

# Entwicklung und Erprobung von Prototypen zur taktilen Warnung von Menschen in schwierigen Arbeitsbedingungen



## Michael Schultheis

Institut für Arbeitswissenschaft  
Technische Universität Darmstadt  
Petersenstraße 30  
64287 Darmstadt  
schultheis@iad.tu-darmstadt.de

## Jurij Wakula

Institut für Arbeitswissenschaft  
Technische Universität Darmstadt  
Petersenstraße 30  
64287 Darmstadt  
wakula@iad.tu-darmstadt.de

## Sinja Röbig

Institut für Arbeitswissenschaft  
Technische Universität Darmstadt  
Petersenstraße 30  
64287 Darmstadt  
sinja.roebig@iad.tu-darmstadt.de

## Ralph Bruder

Institut für Arbeitswissenschaft  
Technische Universität Darmstadt  
Petersenstraße 30  
64287 Darmstadt  
bruder@iad.tu-darmstadt.de

## Abstract

Die Arbeitssicherheitsanforderungen sind im Bereich des Gleisbaus sehr hoch. Automatische Warnsysteme (AWS) unterstützen die Gleisbauarbeiter. Daher ist es Ziel des EU-ALARP Projektes ein Konzept eines mobilen Warnsystems mit Prototypen zu entwickeln. Eine Warnung von Gleisbauarbeitern in kritischen Situationen ausschließlich über den visuellen und akustischen Kanal ist aufgrund der Umgebungseinflüsse (z. B. Lärm, Regen oder Staub) schwierig. Daher soll zukünftig auch der taktile Kanal für solche Warnungen genutzt werden. Um die Eignung des taktilen Kanals zu prüfen, wurden am Institut für Arbeitswissenschaft (IAD) der TU Darmstadt zwei Pilotstudien durchgeführt, bei welchen die Verwendung von Vibrationsmotoren, Kälteelemente und Earbone Conduction Interfaces im simulierten Nutzungskontext untersucht wurden. Hierbei wurden Anbringungsort, Arbeitshaltung und Anzahl der Aktoren variiert. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Technologien für eine Warnung des Gleisarbeiters geeignet sind. Eine Verwendung mehrerer redundanter Signale, die unterschiedliche Sinneskanäle nutzen, scheint sinnvoll, um den Arbeiter im Fall einer Warnung schnell und sicher zu erreichen.

## Keywords:

/// Warnsystem  
/// vibro-taktil  
/// akustisch  
/// Earbone-Conduction  
/// Gleisbau

## 1. Einleitung

Im Gleisbau wird unter Einfluss von Maschinenlärm und stark belastenden Umgebungsbedingungen gearbeitet (Sauer, 2006). Dies erschwert auch die Warnung der Gleisbauarbeiter in kritischen Situationen. Da die Arbeitssicherheitsanforderungen sehr hoch sind (GUV-V D 33), müssen die Gleisbauarbeiter von automatischen Warnsystemen (AWS) unterstützt werden. In Deutschland werden überwiegend nur zwei Systeme eingesetzt (Sauer, 2003). Beide nutzen zur Warnung die visuelle und akustische Wahrnehmung des Menschen.

Untersuchungen, die im Rahmen des EU-Projektes ALARP (A railway automatic track warning system based on distributed personal mobile terminals) (Vinerbi, et al., 2011; Schultheis et al., 2011) durchgeführt wurden, ergaben, dass in gewissen Situationen eine dritte Signaldarbietungsart sinnvoll ist. Aus diesem Grund führte das Institut für Arbeitswissenschaft an der

TU-Darmstadt zwei Pilotstudien zur taktilen Signalübermittlung beim Menschen durch.

## 2. Vorüberlegungen

Das zur Untersuchung entwickelte Arbeitsmodell (siehe Abb. 1) besteht aus dem eigentlichen Warnsystem und der Arbeitsperson. Das Warnsystem beinhaltet eine Steuerungseinheit, die drei mögliche Arten von Warnsignalgebern ansteuert. Denkbar wäre die Übermittlung von Signalen in visueller, akustischer oder taktiler Form. Zusätzlich ist die Steuereinheit mit einer Schnittstelle in Kontakt, die der Arbeitsperson eine Rückmeldung (z. B. Alarmsignal wurde empfangen) ermöglicht.

