

Verbesserung eines omnidirektionalen Laufeingabegerätes für die virtuelle Realität

Jens HEGENBERG, Philipp KRAUSE, Ludger SCHMIDT

*Fachgebiet Mensch-Maschine-Systemtechnik
Universität Kassel, Mönchebergstraße 7, D-34125 Kassel*

Kurzfassung: Ein Prototyp eines omnidirektionalen Laufeingabegerätes wurde insbesondere hinsichtlich des Regelungskonzeptes auf Basis von Empfehlungen aus der Literatur optimiert. Der Beitrag stellt die relevanten Rahmenbedingungen des Einsatzes solcher Systeme vor und berichtet über die Ergebnisse einer vergleichenden Studie, die auf die Verbesserung der Nutzung, insbesondere bzgl. der Regelung der translatorischen und der rotatorischen Bewegungsrichtung, abzielt. Dabei wurden zwei neuentwickelte Regelungsvarianten der bestehenden Lösung des Herstellers gegenübergestellt. Die Effekte wurden mit gängigen Standardfragebögen sowie Befragungsinstrumenten zu anderen Laufeingabegeräten untersucht. Es konnte ein signifikanter Vorteil des neuen Regelungskonzeptes belegt werden.

Schlüsselwörter: Virtuelle Realität, CAVE, omnidirektionale Laufeingabe

1. Einleitung und Stand der Forschung

Virtual-Reality-(VR-)Anwendungen sind durch günstigere Head-Mounted-Displays und Tracking-Lösungen für Kopf- und Handbewegungen heute attraktiver denn je. Streifzüge mit realen Bewegungen durch virtuelle Welten finden jedoch schnell ihre Grenzen in den Ausmaßen der realen Welt. Technische Lösungen, die ein unbegrenztes, omnidirektionales Laufen durch VR-Umgebungen erlauben, konnten sich bislang weder im privaten noch im professionellen Umfeld durchsetzen.

Auf Laufbändern basierende Systeme haben häufig derart große Ausmaße, dass sie ganze Hallen füllen z. B. der CyberWalk (Souman et al. 2011). Kompaktere Systeme nutzen häufig wenig natürliche Lauftechniken, wie das Vor- und Zurückrutschen der Füße auf einer glatten Oberfläche z.B. der Cyberith Virtualizer, die die Immersion der VR-Umgebung beeinträchtigen. Omnidirektionales natürliches Laufen auf begrenztem Platz versprechen hingegen Systeme, die die Bewegungsrichtung der Laufbänder mit Kugelteppichen von der Laufrichtung des Nutzers entkoppeln z.B. der CyberCarpet (Schwaiger et al. 2007). Diese Systeme sind allerdings bislang nicht über den Laboreinsatz hinausgekommen.

Das hier betrachtete System ähnelt dem CyberCarpet und wurde in einer 3-Seiten-CAVE installiert (Abbildung 1). Auf einem bidirektionalen Laufband in Richtung der Frontprojektion liegt eine rotierbare Scheibe, deren Lauffläche mittels eingelassener Kugeln die Bewegung des Laufbandes an den Nutzer überträgt. Bei der Nutzung muss gewährleistet werden, dass der Mensch zu jeder Zeit auf der Lauffläche mit einem Durchmesser von ca. einem Meter bleibt und dass er möglichst auf die Frontprojektion zuläuft, um die VR-Darstellung optimal wahrnehmen zu können.

