte Richtungen abweichen. Zudem nimmt bei  
473 Roger und Craig (2011) die Variabilität von Synchronisationsfehlern bei kontinuierlichen im  
474 Vergleich zu diskreten Stimuli ab, wodurch sich die verringerten variablen Fehler in der  
475 kinematischen Bedingung, nicht aber die gleichbleibende Variabilität in der dynamischen Bedingung  
476 erklären lassen. Diese Unterschiede zwischen den Studien zeigen, dass die Eigenschaft der Kontinuität  
477 der Sonifikationen die differenzierten Synchronisationsergebnisse nicht hinreichend erklären kann.  
478 Weitere Einflussgrößen auf eine Synchronisationsleistung stellen nach Loras, Sigmundsson, Talcott,  
479 Öhberg und Stensdotter (2012) die Dauer des Inter-Stimulus-Intervalls, die einbezogenen  
480 Sinnesmodalitäten und Effektoren dar. In der vorliegenden Studie variierten diese Aspekte zwischen  
481 den verschiedenen Bedingungen jedoch nicht. Somit kann angenommen werden, dass die zwischen

482 den Bedingungen unterschiedlichen Parameter-Zeit-Verläufe, welche die Dynamik und Kinematik des  
483 Rudermodells repräsentieren, die differenzierten Synchronisationsleistungen hervorgerufen haben. Die  
484 Unterschiede zwischen dynamischer und kinematischer Sonifikation könnten möglicherweise durch die  
485 größere Nähe von kinematischer Sonifikation zur natürlichen, visuellen Bewegungsbeobachtung  
486 (visuelle Kinematik) begründet sein: für die interpersonale Koordination stellt die Beobachtung  
487 des/der mitrudierenden Mannschaftsmitglieder im Boot einen grundlegenden Bezug dar. Damit wäre  
488 auch ein umfassender Bezug zu den - über derartige visuelle Informationsanteile mitkonfigurierten -  
489 motorischen Repräsentationen plausibel.

490           Hierbei ist zu berücksichtigen, dass in beiden Bedingungen jeweils zwei Parameter sonifiziert  
491 worden waren: in der dynamischen Sonifikation die Griff- und die Stembrettkraft, in der  
492 kinematischen Sonifikation die Auszuglänge und die Rollsitzeinheit. Nach Aussage der  
493 Versuchspersonen waren die Sonifikationen der Auszuglänge und der Griffkraft deutlich besser  
494 wahrnehmbar als die der Rollsitzeinheit und Stembrettkraft. Unter der Annahme, dass sich die  
495 Versuchspersonen bei der Bewegungssynchronisation hauptsächlich an den Tonhöhenverläufen dieser  
496 Parameter orientieren, muss berücksichtigt werden, dass wesentliche Tonhöhenänderungen zum  
497 Zyklusbeginn je nach Parameter zu unterschiedlichen Zeitpunkten eintreten (Abbildung 1). Der  
498 zeitlich vorgelagerte Zyklusbeginn bei dynamischer im Vergleich zur kinematischen Sonifikation kann  
499 auf diese Weise allerdings nicht erklärt werden, da die wesentlichen Tonhöhenänderungen zum  
500 Zyklusbeginn bei der Sonifikation der Griffkraft nach denen der Auszuglänge stattfanden ( $101 \pm 9$   
501 ms).

502           Der konstante Synchronisationsfehler repräsentiert eine konstante Differenz zwischen dem  
503 Zeitpunkt der Wahrnehmung eines externen Bewegungsereignisses und der darauf zeitlich  
504 abgestimmten Ausrichtung der eigenen Bewegungshandlung. Damit entspricht er einem Maß der  
505 zeitlichen Kalibrierung zwischen sonifikationsbasiertem Perzept und eigener Motorik. Jeder Mensch  
506 verfügt über einen individuellen zeitlichen Kalibrierungszustand der Perzeptuomotorik. Dieser ist  
507 adaptiv und lässt sich durch Übung verändern (Hanson, Heron & Whitaker, 2008). Es kann  
508 experimentell nachgewiesen werden, dass mehrere Kalibrationszustände im Nervensystem zeitgleich  
509 gespeichert werden können (Chen & Vroomen, 2013). Die Unterschiede bei den konstanten

510 Synchronisationsfehlern zwischen den Bedingungen könnten somit darauf hinweisen, dass die  
511 Darbietungen produzierter Kräfte und der daraus resultierenden Bewegungsamplituden mittels  
512 Sonifikation unterschiedliche Kalibrierungszustände ansprechen oder bewirken.