Die Arbeitsperson wird nach dem einfachen Stufenmodell (Luczak, 1975, Schlick et al., 2009) dargestellt. Die Aufmerksamkeit des Menschen wird über seine Wahrnehmung erlangt. Die aufgenommenen Reize werden im Gehirn kognitiv verarbeitet und mögliche Handlungsalternativen werden analysiert.

Auf die getroffene Entscheidung folgt eine Handlung. Diese Reaktion des Menschen wird über das Human-Maschine-Interface (HMI) an das Warnsystem weitergegeben und die drei Signalgeber können gestoppt werden (Schultheis et al., 2011). [Abb. 1]

Weiteren Einfluss auf die Funktionalität des Warnsystems haben auch die vom Gleisarbeiter ausgeführten Tätigkeiten (Arbeitsaufgabe) und die Umgebungseinflüsse. Diese stellen für den Gleisbau eine besondere Herausforderung dar, weil die Arbeiter ihre Aufgaben bei Umgebungseinflüssen wie Wind und Wetter sowie unter Einwirkung von Schmutz und Staub auf der Baustelle, ausführen müssen.

Im vorliegenden Beitrag soll aus diesem Arbeitssystem nur auf einen kleinen Ausschnitt eingegangen werden. Die behandelte Fragestellung beschäftigt sich mit der Möglichkeit der Übermittlung einer Warnung über die taktiler Wahrnehmung des Menschen, unter Berücksichtigung der oben genannten erschwerenden

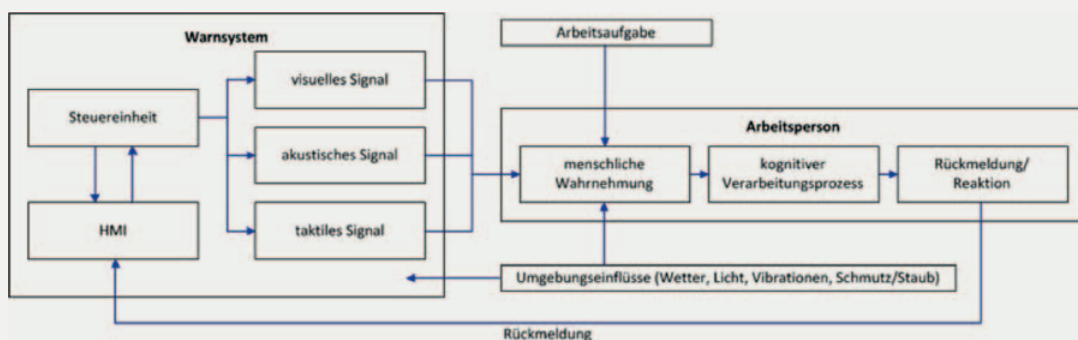


Abb. 1. Arbeitssystem gesamt (in Anlehnung an Schultheis et al., 2011 und Luczak, 1975)

Umgebungsinflüsse. Hierbei wird auf die Übertragung von Warnsignalen über unterschiedliche taktile Reize wie Hitze-/ Kälteempfinden, Vibrationen eingegangen. Zusätzlich soll auch auf Übertragung von Warnsignalen über „Earbone-Conduction“ eingegangen werden. Es handelt sich dabei um eine nicht rein taktile Signalübertragung, da mechanische Schwingungen in den Schädelknochen eingeleitet werden, diese aber über die Gehörschnecke im Innenohr wahrgenommen werden (Békésy, 1932). Da diese Mischform einer taktill-akustischen Übertragung sehr effizient erscheint, soll sie im Rahmen dieses Beitrages mit beschrieben werden.

Die Frage, wie mögliche Prototypen aussehen könnten und wo man sie positionieren müsste, soll bei dieser ersten Untersuchung im Vordergrund stehen.

### 3. Erkenntnisse aus der Literatur

Nach einer Literaturstudie im Bereich der taktilen Warnsysteme konnten für die Studie zwei Untersuchungsschwerpunkte festgelegt werden. Analysiert werden soll zum einen die Warnung über mechanische Schwingungen, und zum anderen das Hitze/Kälte-Empfinden des Menschen. Der Bereich der mechanischen Schwingungen gliedert sich inhaltlich noch mal in zwei Unterformen: die klassische Vibration, erzeugt durch einen Vibrationsmotor (Elektromotor mit einer Unwucht) und die Signalübertragung über einen Earbone Conductor. Beide sollen im Rahmen dieses Beitrages behandelt werden.