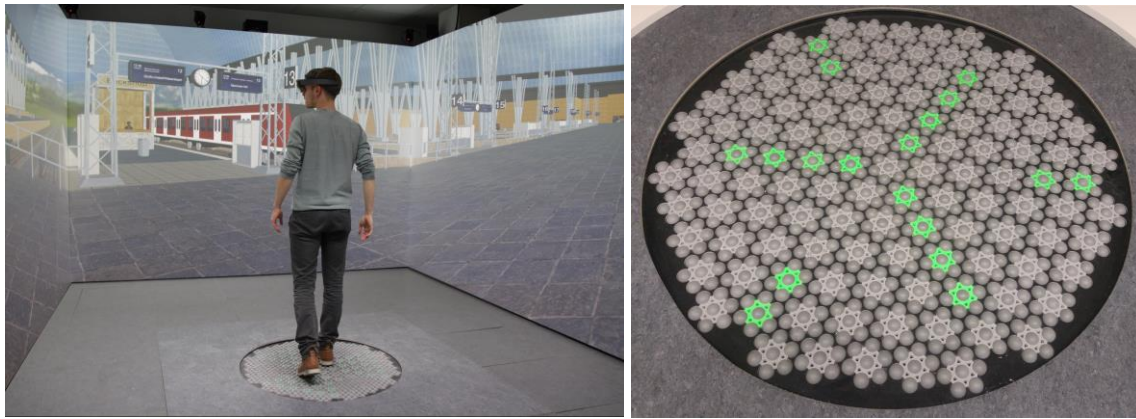


Abbildung 1: Proband auf omnidirektionalem Laufingabegerät in einer 3-Seiten-CAVE (links),
Detailansicht der Lauffläche (rechts)

Um natürliches Laufen auf solchen Geräten zu realisieren, ist es wichtig, das Laufverhalten des Menschen zu betrachten. Nach Lulic & Muftic (2002, S. 798) liegt die normale Laufgeschwindigkeit zwischen 0,95 und 1,7 m/s ($M = 1,27$ m/s) und die schnelle Laufgeschwindigkeit zwischen 1,7 und 2,4 m/s ($M = 1,96$ m/s). Für die natürliche Eigenwahrnehmung des Laufens ist die vestibuläre Wahrnehmung der linearen und rotatorischen Beschleunigungen des Kopfes relevant (Waller & Hodgson 2013, S. 7), insbesondere die Wahrnehmung der Trägheitskräfte beim Loslaufen oder Stehenbleiben (Souman et al. 2011, S. 3). Kinästhetisch kann zudem wahrgenommen werden, ob Bewegungen selbst- oder fremderzeugt sind (Waller & Hodgson 2013, S. 9) und somit abgeglichen werden, ob die tatsächliche Bewegung der erwarteten entspricht.

Neben diesen Randbedingungen finden sich in der Literatur bereits Gestaltungsempfehlungen für Laufingabegeräte. Bspw. sollte laut Whitton & Peck (2013, S. 243) die Geschwindigkeitsregelung beim Loslaufen und Stehenbleiben eine minimale Zeitverzögerung aufweisen, und die Geschwindigkeit sollte sich in möglichst kurzen Zeitabständen an die Nutzergeschwindigkeit anpassen. Souman et al. (2011, S. 8) stellen bzgl. der CyberWalk-Plattform fest, dass es einen generellen Konflikt zwischen einer notwendigerweise schnellen und einer angenehm langsamen Reaktion des Gerätes gibt. Die schnelle Reaktion des Gerätes ist notwendig, um den Benutzer innerhalb der physischen Grenzen der Lauffläche zu halten, wobei eine zu schnelle Reaktion eine Instabilität des Benutzers verursachen kann. In einer Nutzerstudie wurden die Abbremsvorgänge am besten bewertet, die die trügste Geschwindigkeitsänderung und daher die geringsten Überschwinger zeigten (Souman et al. 2010, S. 910). Darken et al. (1997, S. 218) fanden hingegen, dass eine zu langsame Reaktion ihres Gerätes, bspw. auf ein plötzliches Stehenbleiben, als unerwünscht empfunden wurden. Durch die verzögerte Reaktion des Gerätes wurde der bereits stillstehende Nutzer weiter entgegen der Laufrichtung bewegt. Bei einer zu schnellen Reaktion des Systems erwarten sie hingegen im Extremfall ein Laufgefühl, vergleichbar dem Laufen auf einer Eisfläche.

2. Problemanalyse und Lösungsansatz

Am Laufingabegerät des Fachgebiets konnten weitere Probleme der Nutzer beobachtet werden. So kann bspw. die Berührung der Kante um die Lauffläche herum ein

Stolpern verursachen. Zudem reagiert die Regelung besonders sensibel auf ruckartige Bewegungsänderungen, wodurch ein schwingendes Verhalten der Lauffläche verursacht wird, dass die Balance des Benutzers stört. Auch wenn der Mensch stillsteht, kam es zu Schwingungen der Lauffläche. Verschiedene Laufbewegungen werden von teilweise gegensätzlichen Problemen begleitet. Bspw. ist das Kurvenlaufen oder die Beschleunigung erst mit einer gewissen Verzögerung möglich. Andererseits spricht das generell ruckartige Verhalten des Geräts für eine zu schnelle Reaktion.

