

# Abbildung von Druck- und Vibrationsreizen auf dem menschlichen Körper durch einen variablen taktilen Hüftgurt

Matti SCHWALK, Michael SPERL, Thomas MAIER

*Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) –  
Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design, Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart*

**Kurzfassung:** In Situationen mit hohem visuellem Informationsgehalt kann der Mensch bei der Mensch-Maschine-Interaktion durch taktil dargebotene Informationen in seiner Wahrnehmung und Kognition unterstützt werden (Schlick 2010). Inhalt des vorliegenden Beitrags ist die Entwicklung eines taktilen Anzeigers in Form eines Hüftgurts, mit dem eine situative Informationskodierung durch Druck- und Vibrationsreize untersucht, analysiert und verglichen werden kann. Erste Untersuchungsergebnisse bzgl. der Erkennbarkeit der verschiedenen Reiztypen und der dabei erreichten Bedienzeiten werden vorgestellt.

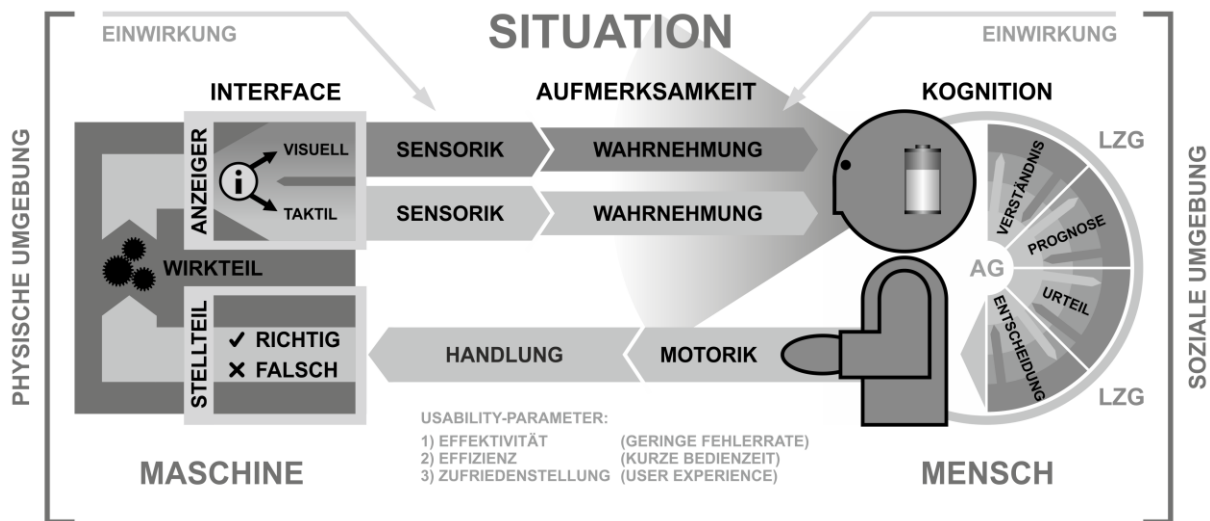
**Schlüsselwörter:** Mensch-Maschine-Interaktion, Taktile Semantik, Taktile Anzeiger, Hüftgurt, Druckreize, Vibrationsreize

## 1. Einleitung und Relevanz

Durch visuell-taktile Informationsdarbietung können kürzere Reaktionszeiten, sowie geringere Fehlerraten erreicht werden als bei rein visueller Darbietung (Petrov et al. 2011; Schwalk & Maier 2014). In den Bereichen Medizintechnik und Luftfahrt kommen deshalb bereits verschiedene taktile Anzeiger bzw. Displays zum Einsatz. Ein großer Teil dieser Geräte beschränkt sich jedoch auf Vibrationsreize. Bedingt durch die ständig wachsende Anzahl an Funktionen verschiedenster technischer Systeme, sind für eine situationsabhängige und möglichst intuitive Kodierung von taktilen Informationen grundlegende und vergleichende Untersuchungen von Druck- und Vibrationsreizen zwingend notwendig. Dies wird mit der entwickelten Vorrichtung durch 8 gleichmäßig um die Hüfte angebrachte Aktuator-Einheiten realisiert, die mit jeweils einer Wirkgeometrie an derselben Stelle sowohl Druck-, als auch Vibrationsreize auf dem menschlichen Körper erzeugen können.