513 Wahrnehmungsseitige Effekte der eingesetzten Sonifikationen wurden in einer separaten  
514 Studie geprüft. Die Rate der Eigennennungen (ca. 33%) bei der Identifikationsaufgabe weist  
515 aufgrund ihrer Passung zur Auftretenswahrscheinlichkeit der Bewegungsmuster der einzelnen  
516 Personen (33%) auf eine erfolgreiche Differenzierung von Bewegungsmustern hin. Dies ist im  
517 Einklang mit den Ergebnissen von Vinken et al. (2013), die eine Differenzierung von sechs  
518 unterschiedlichen Handlungen auf Basis standardisierter Sonifikationen belegten, ohne dass die  
519 Versuchspersonen vorab modalitätskonforme perzeptuomotorische Expertise erlangt hatten.  
520 Ergebnisse von Schmitz und Effenberg (im Druck) bestätigen, dass eine wahrnehmungsseitige  
521 Differenzierung sehr ähnlicher Ruderbewegungsmuster mittels Sonifikation bereits nach einer sehr  
522 kurzen Gewöhnungsphase erfolgreich möglich ist. Mittels der eingesetzten Sonifikationsmethoden  
523 scheinen demnach hinreichend Informationen für eine erfolgreiche Bewegungsmusterdifferenzierung  
524 generiert zu werden.

525 Eine signifikante Identifikation der eigenen Bewegungen konnte auf Basis der aggregierten  
526 Sensitivitätsindizes jedoch nicht nachgewiesen werden. Dies steht im Widerspruch zu einer anderen  
527 Studie, in der dies signifikant gelang (Schmitz & Effenberg, 2012). Da grundsätzlich eine  
528 Bewegungsmusterdifferenzierung auf Basis der Sonifikationen zu erfolgen scheint, liegt der  
529 Unterschied möglicherweise darin begründet, dass die Versuchspersonen bei Schmitz und Effenberg  
530 (2012), nicht aber die Versuchspersonen der vorliegenden Studie, über modalitätskonforme  
531 perzeptuomotorische Expertise verfügten. Das dortige 45-minütige Erleben einer durch die eigene  
532 Bewegung erzeugten Sonifikation könnte zur Etablierung audiomotorischer Koaktivierungen geführt  
533 haben, wie sie Bangert und Altenmüller (2003) bereits nach 25-minütigem audiomotorischem Handeln  
534 nachweisen konnten. Eine derartige audiomotorische Vernetzung könnte die Adressierung motorischer  
535 Repräsentationen und ihre Einbeziehung in Prozesse der Bewegungswahrnehmung begünstigt haben.  
536 Ein entsprechender Hinweis findet sich in den Ergebnissen von Repp und Knoblich (2004), die für

537 Pianisten einen Zusammenhang zwischen Selbst-Identifikationsrate und Rate der Vertrautheit mit der  
538 gespielten Musik belegen.

539           Einen anderen Erklärungsansatz für die im Durchschnitt nicht signifikante  
540 Identifikationsleistung der vorliegenden Studie bieten die Studien von Miles, Nind und Macrae (2010)  
541 und Paladino, Marrurega, Pavani und Schubert (2010). Sie zeigten, dass durch eine gleichphasige  
542 Synchronisation mit den Bewegungen einer anderen Person sowie eine synchrone multisensorische  
543 Stimulation die Grenzen hinsichtlich der Wahrnehmung der eigenen Person und einer anderen Person  
544 verschwimmen lassen und es zu einer wechselseitigen Projektion von Eigenschaften zwischen den  
545 Personen kommt. Unter Beachtung der Tatsache, dass die Versuchspersonen der vorliegenden Studie  
546 derartige Bewegungssonifikationen nur und erstmalig im Rahmen dieser Synchronisations- und  
547 Wahrnehmungsstudie erlebt hatten, kann eine derartige Wirkung auch für die vorliegende Studie in  
548 Betracht gezogen werden. Eine Projektion wahrgenommener Bewegungseigenschaften auf die eigene  
549 Person würde sich interindividuell unterschiedlich auswirken und würde die interindividuelle  
550 Variabilität des Sensitivitätsmaßes erhöhen. Dies würde zudem erklären, warum einige  
551 Versuchspersonen Identifikationsleistungen unterhalb der Zufallsschwelle von 0,5 aufwiesen.

552           Es ließ sich kein Hinweis darauf finden, dass die Sonifikationen einzelner Ruderer besonders  
553 gut von anderen zu differenzieren waren und von mehreren Personen vermehrt als die eigenen Stimuli  
554 ausgewählt wurden. Somit scheinen keine stimulusbasierten Verzerrungen aufgetreten zu sein, und es  
555 kann davon ausgegangen werden, dass die Variabilität der Leistungen interindividuelle Unterschiede  
556 in der Identifikationsleistung reflektiert.