Die Probleme des Systems scheinen in störenden Artefakten der Regelung zu liegen. Sie beeinträchtigen stark die Vertrautheit des Benutzers mit der Laufsituation und erhöhen damit die kognitive Beanspruchung. Darken et al. (1997, S. 221) beschreiben diesen Effekt als Folge einer Störung des sensiblen Gleichgewichts des Menschen. Auch das Sicherheitsgefühl des Benutzers und damit die Nutzerzufriedenheit werden negativ beeinflusst. Da unsicheres Verhalten des Benutzers das ruckartige und schwingende Verhalten verstärkt, wird insbesondere das Erlernen des Laufens auf dem Gerät erschwert.

Um die beschriebenen Probleme zu adressieren, soll anstelle des PID-Reglers des Herstellers ein Zustandsregler eingesetzt werden. Dieser kann neben der Position des Nutzers auf der Lauffläche auch die Laufgeschwindigkeit berücksichtigen und somit schneller auf Änderungen des Laufverhaltens reagieren. Wird nur die Position des Nutzers betrachtet, lässt sich bspw. eine verringerte Laufgeschwindigkeit nur indirekt über die nach hinten rückende Position des Nutzers auf der Lauffläche detektieren. Die frühere Reaktion des Reglers soll das schwingende Verhalten reduzieren sowie kritische Situationen, die zum Berühren der Kanten führen, bspw. das Loslaufen und Stehenbleiben, entschärfen.

Weiterhin soll ein dynamischer Sollwert für die Position des Nutzers auf der Lauffläche eingesetzt werden, um den begrenzten Platz optimal zu nutzen. Die Soll-Position in Laufrichtung wird abhängig von der Laufgeschwindigkeit festgelegt. Je schneller der Nutzer läuft, desto weiter wird sie nach vorne gesetzt (De Luca et al. 2009, S. 5053), um beim Abbremsen mehr Platz nach hinten zur Verfügung zu haben und somit ein angenehmeres langsames Abbremsen zu ermöglichen (Souman et al. 2010). Um schwingende Bewegungen in Laufrichtung vollständig zu unterdrücken, wird die Rückwärtsbewegung deaktiviert. Schwingungen im Stand wird durch eine Totzone entgegengewirkt, in der Positionsänderungen des Nutzers ignoriert werden. Bereits Darken et al. (1997, S. 220) empfehlen im Stand die Verwendung eines "sweet pot". Die Totzone darf allerdings keine zu große Reaktionsverzögerung beim Loslaufen verursachen.

Die neue Regelung wird mit einer trägen und einer zügigen Dynamik realisiert, um einen guten Kompromiss zwischen dem notwendigen schnellen und dem vorhersehbar trägen Verhalten des Gerätes auszuloten. Diese beiden Varianten wurden mit der Lösung des Herstellers in einer Nutzerstudie verglichen.

3. Evaluation

Für die Evaluation wurden zwei VR-Parcours erstellt. Der Erste ist eine gerade Strecke mit Haltelinien nach je 50 m, der die Laufszenarien Loslaufen, gleichmäßiges Laufen und Stehenbleiben ermöglicht. Der zweite Parcours ist ein kreisförmiger Rundkurs mit einem mittleren Radius von 4 m für das Kurvenlaufen, der sich an der Evaluation von Souman et al. (2011, S. 10) orientiert. Die Längen beider Parcours sind identisch.

Für die Evaluation wurde ein Within-Subject-Design verwendet. Jeder Proband

nutzte nacheinander jede der drei Reglervarianten und durchlief damit beide Parcours. Die Reihenfolge der Reglervarianten wurde permutiert. Auf jedem Parcours liefen die Probanden mindestens 5 Minuten lang, danach wurde der Durchlauf beendet, sobald die nächste blaue Linie erreicht wurde.