Um den Kontext des vorliegenden Beitrags zu verdeutlichen, wird auf das Basis-Schema der Mensch-Maschine-Interaktion zurückgegriffen (Maier 2014). Darin wird der Mensch von der Wahrnehmung über die Kognition bis zur Handlung ganzheitlich erfasst, um das technische System auf seine Bedürfnisse ausrichten zu können. Dieses Basis-Schema wird im Folgenden um weitere Inhalte der kognitiven Ergonomie erweitert und vereint dabei mehrere anerkannte theoretische Modelle in einer Darstellung. Dazu gehören das Informationsverarbeitungsmodell nach Wickens & Hollands (1999), die Theorie zum Situationsbewusstsein (Situation Awareness) von Endsley (1995), allgemeine Aspekte der kognitiven Psychologie von Wentura & Frings (2013), sowie die Definition der Usability nach DIN EN ISO 9241-11 (1999). Die genannten Modelle werden kombiniert und mit der Wahrnehmung durch visuell-taktile Anzeiger verknüpft. Die auf dieser Basis entwickelte Darstellung in Abbildung 1 zeigt den vollständigen Kreislauf der Interaktion zwischen Mensch

(rechts) und Maschine (links), beginnend bei der Informationskodierung und -darbietung über das multimodale Interface.



**Abbildung 1:** Erweitertes Basis-Schema der Mensch-Maschine-Interaktion für kognitive Ergonomie visuell-taktiler Anzeigesysteme.

## 2. Entwicklung des Prüfstands

Im vorliegenden Beitrag liegt der Fokus auf der grundlegenden, vergleichenden Untersuchung von Druck- und Vibrationsreizen. Zunächst wird die Entwicklung des taktilen Hüftgurts beschrieben.

### 2.1 Stand der Technik und Forschung

Taktile Displays kommen bereits in vielfältigen Ausführungen in verschiedenen Branchen zum Einsatz. Dazu gehören im Bereich Fahrzeuge z. B. Vibrationsaktuatoren im Fahrersitz und Lenkrad, sowie ein Gaspedal, das Gegenkraft erzeugt. In der Medizintechnik werden vibrierende Operationswerkzeuge zur Navigation, sowie Armmanschetten zur Anzeige von Vitalparametern verwendet. Des Weiteren gibt es taktile Anzeiger für die Blindennavigation und für Piloten, also häufig dort, wo der visuelle Wahrnehmungskanal beeinträchtigt oder überlastet ist. Am IKTD wurden außerdem bereits taktile Displays für den Unterarm (Schwalk & Maier 2014) und Brustbereich entwickelt, die mit Druckreizen arbeiten. Im Bereich taktiler Gürtel gibt es verschiedene Arbeiten von Cholewiak, der sich u. a. mit vibrotaktilen Mustern sowie der taktilen Wahrnehmung im Alter auseinandersetzt. McGrath & Rupert (2014) weisen Vorteile durch einen vibrotaktilen Gürtel zur Unterstützung des Gleichgewicht-Haltens sowohl für Helikopter-Piloten als auch im medizinischen Bereich nach. Zusammenfassend lässt sich jedoch festhalten, dass bisher keine bekannte Vorrichtung über die Möglichkeit verfügt, an derselben Körperstelle sowohl Druck als auch Vibrationsreize aufzubringen, um diese zu vergleichen. Bzgl. der menschlichen Wahrnehmungsgrenzen muss bei der Entwicklung insbesondere die simultane Raumschwelle (kleinster wahrnehmbarer Abstand zwischen zwei parallelen Druckreizen, auch Zweipunktschwelle) berücksichtigt werden. Diese variiert bei Erwachsenen je nach Körperregion zwischen 1 mm und 70 mm. Die sukzessive Raumschwelle (Reize nacheinander) ist bis zu viermal niedriger (Schlick