#### 3.1. Hitze/Kälte-Empfinden des Menschen

Die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche zeigen für die Temperaturwahrnehmung, dass es sinnvoller ist ein Warnsignal über die Einwirkung von Kälte zu übertragen. Nach Klinke (2010) besitzt der Mensch, über den Körper verteilt, mehr Kalt- als Warmrezeptoren. Aus diesem Grund wird im Folgenden nur noch das Empfinden von Kälte betrachtet. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse zur Kälteempfindung aus den Erkenntnissen der Literatur graphisch dargestellt. Deutlich zu sehen ist, dass besonders an den Armen die Empfindlichkeit gegenüber Kälte sehr ausgeprägt ist. Weniger empfindlich verhält sich hingegen der Brustbereich (Campenhausen, 1981b).

Beim Bau eines Prototyps wurde ein Peltier Element (Abmaße 30X30mm) im Bereich des Unterarms positioniert. Das Peltier Element ist ein elektrothermischer Wandler, das beim Fluss eines elektrischen Stromes einen Wärmestrom zwischen den Seiten des Elements erzeugt. Dadurch wird eine Seite erhitzt und die Andere kühlt sich ab (Meschede, 2006).

#### 3.2. Signalübertragung durch Vibrationsmotoren

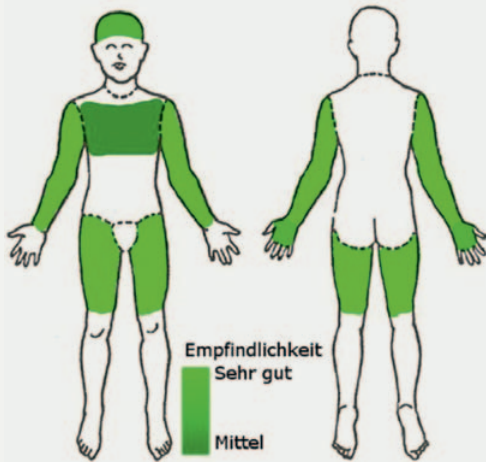
Die Rezeptoren zur Wahrnehmung mechanischer Schwingungen (Vibrationen) befinden sich in der menschlichen Haut (Klinke et al., 2010). Für die Wahrnehmung von

Vibrationen sind insbesondere die Pacini-Körperchen zuständig, deren Wirkbereich zwischen 100 Hz und 300 liegt (Silbernagl und Despopoulos, 2007). Die Anregung der Rezeptoren ist von vier Parametern abhängig: Frequenz, Amplitude, zeitlichen Dauer der Anregung und Ort der Anregung (Van Erp, o.J.).

Die optimale Frequenz liegt dabei bei ca. 250 Hz für unbehaarte Haut (220 Hz für behaarte Haut) (Van Erp und Self, 2008). Nicht alle Körperteile sind gleich empfindlich gegenüber vibrotaktilem Feedback. Handflächen und Fußsohlen können sehr gut angeregt werden, der Kopfbereich hingegen ist weniger sensibel gegenüber mechanischen Schwingungen. Allgemein gilt, dass die Empfindlichkeit von äußeren zu den inneren Extremitäten abnimmt und je größer die Amplitude, desto besser die Wahrnehmung des Signals (Van Erp und Self, 2008). Die Empfindlichkeit unterschiedlicher Körperregionen gegenüber mechanischen Schwingungen ist in Abb. 3 nochmals grafisch dargestellt.

Ein begrenzender Faktor ist die zeitliche Einwirkung, da es zu einer Adaption der Rezeptoren kommen kann. Dies führt zu einer Abnahme der Sensibilität gegenüber vibrotaktilem Reizen. Dieser Effekt tritt erst nach längerer Einwirkzeit auf (Van Erp, o.J.). Er kann deshalb für ein kurzweiliges Warnsignal vernachlässigt werden.

Für die Anbringung der Vibrationsprototypen wurden ein Vibrationsgürtel, der oberhalb von Hüfte getragen wird und ein verstellbares Band (Arm- und Beinumfang



**Abb. 2.** Temperaturempfindlichkeit (Kalt) des Menschen nach Körperregion (in Anlehnung an Campenhausen, 1981b)



**Abb. 3.** Empfindlichkeit auf mechanische Schwingungen des Menschen nach Körperregion (in Anlehnung an Van Erp und Self, 2008)

anpassbar) für Arme und Beine umgesetzt. Zur Erzeugung der Vibrationen wurden flache Vibrationsmotoren (Unwuchtmotoren) gewählt. Die Vibrationen wurden so erzeugt, dass sich die Schwingungen parallel zur Hautoberfläche ausbreiteten. [Abb. 2], [Abb. 3]

### 3.3. Signalübertragung durch Earbone Conduction

Earbone Conduction ist ein Prozess, bei welchem akustische Signale durch Knochenschwingungen bzw. Knochenvibrationen des Schädels direkt in das Innenohr übertragen werden. Dadurch werden die herkömmlichen Außen- und Mittelohrmechanismen umgangen. Im Innenohr benutzen Luftleitung und Knochenleitung den gleichen Umsetzungs-Mechanismus, um die akustischen Signale in Nervenimpulse umzuwandeln (Békésy & Wever, 1989, c1960).