Nach Absolvierung beider Parcours für eine Reglervariante wurden verschiedene Fragebögen ausgefüllt. Nach den Metriken von Bowman et al. (1998, S. 123) kann der Benutzerkomfort anhand des Ausmaßes des Auftretens der Simulatorkrankheit bewertet werden, welches mittels des Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) erfasst wurde. Für die Vergleichbarkeit mit anderen Systemen wurden die Fragebögen von Usoh et al. (1999) und Kruijff et al. (2016) bzgl. Erlernbarkeit, Nutzbarkeit und Präsenz identisch durchgeführt. Eigene Fragen, der System Usability Scale (SUS) und der NASA Raw-Task-Load-Index (NASA RTLX) kamen ergänzend zum Einsatz.

4. Ergebnisse

An den Versuchen nahmen insgesamt 12 Probanden (5 weiblich) im Alter von 17 bis 56 Jahren teil ($M = 25,7$ Jahre, $SD = 9,7$ Jahre). Zwei Probanden haben den Versuch abgebrochen und wurden daher aus der Auswertung ausgeschlossen. Der Test auf statistische Signifikanz erfolgt mittels Varianzanalyse für wiederholte Messungen. Bei signifikanten Effekten wurden Post-Hoc-Tests ohne Berücksichtigung der Alphafehler-Kumulierung verwendet.

Bzgl. des SUS zeigt eine signifikant bessere Bewertung für das träge Regelungskonzept gegenüber dem zügigen ($t = 2,475$; $p = 0,0176$). Beim NASA RTLX zeigen sich signifikante positive Effekte bzgl. der Beanspruchung bei der trägen Variante gegenüber der zügigen Variante in den Kategorien „Körperliche Anforderung“ ($t = 3,222$; $p = 0,00523$), Leistung ($t = -4$; $p = 0,00156$) und „Frustration“ ($t = 3,592$; $p = 0,00353$) sowie gegenüber der Herstellerlösung bzgl. „Körperliche Anforderung“ ($t = 1,848$; $p = 0,0489$) und „Frustration“ ($t = 1,994$; $p = 0,0406$). Ein träges Verhalten scheint die Beanspruchung zu reduzieren und damit auch die Benutzbarkeit zu steigern. Hier stellt sich die träge Regelung als die vorteilhafteste der drei Varianten heraus.

Bestätigungen dieser Erkenntnisse finden sich in den Ergebnissen des Fragebogens. So wurde das Item „Die Benutzung des Laufeingabegeräts hat mir Freude bereitet“ für das träge Regelungskonzept sowohl gegenüber der Herstellerlösung ($V = 0$; $p = 0,0175$) als auch gegenüber dem zügigen Regler ($V = 28$; $p = 0,0107$) signifikant besser bewertet. Inwieweit die Interaktion mit dem Laufeingabegerät „Einfach zu erlernen“ sei, wurde ebenso zugunsten der trägen gegenüber der zügigen Variante ($t = 2,345$; $p = 0,0235$) und überraschenderweise auch zugunsten der Herstellerlösung ($t = 2,101$; $p = 0,0344$) bewertet. Damit zeigt sich, dass das zügige Verhalten einen starken Einfluss auf die Benutzungsfreundlichkeit des Systems hat und offenbar die Beanspruchung des Nutzers erhöht.

Das Item „Wie angenehm war für Sie das Abbremsen an den Haltelinien?“ wurde statistisch signifikant zugunsten der trägen Variante gegenüber der Herstellerlösung ($t = 3,207$; $p = 0,00535$) bewertet. Ebenso sind beim Item „Wie sicher haben Sie sich während des Stillstehens gefühlt?“ die Vorteile des trägen ($V = 0$; $p = 0,00439$) als auch des zügigen ($t = -5,839$, $p = 0,000124$) Regelungskonzeptes gegenüber der Herstellerlösung zu erkennen. Das spricht für die positiven Auswirkungen der neu implementierten Funktionen wie der Totzone und dem dynamischen Sollwert.

Beim SSQ-Fragebogen zeigen sich keine signifikanten Effekte zwischen den Varianten, wohl aber zwischen dem Zustand vor und nach den einzelnen Durchgängen.

Nach den einzelnen Durchgängen bewerten die Probanden ihr Wohlbefinden signifikant schlechter als zu Beginn des Versuches. Demnach können auch die neuen Regelungskonzepte das Auftreten der Simulatorkrankheit nicht einschränken.