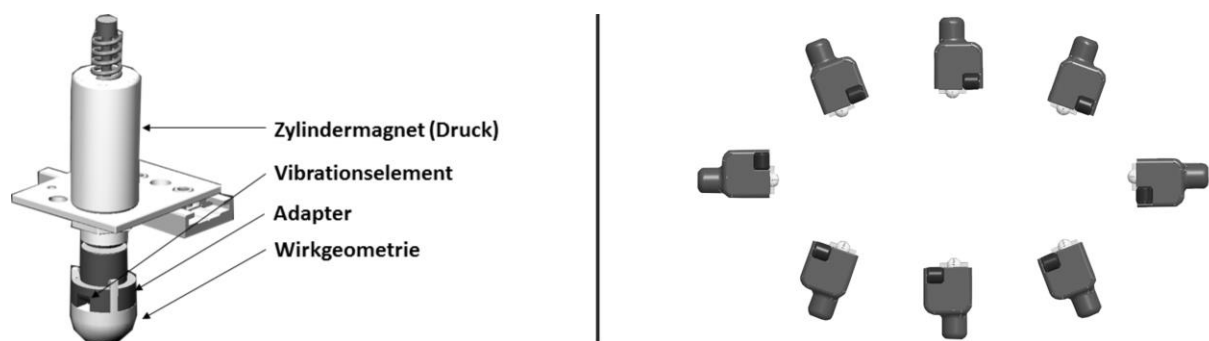
2010, S. 347). Ferner führen spitze Konturen nach Grunwald & Beyer (2001, S 30 f.) zu einer stärkeren Reizintensität als größere Wirkflächen. Die kleinste wahrnehmbare Eindringtiefe eines Reizstößels in sensibleren Körperregionen beträgt 0,01 mm, bei Aufbringung von Vibrationsreizen reicht bei 200 Hz bereits eine Amplitude von 0,1  $\mu\text{m}$ , um eine Empfindung auszulösen. (Schlick 2010, S. 347)

## 2.2 Konzeption

Auf Basis von Recherche, Funktionsstruktur und Anforderungsliste erfolgte die Konzeptgenerierung, wobei jeweils verschiedene Lösungen für Teilfunktionen generiert wurden. Durch systematisches und sinnvolles Kombinieren dieser Teillösungen wurden 6 Lösungsvarianten erstellt, wobei insbesondere verschiedene Körperregionen abgedeckt wurden: Oberarmmanschette, Hüftgurt, Rucksack, Armband, Stuhl, Armlehne. Durch eine systematische Bewertung nach VDI-Richtlinie 2225 (1998) ergab sich die höchste technische Wertigkeit von 0,88 für den taktilen Hüftgurt, welcher daher im Konstruktionsprozess weiter konkretisiert wurde. Hauptvorteile dieser Lösung sind unter anderem die Praxisrelevanz und mögliche Mobilität, insbesondere bei einer späteren, seriennahen Ausführung. Die umlaufende Anordnung der Aktuatoren um den Rumpf des Probanden sollte sich außerdem positiv auf das intuitive Verständnis des Displays bei Navigationsaufgaben auswirken. Ferner kann der Prüfstand gleichermaßen von Rechts- und Linkshändern verwendet werden.

## 2.3 Entwurf

Für den ausgewählten taktilen Hüftgurt wurde eine Aktuator-Einheit konstruiert, die in 8-facher Ausführung rund um den Körper angeordnet werden kann (siehe Abb. 2). Die Anzahl von 8 Aktuatoren wird (für rein vibrotaktile Reize) von Cholewiak et al. (2004) empfohlen.

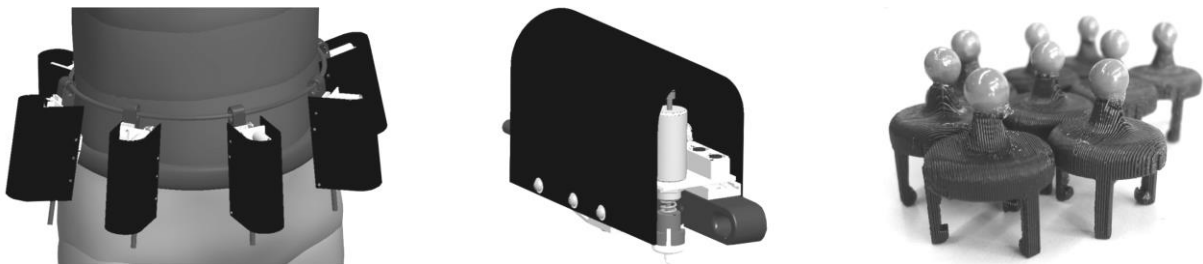


**Abbildung 2:** Aktuator-Einheit (links) und Anordnung am Hüftgurt (rechts, inklusive Schutzhauben).

Über einen Zylindermagneten mit ca. 3 mm effektivem Hub im montierten Zustand und ständigem Kontakt zum Probanden wird der Druckreiz realisiert. Zur Erzeugung von Vibration ist zusätzlich ein Vibrationsmotor mithilfe eines Adapters an der Hubachse des Zylindermagneten befestigt. Somit wird ein simultanes Aufbringen von Druck und Vibration möglich. Über eine austauschbare Wirkgeometrie an der Spitze werden die unterschiedlichen Reiztypen auf den Probanden übertragen. Die Ansteuerung der Aktuatoren erfolgt mithilfe der Software LabVIEW.