557           Der Sensitivitätsindex  $A'$  spiegelt im Kontext dieser Arbeit die Fähigkeit wider, die  
558 sonifizierte Parameter-Zeit-Verläufe erfolgreich mit den intern (andersmodal) repräsentierten  
559 Bewegungen abzugleichen. Unter der Annahme einer interindividuell unterschiedlich ausgeprägten  
560 Fähigkeit zu solch einer Attribution wurde eine Kovarianzanalyse durchgeführt, die einen  
561 Zusammenhang zwischen dieser Fähigkeit und der Schätzung der Schlagfrequenzen prüfte. Es konnte  
562 eine signifikante Kovariation zwischen  $A'$  und dem Faktor Eigen/Fremd belegt werden. Somit kann  
563 die Attribuierungsleistung individuelle Leistungsunterschiede bei der Schätzung von

564 Schlagfrequenzen eigener und fremder Bewegungen erklären. Dies entspricht Annahmen der  
565 Embodiment Forschung, nach der eine Modellierung wahrgenommener Bewegungen mittels eigener  
566 motorischer Repräsentationen erfolgt (Beilock & Hohmann, 2010). Diejenigen Versuchspersonen, die  
567 es besser als andere schafften, auf Basis des Stimulus-Materials einen Bezug zur eigenen  
568 Bewegungsrepräsentation herzustellen, könnten demnach stärker eigene Bewegungsrepräsentationen  
569 für eine interne Modellierung genutzt haben.

570           Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen individuellen motorischen Fähigkeiten und  
571 individuellen Wahrnehmungsleistungen liefert die signifikante Kovariation zwischen  
572 Wahrnehmungsaufgabe und Synchronisationsleistung. Letztere spiegelt wie zuvor beschrieben den  
573 individuellen Status einer perzeptuomotorischen Kalibrierung wider, die somit ebenfalls  
574 wahrnehmungsseitig relevant zu sein scheint und die These einer internen Modellierung der gehörten  
575 Bewegung weiter stützt.

576           Bei diesen Zusammenhängen handelt es sich um partielle Kovariationen, d.h., dass die  
577 Identifikations- und die Synchronisationsleistung unabhängig voneinander Varianz der  
578 Wahrnehmungsleistung aufklären. Dies ist ein interessanter Aspekt, da auf diese Weise die  
579 Beteiligung von zwei unterschiedlichen Komponenten der perzeptuomotorischen Repräsentation an  
580 einem Wahrnehmungsprozess nachgewiesen wird. Der Synchronisationsfehler steht in Bezug zur  
581 zeitlichen Ausrichtung einer Bewegungshandlung, während der Identifikationsindex aufgrund  
582 standardisierter Stimuluslängen und Sonifikationen in Relation zum Parameter-Zeit-Verlauf steht.

583           Unter Kontrolle dieser Parameter konnten über den Haupteffekt Eigen/Fremd unterschiedliche  
584 Schätzleistungen für das Hören von Sonifikationen eigener und fremder Bewegungen nachgewiesen  
585 werden. Dies ist konform zu den Ergebnissen früherer Studien und ebenfalls im Einklang mit der  
586 Annahme einer internen Simulation beobachteter Bewegungen (Bischoff et al., 2012; Knoblich et al.,  
587 2002). Darüberhinausgehend belegt die vorliegende Studie erstmals, dass dieser Effekt auch in einer  
588 neuartigen Modalität – einer artifiziellen Bewegungsakustik - erzeugt werden kann, über die die  
589 Versuchspersonen in Übungsprozessen vorab keine perzeptuomotorischen Koaktivierungen etabliert  
590 haben können.

591 Eine derartige Wirkung von Bewegungssonifikation könnte in Zusammenhang mit einer  
592 spezifischen Gehirn-Region stehen: Schmitz et al. (2013) berichteten von einer Aktivierung des Gyrus  
593 supramarginalis mittels sonifizierter Kinematik. Scheef et al. (2009) belegen eine Aktivierung  
594 desselben Areals bei der Bewertung von Sonifikationen dynamischer Bewegungsparameter. Der  
595 Gyrus supramarginalis wird spezifisch mit unterschiedlichen Wahrnehmungen eigener und fremder  
596 kinematischer Stimuli assoziiert (Bischoff et al., 2012, Macuga & Frey, 2011). Somit könnte er  
597 wichtiger Baustein des neuronalen Netzwerkes sein, welches verstärkt durch Bewegungssonifikation  
598 angesprochen wird und in Teilen für die beobachteten Effekte verantwortlich ist.

599

## 600 **5 Schlussfolgerung**

601 Keller, Knoblich und Repp (2007) belegen, dass sensomotorische Synchronisation, wie auch das  
602 Wiedererkennen selbst gespielter Piano-Sequenzen auf Basis interner Simulationen von Handlungen  
603 erfolgen. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie deuten darauf hin, dass das Hören einer sonifizierten  
604 menschlichen Bewegung ähnliche wahrnehmungs- und bewegungsbezogene Wirkungen erzeugt, die  
605 auf einer internen perzeptuomotorischen Simulation der Bewegung basieren. Für die Trainingspraxis  
606 in Mannschaftssportarten eröffnen sich zukünftig auf Basis individueller Echtzeit-Sonifikationen  
607 zusätzliche Übungsdimensionen, die dem akustisch konfigurierten Zusammenspiel in Ensembles und  
608 Orchestern durchaus nahe kommen kann. Für das Mannschaftsrudern ergibt sich die Perspektive der  
609 Erhöhung der interpersonalen Synchronisations- oder Abstimmungsgenauigkeit. Dies ließe sich z.B.  
610 über ein akustisches Bewegungsmodell realisieren, das alle Mannschaftsmitglieder zeitsynchron per  
611 Funktechnik übermittelt bekommen (uni-direktionale Synchronisation und interpersonale  
612 Technikkoordination). Darüber hinausgehend ist bei entsprechender Messtechnik auch eine bi-  
613 direktionale Synchronisation und interpersonale Technikkoordination denkbar, bei der die  
614 Bewegungstechnik(en) einer oder mehrerer Personen allen anderen akustisch in Echtzeit zur  
615 Verfügung gestellt werden. Entsprechend konnten Effenberg et al. (2016) kürzlich belegen, dass eine  
616 Sonifikation kinematischer und dynamischer Parameter Veränderungen der Rudertechnik im  
617 Lernprozess induziert, die über rhythmische Anpassungen hinausgehen.