Die vibrotaktile Anregung erfolgt bei der Übertragung durch Earbone Conduction anhand eines kleinen Vibrationsgebers. Der Schall wird punktuell auf den Kopf übertragen und dann weitergeleitet. Daher ist es wichtig auf die richtige Platzierung Vibrationsgebers zu achten, damit das übertragene Signal dauerhaft wahrgenommen werden kann. Laut McBride (2005) ist der effektivste Standort für eine Platzierung

der Vibrationskörper am Kondylus (B), gefolgt von dem Mastoid (G) und der Vertex (K) (siehe Abbildung 4). Hier ist bereits ein leichter Druck ausreichend für die Weitergabe der Signale. Daher wäre für die Zukunft eine Integration in die Schutzbrille oder den Helm des Gleisbauarbeiters möglich. [Abb. 4]

### 4. Erkenntnisse aus eigenen Studien

Zur Untersuchung der Eignung der unterschiedlichen Technologien für die Übermittlung von Warnungen an Gleisbauarbeitern, wurden zwei Pilotstudien durchgeführt. Die erste Studie untersucht die Eignung von Vibrationsmotoren und Peltier-Elementen, die zweite Studie die Verwendung von Earbone Conduction für den gegebenen Nutzungskontext. Die beiden Studien werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

#### 4.1. Pilotstudie zur Warnung durch Vibrationsmotoren und Peltier-Elemente

##### 4.1.1. Design der Studie

Die erste Pilotstudie war eine Probandenstudie im kontrollierten Feld, um den Einsatz von Vibrationsmotoren und Peltier-Elementen für den gegebenen

Anwendungsfall zu untersuchen. Hierbei wurden für beide Prototypen die folgenden Parameter variiert:

- Anbringungsort: Oberarm, Unterschenkel, Bauch
- Arbeitshaltung: stehend, gehend (mit Rüttelmaschine arbeitend)
- Anzahl der Aktoren (Vibrationsmotoren, Peltier-Elemente)

Das Peltier-Element wurde unter der Kleidung direkt auf der Haut fixiert. Die Vibrationsprototypen wurden über der Kleidung angebracht, um eine spätere Integration in der Arbeitskleidung zu simulieren. [Abb. 5]

Abbildung 5 zeigt die gewählte Versuchsumgebung. Aufgabe der Probanden war es, Warnsignale während den verschiedenen Arbeitshaltungen zu erkennen und zu bewerten. Zur Rückmeldung wurde ein Taster eingesetzt den die Probanden drückten, sobald sie ein Warnsignal wahrnahmen. Der Taster wurde dabei am linken oder rechten Unterarm festgeschnallt. Während des Feldversuchs herrschte eine Umgebungstemperatur von 12 °C.

Zur Bewertung der beiden Technologien wurde eine Pilotstudie in einem simulierten Nutzungskontext durchgeführt. Hierbei testeten alle Probanden die Technologien in allen Arbeitshaltungen an allen Anbringungsorten. Die Probanden wurden gebeten jeweils ihren subjektiven Eindruck