## 2.4 Ausarbeitung und Aufbau

Nach dem Aufbau eines Funktionsmusters erfolgte die Optimierung und Detaillierung des Prüfstands. Die 8 einzelnen Aktuator-Einheiten werden in gleichmäßigem Abstand zueinander an einem Hüftgurt getragen. Wird als kleinstmöglicher Körperumfang der Taillenumfang der (18- bis 25-jährigen) 5-Perzentil Frau entsprechend DIN 33402-2 (2005) von 625 mm betrachtet, so ergibt sich ein Abstand von ca. 78 mm zwischen den einzelnen Wirkgeometrien, der damit oberhalb der größten simultanen Zweipunktschwelle in diesem Bereich liegt. Abbildung 3 zeigt den ausgearbeiteten taktilen Hüftgurt. Aufgrund des modularen Aufbaus mit 8 einzelnen, frei positionierbaren Aktuator-Einheiten sind auch Anwendungen mit weniger oder anders angeordneten Wirkgeometrien möglich.

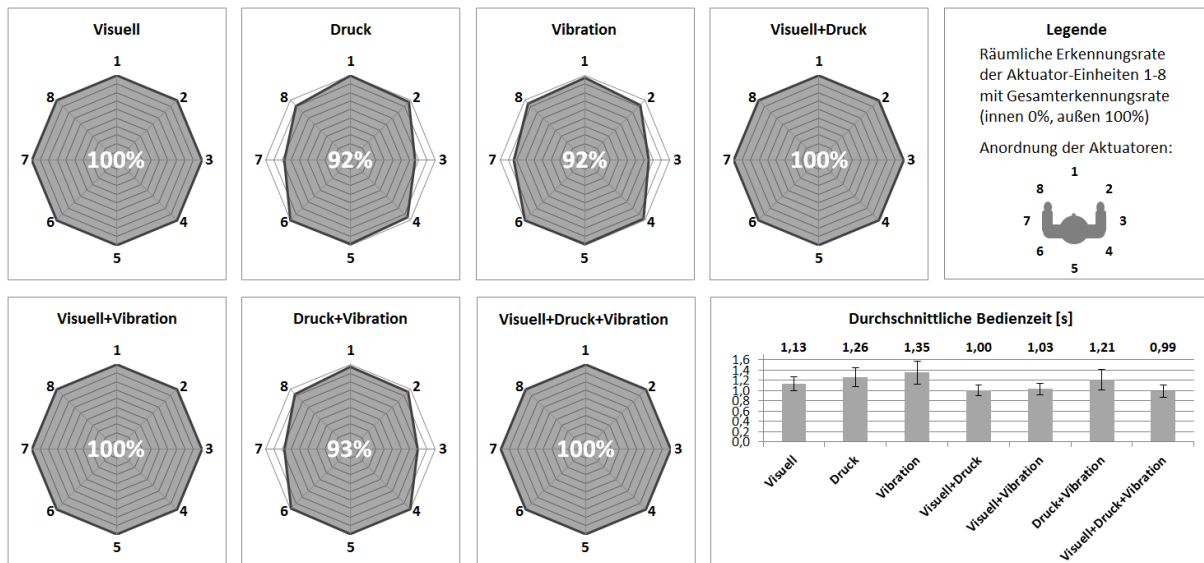


**Abbildung 3:** Aktuator-Anordnung am Körper (links), Aktuator-Einheit mit Schutzhaube (Mitte) und Wirkgeometrien (rechts) mit 4 mm großen, kugelförmigen Spitzen.