618 **Interessenskonflikte**

619 Der korrespondierende Autor gibt für sich und seine Koautoren an, dass kein Interessenkonflikt  
620 besteht.

621

622 **Danksagung**

623 Die Autoren bedanken sich bei der Leibniz Universität Hannover für die Forschungsförderung im  
624 Rahmen des Projekts „Kognition in Bewegung“ (60460288).

625

626 **Literatur**

- 627 Agliotti, S. M., Cesari, P., Romani, M., & Urgesi, C. (2008). Action anticipation and motor resonance  
628 in elite basketball players. *Nature Neuroscience*, *11*, 1109-1116.
- 629 Aschersleben, G. (2002). Temporal control of movements in sensorimotor synchronization. *Brain and*  
630 *Cognition*, *48*, 66-79.
- 631 Beilock, S. L., & Hohmann, T. (2010). Embodied Cognition. In: T. Hohmann, T. Heinen und M.  
632 Raab: Embodiment. *Zeitschrift für Sportpsychologie*, *17*(4), 120-129.
- 633 Bischoff, M., Zentgraf, K., Lorey, B., Pilgramm, S., Balsler, N., Baumgartner, E., Hohmann, T., Stark,  
634 R., Vaitl, D., & Munzert, J. (2012). Motor familiarity: Brain activation when watching kinematic  
635 displays of one's own movements. *Neuropsychologia*, *50*, 2085-2092.
- 636 Bangert, M., & Altenmüller, E. (2003), Mapping Perception to Action in Piano Practice: A  
637 longitudinal DC-EEG-study, *BMC Neuroscience*, *4*, 26-36.
- 638 Blackmore, S. J., Wolpert, D., & Frith, C. (2000). Why can't you tickle yourself? *NeuroReport*, *11*,  
639 11-16.
- 640 Cesari, P., Camponogara, I., Papetti, S., Rocchesso, D., & Fontana, F. (2014). Might as well jump:  
641 sound affects muscle activation in skateboarding. *PLoS One* 2014; *9*(3): e90156.
- 642 Chen, L., & Vroomen, J. (2013). Intersensory binding across space and time: a tutorial review.  
643 *Attention, Perception, & Psychophysics*, *75*(5), 790-811.
- 644 D'Ausilio, Novembre, G., Fadiga, L., & Keller, P.E. (2014). What can music tell us about social  
645 interaction? *Trends in Cognitive Sciences*, *19*(3), 111-114.
- 646 Demos, A. P., Chaffin, R., Begosh, K. T., Daniels, J. R., & Marsh, K. L. (2012). Rocking to the Beat:  
647 Effects of Music and Partner's Movements on Spontaneous Interpersonal Coordination. *Journal of*  
648 *Experimental Psychology: General*, *141*(1), 49-53.
- 649 Dubus, G., & Bresin, R. (2013). A Systematic Review of Mapping Strategies for the Sonification of  
650 Physical Quantities. *PLoS ONE*, *8*(12), e82491.