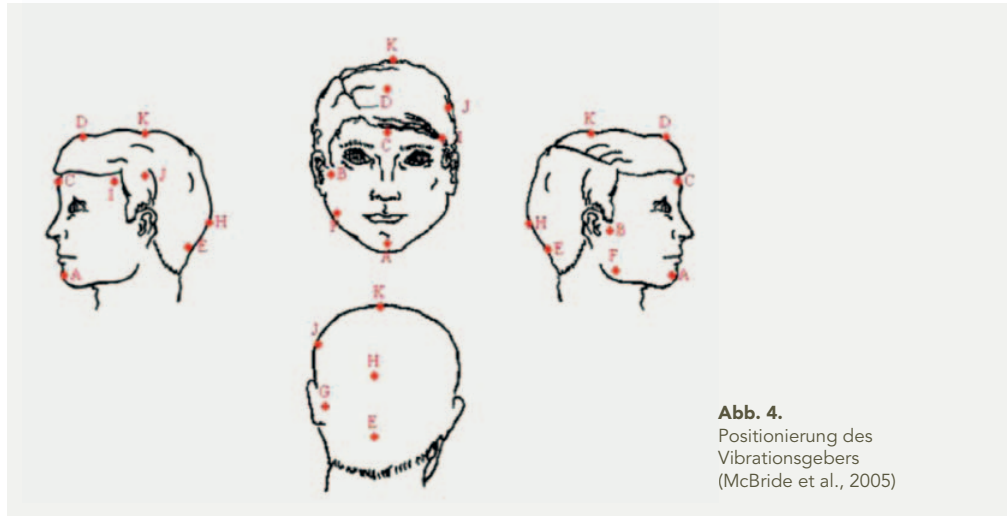
zu äußern. So sollten sie beispielsweise angeben, ob das Warnsignal überhaupt spürbar war oder ggf. sogar als störend oder schmerzhaft empfunden wurde. Zusätzlich sollte der Proband noch Auskunft über den Tragekomfort der einzelnen Prototypen geben.

#### 4.1.2. Ergebnisse der Studie

Das Peltier-Element schnitt in der Bewertung gut ab. Der Kältereiz wurde schnell wahrgenommen. Wie anhand der Literatur bereits vermutet, wurde der Wärmereiz viel schlechter bzw. gar nicht wahrgenommen. Die besten, deutlich spürbaren Ergebnisse konnten an der Arminnenseite erreicht werden.

Eine Schwierigkeit für zukünftige Prototypen stellt der notwendige direkte Kontakt mit der Haut dar. Nur so können die für das Gewebe harmlosen Temperaturdifferenzen übertragen werden. Allerdings erschwert dieser Sachverhalt eine mögliche Integration eines Prototypen in die Arbeitskleidung der Gleisarbeiter, da der Aktor in der untersten Kleidungsschicht sitzen müsste und so der Hautkontakt bzw. eine sichere Verkabelung an warmen und kalten Tagen sicher funktionieren müssten.

Bei den Vibrationsprototypen wurden wechselnde Signale (An- Ausschalten mit ca. 2 Hz) sehr schnell wahrgenommen. Die besten Ergebnisse wurden im Bauch- und Hüftbereich erzielt. Hier wurden die Warnsignale als am deutlichsten spürbar empfunden. Auch die Akzeptanz war in dieser Position am besten und wurde als nicht störend empfunden.



**Abb. 4.**  
Positionierung des  
Vibrationsgebers  
(McBride et al., 2005)

#### 4.2. Pilotstudie zur Warnung durch Earbone Conduction 4.2.1. Design der Studie

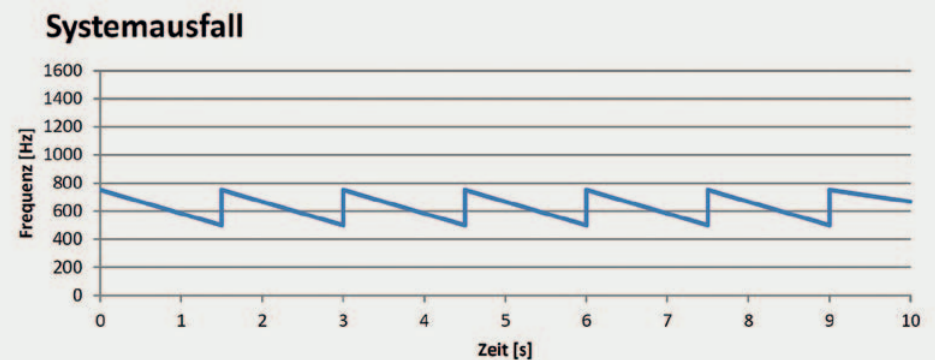
Um zu überprüfen, ob Earbone Conduction für den Einsatz in lauten Umgebungen geeignet ist, wurde eine Pilotstudie durchgeführt. Die Probanden sollten hierbei auf Warnsignale reagieren, die über das Earbone Conduction Interface übermittelt wurden. Währenddessen waren sie einem Störschallpegel von bis zu 111 dB(A) ausgesetzt. Bis zu einer Lautstärke von 80 dB (A) konnten die Probanden wählen, ob sie einen Schallschutz tragen, bei höheren Lautstärken (größer 80 dB (A)) musste das Gehör geschützt werden. Laut Lärm- und Vibrationsschutz-Arbeitsschutzverordnung muss das Gehör ab einer Lautstärke von 85 dB (A) geschützt werden.