## 3. Experimentelle Untersuchungen zur räumlichen Erkennbarkeit

Das Probandenkollektiv umfasste 25 Teilnehmer (17 männlich, 8 weiblich). Das Durchschnittsalter lag bei 27,6 Jahren (23 bis 39). Beim Versuch wurden alle 8 Aktuator-Einheiten in gleichmäßiger Anordnung um die Hüfte verwendet. Parallel zum taktilen Display wurde ein visuelles Interface für einen Touchscreen programmiert, auf dem die 8 Richtungen visuell in vergleichbarer Anordnung dargestellt wurden. Nach kurzem, selbständigem Ausprobieren und Vertrautmachen der Probanden mit den taktilen Reizen wurde der Versuch gestartet. Dabei erfolgte jeweils eine Richtungsanzeige, auf die der Proband so schnell wie möglich reagieren und die wahrgenommene Richtung auf dem Touchscreen auswählen sollte. Durch die Verwendung eines Touch Pens wurde eine vergleichbare Betätigung durch die einzelnen Probanden, unabhängig von Hautleitwert, Fingergröße und Betätigungskraft sichergestellt. Die Anzeige der Richtung erfolgte nach dem Zufallsprinzip entweder visuell, durch Druck, durch Vibration oder durch beliebige Kombinationen dieser 3 Darbietungsformen (insgesamt 7 Varianten). Durch einen programmierten Zufallsgenerator war die Abfrage-Reihenfolge bei jedem Probanden unterschiedlich und damit randomisiert. Insgesamt wurde jede mögliche Anzeige dreimal je Proband abgefragt, um potenzielle Verfälschungen durch Ausreißer zu minimieren (Qualitätskontrolle über Standardabweichung). Erfasst wurden mithilfe der Software die Fehler sowie die Bedienzeiten bei der Eingabe. Um eine Vergleichbarkeit der Bedienzeiten sicherzustellen, mussten die Probanden die Taste eines separaten NumPads in definiertem Abstand zum Touchscreen mit dem Touch Pen für eine festgelegte Zeit gedrückt halten, bevor die nächste Richtungsanzeige (nach zufälliger Wartezeit) erfolgte. Die Probanden trugen außerdem einen Gehörschutz, um eine Beeinflussung durch auditive Reize auszuschließen.

Die von Rheinländer (2014) erfassten Daten wurden für jede Art bzw. Kombination der Reizdarbietung ausgewertet und sind in Abb. 4 dargestellt. In 7 Netzdiagrammen werden die räumlichen Erkennungsraten in % visualisiert. Ergänzt wird die Abbildung um die dabei erreichten Bedienzeiten (Mittelwerte mit Standardabweichung).



**Abbildung 4:** Räumliche Erkennbarkeit und Bedienzeiten bei verschiedenen Reizdarbietungen.

#### 4. Diskussion und Fazit

Die Ergebnisse (siehe Abb. 4) zeigen erwartungsgemäß immer dann eine 100-prozentige Erkennungsrate, sobald die Darbietung den visuellen Wahrnehmungskanal einschließt. Ferner zeigt sich bei rein taktiler Wahrnehmung eine verringerte Erkennbarkeit seitlich am Körper, die dort auf ca. 80% abfällt. In den Bereichen von Bauch und Rücken liegt die Erkennungsrate jedoch auch bei rein taktiler Darbietung bei nahezu 100%. Diese Ergebnisse decken sich mit denen von Cholewiak et al. (2004), sowie Brill & Scerra (2014).