- 651 Dubus, G., & Bresin, R. (2014). Exploration and evaluation of a system for interactive sonification of  
652 elite rowing. *Sports Engineering*, 18, 29-41.
- 653 Effenberg, A. O. (1996). *Sonification – Ein akustisches Informationskonzept zur menschlichen*  
654 *Bewegung*. Schorndorf: Hofmann.
- 655 Effenberg, A.O. (2005). Movement sonification: Effects on perception and action. *IEEE Multimedia*,  
656 12(2), 53-59.
- 657 Effenberg, A. O., Fehse, U., Schmitz, G., Krueger, B., & Mechling, H. (2016). Movement Sonification:  
658 Effects on Motor Learning beyond Rhythmic Adjustments. *Frontiers in Neuroscience*, 10:219.  
659 doi:10.3389/fnins.2016.00219
- 660 Hanson, J. V., Heron, J., & Whitaker, D. (2008). Recalibration of perceived time across sensory  
661 modalities. *Exp. Brain Res.* 185, 347–352.
- 662 Hermann, T., Hunt, A., & Neuhoff, J. (2011). *The Sonification Handbook*. Berlin: Logos Verlag.
- 663 Heuer, H. (1988). Motorikforschung zwischen Elfenbeinturm und Sportplatz. In R. Dauterive (Hrsg.),  
664 *Neuere Aspekte der Motorikforschung. Aktuelle Motorikforschung in der Sportwissenschaft* (S. 52-69).  
665 Bielefeld: Deutsche Vereinigung für Sportwissenschaft.
- 666 Keller, P. E., Knoblich, G., & Repp, B. H. (2007). Pianist duet better when they play with themselves:  
667 On the possible role of action simulation in synchronization. *Consciousness and Cognition*, 16, 102-  
668 111.
- 669 Knoblich, G., & Flach, R. (2001). Predicting action effects: Interactions between perception and  
670 action. *Psychological Science*, 12, 467-472.
- 671 Knoblich, G., Seigerschmidt, E., Flach R., & Prinz, W. (2002). Authorship effects in the prediction of  
672 handwriting strokes: Evidence for action simulation during action perception. *The Quarterly Journal of*  
673 *Experimental Psychology*, 55 (A), 1027-1046.
- 674 Loras, H., Sigmundsson, H., Talcott, J. B., Öhberg, F., & Stensdotter, A. K. (2012). Timing  
675 continuous or discontinuous movements across effectors specified by different pacing modalities and  
676 intervals. *Experimental Brain Research*, 220, 335-347.

677 Loula, F., Prasad, S., Harber, K. & Shiffrar, M. (2005). Recognizing people from their movement.  
678 *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31, 210-220.

679 Macuga, K. L., & Frey, S. H. (2011). Selective responses in right inferior frontal and supramarginal  
680 gyri differentiate between observed movements of oneself vs. another. *Neuropsychologia*, 49, 1202–  
681 1207.

682 Maes, P.-J., Leman, M., Palmer, C., & Wanderley, M. (2014). Action-based effects on music  
683 perception. *Frontiers in Psychology*, 4, 1008

684 McIntosh, G.C., Brown, S.H., Rice, R.R., & Thaut, M.H. (1997). Rhythmic auditory–motor  
685 facilitation of gait patterns in patients with Parkinson's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery &*  
686 *Psychiatry*, 62 (1), 22–26.

687 Miles, L. K., Nind, L. K., & Macrae, C. N. (2010). Moving memories; Behavioral synchrony and  
688 memory for self and others. *Journal of Experimental Social Psychology*, 46, 457-460.

689 Paladino, M.-P., Marrurega, M., Pavani, F., & Schubert, T. W. (2010). Synchronous multisensory  
690 stimulation blurs self-other boundaries. *Psychological Science*, 21(9), 1202-1207.

691 Pecenka, N., & Keller, P. (2011). The role of temporal prediction abilities in interpersonal  
692 sensorimotor synchronization. *Experimental Brain Research*, 3, 505-515.

693 Pizzera, A., & Hohmann, T. (2015). Acoustic information during motor control and action perception:  
694 A review. *The Open Psychology Journal*, 8(1), 183-191.

695 Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: a review of the tapping literature. *Psychonomic*  
696 *Bulletin & Review*, 12, 969-992.

697 Repp, B. H., & Knoblich, G. (2004). Perceiving action identity: how pianists recognize their own  
698 performance. *Psychological Science*, 15(9), 604-609.

699 Richardson, M. J., Marsh, K. L., Isenhower, R. W., Goodman, J. R., & Schmidt, R. C. (2007).  
700 Rocking together: dynamics of unintentional interpersonal coordination. *Human Movement Science*,  
701 26(6), 867-891.

702 Rodger, M.W. M., & Craig, C.M. (2011). Timing Movements to Interval Durations Specified by  
703 Discrete or Continuous Sounds. *Experimental Brain Research*, 214, 393–402.

704 Schaffert, N., Mattes, K., & Effenberg, A. O. (2011). An investigation of online acoustic information  
705 for elite rowers in on-water training conditions. *Journal of Human Sport and Exercise*, 6(2), 392-405.

706 Schaffert, N. (2011). *Sonifikation des Bootsbeschleunigungs-Zeit-Verlaufs als akustisches Feedback*  
707 *im Rennrudern*. Berlin: Logos Verlag. ISBN 978-3-8325-3008-2.

708 Scheef, L., Boecker, H., Daamen, M., Fehse, U., Landsberg, M. W., Granath, D.O., Mechling, H., &  
709 Effenberg, A.O. (2009). Multimodal audio-visual motion processing in area V5/MT: Evidence from an  
710 artificial class of audio-visual events. *Brain Research*, 1252, 94-104.

711 Schmitz, G., & Effenberg, A.O. (2012). Perceptual effects of auditory information about own and  
712 other movements. In *Proceedings of the 18th Annual Conference on Auditory Display, Book of*  
713 *Abstracts*, (S. 89-94).