Innerhalb der Studie wurden drei verschiedene akustische Signale getestet:

- Der Einsatz des Alarmsignals ist für Situationen, in denen eine direkte Gefährdung besteht (z. B. ein Zug nähert sich auf dem Arbeitsgleis, die Arbeiter müssen sich in Sicherheit bringen).
- Das Warnsignal soll auf eine Gefahrensituation hinweisen, von der der Gewarnte im Moment nicht selber betroffen ist (z. B. ein Zug fährt auf einem Nachbargleis an der Baustelle vorbei, es besteht kein direkter Handlungsbedarf und die Arbeiter müssen nur darauf achten, das betroffene Gleis nicht zu betreten).
- Eine Fehlermeldung, welche auf einen Systemausfall hinweist.
- Alle akustischen Signale liegen im Frequenzspektrum von 500 Hz bis 1500 Hz. Diese Frequenzen liegen im



**Abb. 5.**  
Versuchsdurchführung  
(Borger et al., 2011)



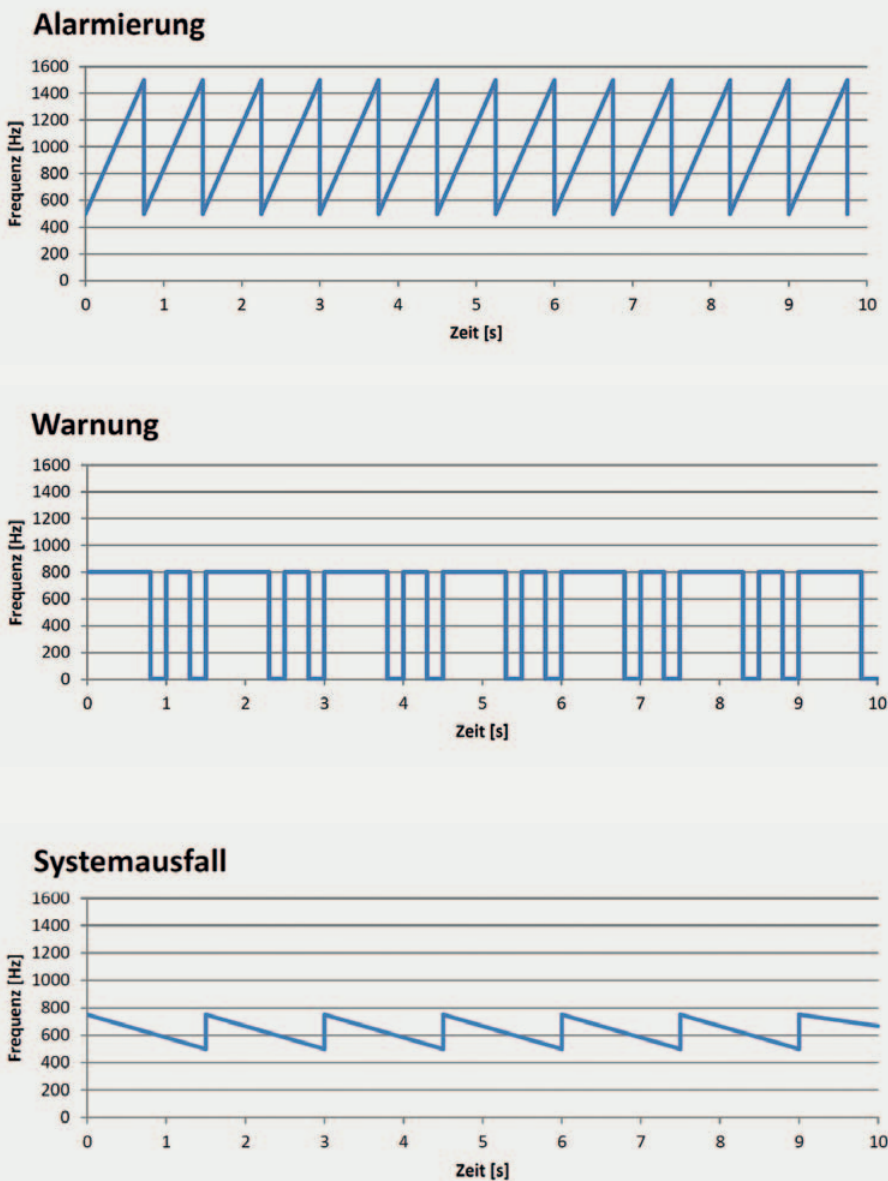


Abb. 6.  
Signalverläufe  
(Ringwald, et al., 2011)