In der Literatur lässt sich in den Bewertungen unterschiedlicher Fortbewegungstechniken folgender Zusammenhang finden: „Je komplexer desto schwieriger“. So lassen sich bei Kruijff et al. (2016) die „Walking-In-Place“-Technik (WIP), die „Lehnenbasierte“ Navigation (LB) und die Steuerung mittels Joystick mit aufsteigenden Bewertungen einordnen. Das hier betrachtete Gerät ordnet sich im Vergleich im Mittelfeld auf ähnlichem Niveau wie die LB ein. Daraus lässt sich ableiten, dass es zwar ein natürlicheres Laufgefühl als WIP bietet, aber dennoch zu komplex in der Benutzung ist, um der einfachen Benutzbarkeit des Joysticks nahe zu kommen. Natürliches Laufen ist zwar möglich, die Benutzung ist aber noch zu komplex, um als vollkommen natürlich wahrgenommen zu werden.

5. Diskussion und Fazit

Zur Verbesserung des omnidirektionalen Laufeingabegerätes wurde ein neues Regelungskonzept konzipiert und implementiert, um die Gebrauchstauglichkeit des Systems zu verbessern. Dieses wurde in zwei Varianten parametrisiert. Dabei wurden die neu erstellten Varianten mit der Regelung des Herstellers verglichen.

Es konnte gezeigt werden, dass das neue Regelungskonzept die körperliche Beanspruchung sowie die Frustration signifikant reduzieren konnte. Die träge Regelung zeigte gegenüber der zügigen diese Effekte ebenfalls und außerdem eine statistisch signifikant bessere Gebrauchstauglichkeit und Zufriedenheit mit der Leistung. Gegenüber beiden Alternativen schnitt die träge Regelung bei der subjektiven Einschätzung der Freude bei der Benutzung und der einfachen Erlernbarkeit signifikant am besten ab. In Übereinstimmung mit der Literatur sind träge Regelungen demnach eindeutig zu bevorzugen. Neben einer trägen Regelung wird auch das Entfernen störender Artefakte, bspw. Überschwinger oder Ruckeln im Stillstand, zu den Verbesserungen beigetragen haben. Dies bestätigen die gegenüber der Herstellerlösung signifikant besseren Beurteilungen zur positiven Empfindung des Abbremsens und der Sicherheit im Stillstand.

Trotz aller Verbesserungen wird mit dem Laufeingabegerät keine vollständig intuitive Fortbewegung gleichwertig dem natürlichen Laufen erreicht. Dies ist konform mit den Erkenntnissen der Literatur, nach denen sich das Gerät bzgl. der Nutzungskomplexität im Mittelfeld einordnet. Bestätigt wird dies dadurch, dass bspw. die kognitive Beanspruchung und die SSQ-Bewertung nicht signifikant gesenkt werden konnten. Auch die beiden Abbrüche zeigen, dass für die Nutzung des Systems ein ähnlich hohes Maß an Training wie bspw. beim CyberWalk (Souman et al. 2011, S. 18) notwendig ist. Dieser Tatsache wird mit zweierlei Ansätzen begegnet:

Erstens wurde eine VR-Trainingseinheit erstellt, mit der die Nutzung des Geräts vor der Studiendurchführung erlernt werden kann. Nach Darken et al. (1997, S. 219) ist insbesondere die Vermeidung unkontrollierter Körperbewegungen wichtig. Daher wird während der Trainingsphase auf die Einschränkungen und Probleme der Nutzung hingewiesen. Zweitens wurde ein Haltegeschirr über dem Gerät montiert, in das Probanden eingehängt werden können und das die Sturzgefahr deutlich verringert. Dies führt auch zu einem verbesserten subjektiven Sicherheitsgefühl.

Zusätzlich könnte die Trägheit des Systems für besonders ängstliche Novizen anfangs weiter erhöht und über die Trainingsphase hinweg langsam dem Standardwert

angenhärt werden. Bei diesem Vorgehen sollten die Benutzer langsam loslaufen und abbremsen, um bei dem trägen Verhalten die Grenzen der Lauffläche nicht zu verlassen. Durch eine erhöhte Fehlertoleranz zu Beginn wird das Erlernen der Nutzung erleichtert. Das Gerät könnte derart an die Fähigkeiten des Benutzers adaptiert werden.