714 Schmitz, G., & Effenberg, A. O. (im Druck). Sound Joined Actions in Rowing and Swimming. In: C.  
715 Meyer, & U. v. Wedelstaedt: *Moving Bodies in Interaction – Interacting Bodies in Motion*. John  
716 Benjamins Publishing Company: Amsterdam.

717 Schmitz, G., Mohammadi, B., Hammer, A., Heldmann, M., Samii, A., Münte, T.F., & Effenberg,  
718 A.O. (2013). Observation of sonified movements engages a basal ganglia frontocortical network.  
719 *BMC Neuroscience*, 14:32. doi:10.1186/1471-2202-14-32.

720 Sebanz, N. & Knoblich, G. (2009). Prediction in joint action: what, when, and where. *Topics in*  
721 *Cognitive Science*, 1(2), 353-367.

722 Shadmehr, R., Smith, M. A., & Krakauer, J. W. (2010). Error correction, sensory prediction and  
723 adaptation in motor control. *Annual Review of Neuroscience*, 33, 89-108.

724 Sigrist, R., Rauter, G., Marchal-Crespo, L., Riener, R., & Wolf, P. (2015). Sonification and haptic  
725 feedback in addition to visual feedback enhances complex motor task learning. *Experimental Brain*  
726 *Research*, 233, 909-925.

727 Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., & Wolf, P. (2013). Augmented visual, auditory, haptic, and  
728 multimodal feedback in motor learning: a review. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20, 21-53.

729 Stanislav, H., & Todorov, N. (1999). Calculation of signal detection theory measures. *Behavior,*  
730 *Research Methods, Instruments, & Computers*, 31(1), 137-149.

731 Varlet, M., Marin, L., Issartel, J., Schmidt, R.C., & Bardy, B.G. (2012): Continuity of visual and  
732 auditory rhythms influences sensorimotor coordination. *PloS One*, 7(9), e44082.

733 Varni, G., Dubus, G., Oksanen, S., Volpe, G., Fabiani, M., Bresin, R., Kleimola, J., Välimäki, V., &  
734 Camurri, A. (2012). Interactive sonification of synchronization of motoric behavior in social active  
735 listening to music with mobile devices. *Journal of Multimodal User Interfaces*, 5(3), 157-173.

736 Vinken, P. M., Kröger, D., Fehse, U., Schmitz, G., Brock, H., & Effenberg, A. O. (2013). Auditory  
737 Coding of Human Movement Kinematics. *Multisensory Research*, 26(6), 533-552

738 Zentgraf, K., & Munzert, J. (2014). *Kognitives Training im Sport*. Göttingen: Hogrefe.

739

740 **Legenden**

741 **Abb. 1** Messparameter Ruderergometer. Dargestellt sind die Parameterverläufe eines Ruderschlags bei  
742 einer exemplarischen Versuchsperson in zeitlicher Relation zu einem Ruderer, dessen Bewegungen  
743 (Modell) in unterschiedlichen Formen vertont wurde. In der Bedingung Kinematik ruderte die  
744 Versuchsperson zu Vertonungen der Auszuglänge und der Rollsitze position (oben), in der Bedingung  
745 Dynamik zu Vertonungen der Griffkraft und der Stembrett kraft (unten). Minima und Maxima der  
746 Auszuglänge wurden auf dieselben Tonhöhen abgebildet wie Minima und Maxima und der Griffkraft.  
747 Ebenso wurde zwischen der Rollsitze position und der Stembrett kraft verfahren. In der  
748 Kontrollbedingung wurde lediglich ein diskretes Tonsignal zu Beginn des Ruderschlags (Zeitpunkt 0)  
749 präsentiert

750

751 **Abb. 2** Konstanter Synchronisationsfehler. Dargestellt sind die Mittelwerte und  
752 Standardabweichungen der zeitlichen Abweichungen zwischen den Bewegungen der  
753 Versuchspersonen und dem sonifizierten Ruderer (repräsentiert durch den Wert 0) zum Beginn und  
754 zum Ende der Zugphase. Die unterschiedlichen Linien spiegeln die konstanten Fehler bei Vertonung  
755 der Griff- und der Stembrett kraft (Dynamik), bei Vertonung der Auszuglänge und der  
756 Rollsitze position (Kinematik) sowie in der Kontrollbedingung (Kontrolle) wider. Positive Werte  
757 entsprechen einer dem Modell zeitlich nachfolgenden Bewegung

758

759 **Abb. 3** Variabler Synchronisationsfehler. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen  
760 der variablen Fehler aller Versuchspersonen zum Beginn und Ende der Zugphase. Der variable Fehler  
761 wurde als intraindividuelle Standardabweichung der zeitlichen Abweichungen zwischen den  
762 Versuchspersonen und dem Rudermodell definiert. Die unterschiedlichen Linien spiegeln die  
763 entsprechenden Werte bei Vertonung der Griff- und der Stembrett kraft (Dynamik), bei Vertonung  
764 der Auszuglänge und der Rollsitze position (Kinematik) sowie in der Kontrollbedingung (Kontrolle)  
765 wider