In Abbildung 4 sind zusätzlich zur Erkennungsrate auch die durchschnittlichen Bedienzeiten für die verschiedenen Reizdarbietungen angegeben. Die 8 Richtungen wurden dabei jeweils zusammengefasst. Eine einfaktorische ANOVA ergab, dass es einen Effekt in Bezug auf die Reizdarbietungsart gibt,  $F(2.15, 60.14) = 54.45$ ,  $p < 0.001$  (Greenhouse-Geisser korrigiert). Auf Basis einer anschließend durchgeführten (post-hoc) Analyse durch paarweisen Vergleich mit Bonferroni-Korrektur können folgende Schlüsse gezogen werden: Die Bedienzeit bei einzelner Informationsdarbietung durch Druck oder Vibration ist länger als bei visueller Anzeige ( $p < 0.001$ ). Jedoch können die kürzeren Bedienzeiten der visuellen Anzeige durch die Kombination von Druck + Vibration auch rein taktil erreicht werden, d. h. es gibt bei dieser Kombination keinen signifikanten Unterschied mehr zur visuellen Darbietung ( $p = 0.403$ ). Noch kürzere Bedienzeiten werden im Vergleich dazu durch multimodale Anzeige als Kombination von visuellem Reiz mit Druck, Vibration oder Druck + Vibration beobachtet ( $p < 0.001$ ). Ferner führt die Kombination visuell + Druck + Vibration zu den kürzesten Bedienzeiten. Signifikante Unterschiede gibt es dabei im Vergleich zu allen anderen Darbietungsarten ( $p < 0.001$ ) außer zur Kombination visuell + Druck.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die visuell-taktile Informationsdarbietung insgesamt äußerst vielversprechende Ergebnisse liefert, um geringe Fehlerraten und kurze Bedienzeiten zu erreichen. Zudem wird die Bedeutung des Druckreizes als taktile Reiztyp in Kombination mit visuellen oder Vibrationsreizen deutlich. Der entwickelte taktile Hüftgurt bietet diverse Möglichkeiten, um diese Forschungen weiter voranzutreiben. Seine Besonderheit besteht darin, dass die unterschiedlichen Reiztypen Druck und Vibration an derselben Stelle, direkt nacheinander oder sogar simultan auf den Probanden übertragen werden können. Dank des modularen Aufbaus mit Gürtelclips und des stufenlos verstellbaren Hüftgurts kann der Prüfstand von Personen mit unterschiedlichem Taillenumfang getragen werden und lässt generell verschiedene Anordnungen von 1 bis 8 Wirkgeometrien zu. Mit weiterführenden Untersuchungen zu dem entstehenden Thema „Taktile Semantik“ (situative Informationskodierung mittels Druck- und Vibrationsreizen) sollen langfristig allgemeingültige Empfehlungen für die kognitiv ergonomische Gestaltung von visuell-taktilen Anzeigesystemen abgeleitet werden. Insbesondere in kritischen Bediensituationen kann der Mensch dadurch unterstützt werden, um stets ein adäquates Situationsbewusstsein entwickeln zu können. Denkbar ist eine praktische Anwendung z. B. bei Rettungskräften (Navigation), Medizinern (Patienteninformationen) oder Maschinenbedienern (Statusmeldungen).

## 5. Literatur

- Brill J C, Scerra V E (2014) Effectiveness of Vibrotactile and Spatial Audio Directional Cues for USAF Pararescue Jumpers (PJs). In: T. Ahram, W. Karwowski, T. Marek (ed.): Proceedings of the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics AHFE 2014. Kraków, Poland.
- DIN 33402-2 (2005) Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte
- DIN EN ISO 9241-11 (1999) Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten, Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit – Leitsätze.
- Cholewiak R C, Brill J C, Schwab A (2004) Vibrotactile localization on the abdomen: Effects of place and space. *Perception & Psychophysics*, 66, 970-987.
- Endsley M R (1995) Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 1995 37: Pages 32 ff.
- Grunwald M, Beyer L (2001) *Der Bewegte Sinn – Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung*. Birkhäuser-Verlag, Basel.
- Maier T, Schmid M (2014) Skript zur Vorlesung Technisches Design. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design – Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design, Universität Stuttgart.
- McGrath B, Rupert A (2014) Tactile Displays: From the Cockpit to the Clinic. In: T. Ahram, W. Karwowski, T. Marek (ed.): Proceedings of the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics AHFE 2014. Kraków, Poland.
- Petrov A, Pfeffer S, Maier T (2011) Visuelle Präsentation und taktile Repräsentation – redundante, substitutive oder komplementäre Informationsdarbietung?. In: 9. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme. Berlin.
- Rheinländer J (2014) Untersuchungen zur taktilen Informationskodierung mittels Druck- und Vibrationsreizen bei der Mensch-Maschine-Interaktion. Studienarbeit (Auszug, unveröffentlicht), IKTD – Universität Stuttgart.
- Schlick C (2010) *Arbeitswissenschaft*, 3. Auflage, Seite 993. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Schwalk M, Maier T (2014) Multimodale HMI – Untersuchungen zur Erweiterung der Arbeitsgedächtniskapazität durch visuell-taktile Anzeiger. In: Krzywinski J, Linke M, Wölfel C, Kranke G (Hrsg.) *Entwerfen Entwickeln Erleben 2014 – Beiträge zum Technischen Design*. Dresden.
- VDI-Richtlinie 2225 – Blatt 3 (1998) *Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Technisch-wirtschaftliche Bewertung*.
- Wentura D, Frings C (2013) *Kognitive Psychologie*. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Wickens C D, Hollands J G (1999) *Engineering Psychology and Human Performance*, Third Edition, Pages 10 ff. Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458.