Frequenzbereich der menschlichen Sprache und werden besonders gut wahrgenommen (Zenner, 2006). In den folgenden Abbildungen werden die Signalverläufe dargestellt. [Abb. 6]

#### 4.2.2. Ergebnisse der Studie

Alle Signale über das Earbone Conduction Interface wurden in dieser Pilotstudie jederzeit gut wahrgenommen. Mit Gehörschutz war die Wahrnehmung der Signale noch besser, da die Störgeräusche

abgedämpft wurden und die Signaltöne noch deutlicher in den Vordergrund traten.

Eine Aussage darüber, welcher der Signaltöne an besten wahrgenommen wurde, kann auf Basis der durchgeführten Versuche nicht getroffen werden. Trotzdem konnten die Probanden die drei Testsignale (Alarm, Warnung und Systemfehler) gut unterscheiden. Es traten während des Versuchs keine Verwechslungen auf.

Das Gewicht des Earbone Conduction Prototyps von 52g (inkl. Kopfbügel) wurde nicht als störend wahrgenommen.

#### 5. Diskussion und Ausblick

Bei den durchgeführten Studien handelt es sich bislang nur um Pilotstudien mit einer geringen Anzahl an Probanden. Um detailliertere Aussagen über die Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen der Technologien machen zu können, sind umfassendere Studien mit einem größeren Probandenkollektiv notwendig. Darüber hinaus sollte in zukünftigen Studien ein differenzierteres Probandenkollektiv gewählt werden, so beispielsweise auch ältere Probanden.

Trotz der geringen Probandenzahl lassen sich jedoch einige Tendenzen für die untersuchten Technologien ableiten. Insgesamt haben die Studien gezeigt, dass Potential für die taktile Warnung unter den gegebenen erschwerten Umgebungsbedingungen bei Gleisarbeitern vorhanden ist. Im Bereich der menschlichen Wahrnehmung wären noch andere Übertragungsarten möglich, jedoch sind visuelle und klassische akustische (übertragen durch Schallwellen) Signale auch nicht in allen Fällen sicher wahrnehmbar. Zielführend erscheint es derzeit nicht nur ein einzelnes Signal, sondern mehrere redundante Signale zu verwenden, welche unterschiedliche Sinneskanäle nutzen. So können Menschen in sicherheitskritischen Situationen schneller und sicherer erreicht werden.

Die Übertragung von Warnsignalen über einen Kältereiz stellt eine interessante Möglichkeit dar, den Arbeiter schnell

Kurzvorträge

zu erreichen. In Zukunft muss noch ein geeigneter Ort gefunden werden, an dem der Prototyp den Arbeiter nicht behindern würde.

Die Warnung über vibrotaktile Aktoren stellt die vielseitigste Möglichkeit dar, Signale zu übertragen. In Zukunft soll besonders der Anbringungsort besser erforscht werden. So könnten unterschiedliche Warnsignale aufgrund der Orte codiert werden. Hierbei wird auch die Gestaltung des Reizes (Folgen gestaffelter Vibrationen) eine Rolle spielen.

Die Verwendung von Earbone Conduction soll in Zukunft noch genauer erforscht werden, da ihr geringer Bauraum und ihr geringes Gewicht die Integration in andere Ausrüstungsgegenstände (Helm oder Schutzbrille) ermöglicht, die vom Gleisarbeiter getragen werden müssen. Da durch den Einsatz von Earbone Conduction der Gehörgang unverschlossen bleibt, wären weiterhin andere akustische Signale und auch die Kommunikation mit Kollegen möglich. Gut sind sie geeignet für den Einsatz bei einem hohen Lärmpegel, wie auch in diese Pilotstudie gezeigt hat. Trotz verschlossener Ohren (z. B. durch Gehörschützer) kann der Nutzer hierbei weiterhin akustische Signale empfangen (Walker et al. 2005).

Für die Zukunft wäre es außerdem denkbar, Warnungen in der hier untersuchten Form auch in anderen Bereichen einzusetzen. Beispielsweise könnte in ruhigen Arbeitsumgebungen, in denen der Mensch Kontrollaufgaben durchzuführen hat, Warnungen über den taktilen Kanal eingesetzt werden, um den visuellen Kanal der Wahrnehmung zu entlasten.