766

767 **Abb. 4** Sensitivitätsmaß der Identifikationsleistung. Dargestellt sind die individuellen  
768 Sensitivitätsmaße ( $A'$ ) der 15 teilnehmenden Versuchspersonen in der Identifikationsaufgabe. Die  
769 Berechnung von  $A'$  wurde anhand der Vorgaben von Stanislav und Todorov (1999) vorgenommen  
770

771 **Abb. 5** Schätzfehler. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der konstanten (a)  
772 und variablen (b) Fehler aller Versuchspersonen in einer Aufgabe zur Schätzung von  
773 Schlagfrequenzen. Die Versuchspersonen hörten Vertonungen der Auszuglängen und  
774 Rollsitze positionen (Kinematik) oder der Griff- und Stembrettkräfte (Dynamik) der eigenen Person  
775 sowie die fremder Personen. Positive konstante Fehler entsprechen einer Überschätzung der  
776 Schlagfrequenzen

Abbildung 1

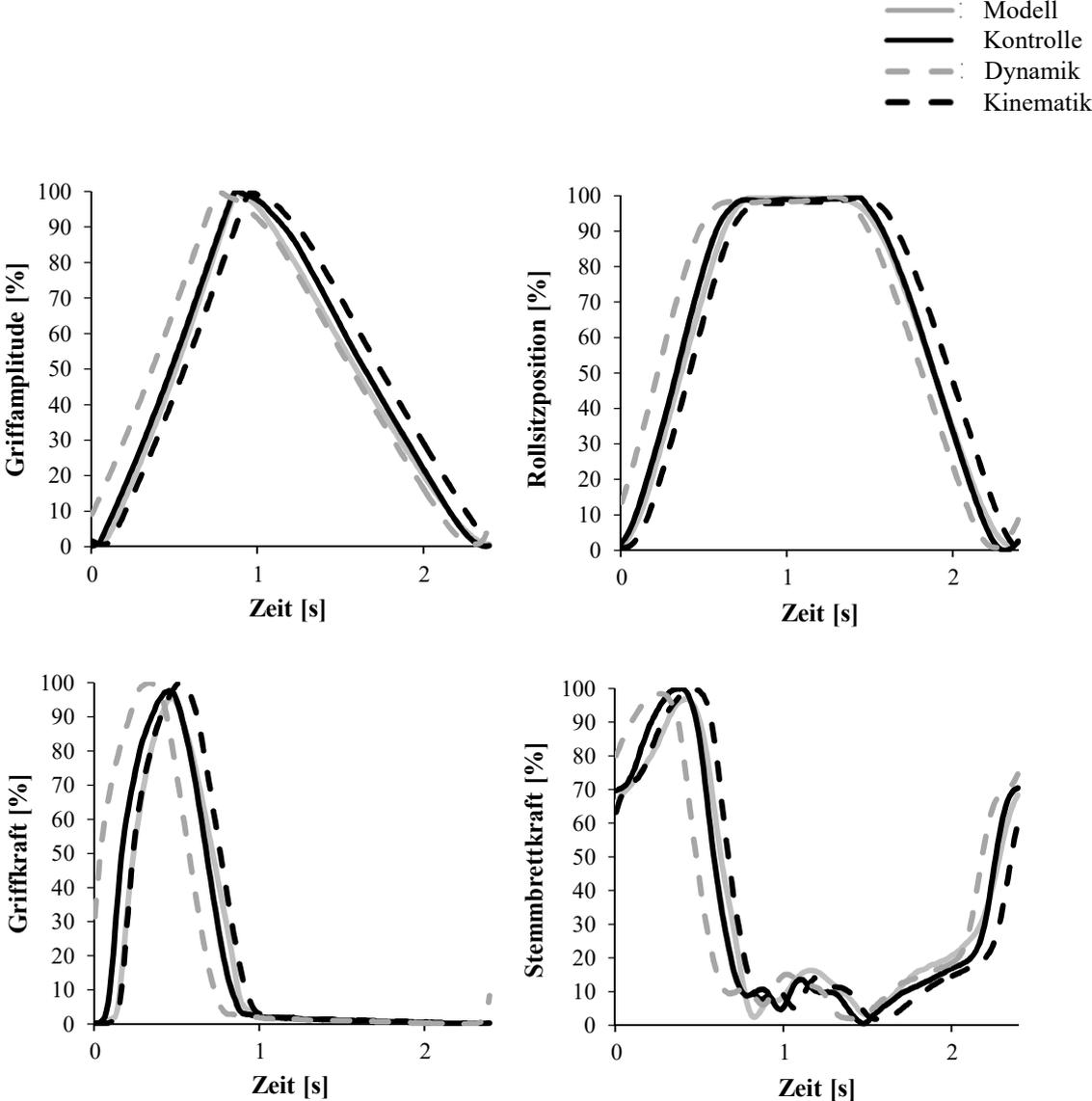


Abbildung 2

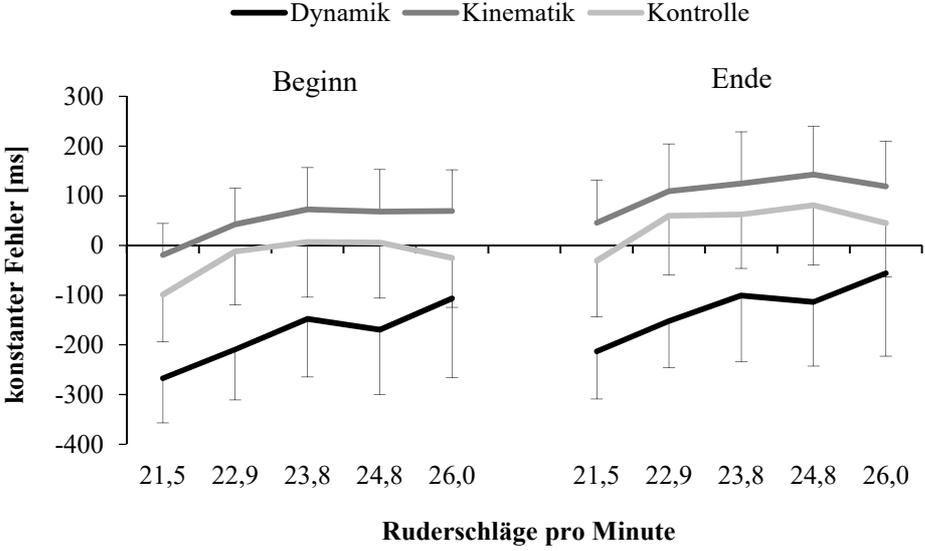


Abbildung 3

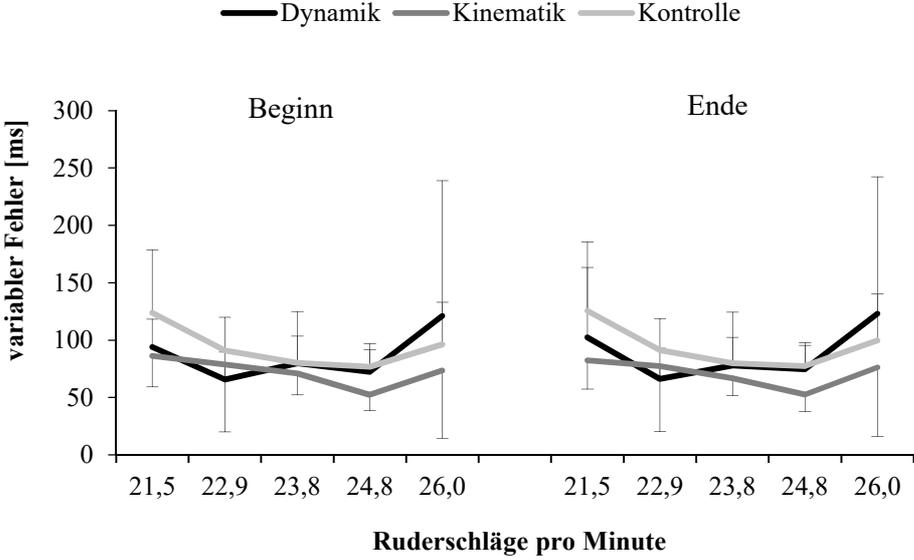


Abbildung 4

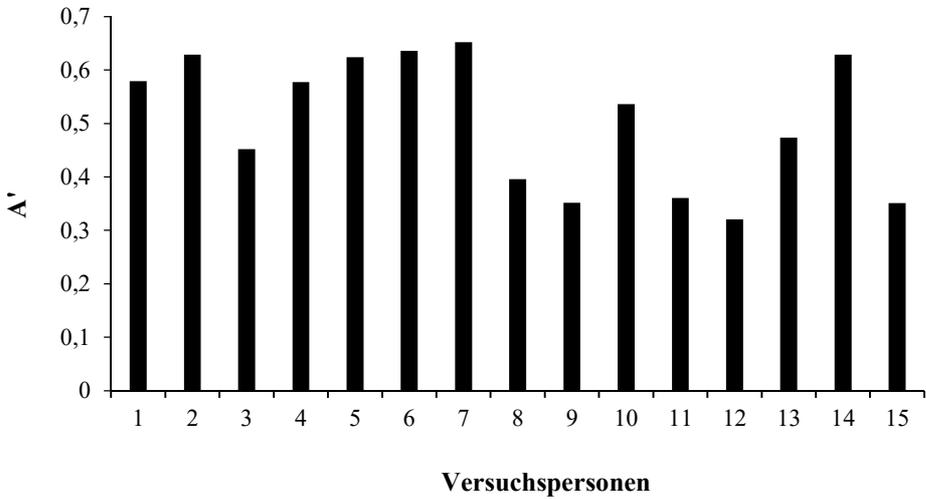


Abbildung 5