Durch die Verwendung standardisierter Fragebögen wie SUS, RTLX und SSQ liegen nun Daten zu diesem Laufeingabegerät vor, die bei Vergleichen mit anderen Fortbewegungstechniken verwendet werden können. Zudem liegen als weitere Daten Laufparameter wie Schrittlänge und Schrittfrequenz, Videoaufzeichnungen der Laufaufgaben und Tonaufnahmen der mündlichen Befragungen vor, die noch nicht ausgewertet wurden.

6. Literatur

- Bowman, D. A. ; Koller, D. ; Hodges, L. F.: A methodology for the evaluation of travel techniques for immersive virtual environments. In: *Virtual Reality* 3 (1998), Nr. 2, S. 120-131
- Darken, R. P. ; Cockayne, W. R. ; Carmein, D.: The omni-directional treadmill. In: Robertson, G. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology (Banff 1997)*. New York: ACM, 1997, S. 213-221
- De Luca, A. ; Mattone, R. ; Robuffo Giordano, P. ; Bulthoff, H. H.: Control design and experimental evaluation of the 2D CyberWalk platform. In: *International Conference on Intelligent Robots and Systems : IROS 2009 (St. Louis 2009)*. Piscataway: IEEE, 2009, S. 5051-5058
- Kruijff, E. ; Marquardt, A. ; Trepkowski, C. ; Lindeman, R. W. ; Hinkenjann, A. ; Maiero, J. ; Riecke, B. E.: On Your Feet! In: Sandor, C. ; Teather, R. ; Suma, E. ; Johnsen, K. (Hrsg.): *Proceedings of the 2016 Symposium on Spatial User Interaction (Tokyo 2016)*. New York: ACM, 2016, S. 149-158
- Lulic, T. J. ; Muftic, O.: Trajectory of the human body mass centre during walking at different speed (2002), S. 797-802
- Schwaiger, M. C. ; Thummel, T. ; Ulbrich, H.: A 2D-Motion Platform: The Cybercarpet. In: *World haptics Conference (Tsukuba 2007)*. Los Alamitos: IEEE, 2007, S. 415-420
- Souman, J. L. ; Giordano, P. R. ; Frissen, I. ; De Luca, A. ; Ernst, M. O.: Making virtual walking real. In: *ACM Transactions on Applied Perception* 7 (2010), Nr. 2, S. 1-14
- Souman, J. L. ; Giordano, P. R. ; Schwaiger, M. ; Frissen, I. ; Thümmel, T. ; Ulbrich, H. ; De Luca, A. ; Bühlhoff, H. H. ; Ernst, M. O.: CyberWalk. In: *ACM Transactions on Applied Perception* 8 (2011), Nr. 4, S. 1-22
- Usoh, M. ; Arthur, K. ; Whitton, M. C. ; Bastos, R. ; Steed, A. ; Slater, M. ; Brooks, F. P.: Walking > walking-in-place > flying, in virtual environments. In: Waggenspack, W. (Hrsg.): *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York: ACM, 1999, S. 359-364
- Waller, D. ; Hodgson, E.: Sensory Contribution to Spatial Knowledge of Real and Virtual Environments. In: Steinicke, F. ; Visell, Y. ; Campos, J. ; Lécuyer, A. (Hrsg.): *Human Walking in Virtual Environments : Perception, Technology, and Applications*. New York: Springer, 2013, S. 3-26
- Whitton, M. C. ; Peck, T. C.: Stepping-Driven Locomotion Interfaces. In: Steinicke, F. ; Visell, Y. ; Campos, J. ; Lécuyer, A. (Hrsg.): *Human Walking in Virtual Environments : Perception, Technology, and Applications*. New York: Springer, 2013, S. 241-262



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch?

66. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

TU Berlin
Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme

HU Berlin
Professur Ingenieurpsychologie

16. – 18. März 2020, Berlin

GfA-Press

Bericht zum 66. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 16. – 18. März 2020

**TU Berlin, Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme
HU Berlin, Professur Ingenieurpsychologie**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2020
ISBN 978-3-936804-27-0

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.
Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**
Schriftleitung: Matthias Jäger

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Screen design und Umsetzung

© 2020 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de