**Literatur**

1. Békésy, G. V. (1932). Zur Theorie des Hörens bei der Schallaufnahme durch Knochenleitung. *Ann. Physik* 1932, 8, 111-136.
2. Békésy, G. von, & Wever, E. G. (1989, c1960). *Experiments in Hearing*. New York: Acoustical Society of America through the American Institute of Physics by arrangement with McGraw-Hill Book Co.
3. Borger, A., Plaza, G., Preusche, C., Werner, S. (2011). Entwicklung und Erprobung von Prototypen zur taktilen Warnung von Personen Darmstadt: ADP Arbeit TU-Darmstadt nicht veröffentlicht
4. Campenhausen, C. von. (1981b). Die Sinne des Menschen; 1. Einführung in die Psychophysik der Wahrnehmung. Stuttgart: Thieme.
5. GUV-V D 33 (8/1999). „Arbeiten im Bereich von Gleisen“ UVV
6. Klinke, R., Pape, H.-C., Kurtz, A., & Silbernagl, S. (Hrsg.). (2010). *Physiologie* (6. Aufl.). Stuttgart [u. a.]: Thieme.
7. Luczak, H., (1975). Untersuchungen informatorischer Belastung und Beanspruchung des Menschen. Fortschrittsberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 10, Nr 2. VDI-Verlag, Düsseldorf
8. McBride, M.; Letowski, T.; Tran, P. (2005). Bone Conduction Head Sensitivity Mapping: Bone Vibrator; ARL-TR-3556; Army Research Laboratory: Aberdeen Proving Ground, MD, July 2005.
9. Meschede, D., (2006). Gerthsen Physik 23., überarb. Aufl., Springer-Verlag Kap. 6.6
10. Ringwald, J., Saul, S., Wagner, P., Wedel, M., Wurst, B. (2011). Weiterentwicklung und Erprobung von Prototypen zur visuellen und akustischen Warnung von Personen Darmstadt: ADP Arbeit TU-Darmstadt nicht veröffentlicht
11. Sauer, U. (2003). Akustische Hintergründe der AWS-Richtlinie der DB Netz AG. TIEFBAU, (7/2003), 413-416.
12. Sauer, U. (2006a). Akustische Grundlagen für die Anordnung automatischer Warnsysteme (AWS). TIEFBAU, (7/2006), 380-384.
13. Schlick, C., Bruder, R. & Luczak, H. (2009). *Arbeitswissenschaft*. (3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage). Heidelberg: Springer.
14. Schultheis, M., Wakula, J., Theuerling, H., Bruder, R., (2011). Entwicklung eines Versuchskonzeptes zur visuellen, akustischen und taktilen Warnung im Bereich des Gleisbaus. Konferenz 9. BWMMS, Berlin
15. Silbernagl S.; Despopoulos A. (2007). *Taschenatlas Physiologie*. (7. Auflage). Stuttgart; New York: Thieme Verlag
16. Stanley, R.M., Walker, B.N., (2009). Intelligibility of bone-conducted speech at different locations compared to air-conducted speech. In: *Proceedings of the 2009 Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*. San Antonio, TX.
17. Van Erp, Jan E.P. (o.J.). *Guidelines for the Use of Vibro-Tactile Displays in Human Computer Interaction*. TNO Human Factors. Soesterberg, Netherlands.
18. Van Erp, Jan E.P., Self, B.P. (2008). *Tactile Displays for orientation, navigation, and communication in air, sea and land environments*. Final Report of Task Group RTO-TR-HFM-122. NATO.
19. Vinerbi, L., Falai, L., Bondavalli, A., Siciliano, V., Dambra, C., Wakula, J., Grauer, Y., Tomic, S., (2011). ALARP – Un Innovativo Sistema Automatico per la Protezione Cantiere. Conference SEF2011, Rome, Italy
20. Walker, B. N., & Stanley, R., Iyer, N., Simpson, B. D., & Brungart, D. S. (2005). Evaluation of bone-conduction headsets for use in multitalker communication environments. *Proceedings of the Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society (HFES2005)*, Orlando, FL (26-30 September). pp. 1615-1619.
21. Zenner, H. P. (2006). Hören. In F. Schmidt & H.-G. Schaible (Hrsg.), *Neuro- und Sinnesphysiologie* (S. 287-311). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.