

## **Experimentelle Untersuchung des menschlichen Einflusses auf die Unsicherheit in der Mensch-Technik-Interaktion**

Marius OBERLE, Marlene HELFERT, Christina KÖNIG, Ralph BRUDER

*Institut für Arbeitswissenschaft, TU Darmstadt  
Otto-Berndt-Straße 2, D-64287 Darmstadt*

**Kurzfassung:** Im Beitrag werden Untersuchungsergebnisse aus vier Laborstudien zur Quantifizierung des menschlichen Einflusses auf die Unsicherheit in der Mensch-Technik-Interaktion vorgestellt. Im Fokus steht die Untersuchung des menschlichen Einflusses auf die Belastung von technischen Systemen hinsichtlich Handlungsausführung und Handlungssequenz sowie die Untersuchung des Einflusses von digitalem Feedback auf die resultierende Belastung. Das gewonnene Wissen kann zur Anpassung des Designs sowie zur Implementierung einer geeigneten Informationsdarbietung für den Nutzer verwendet werden und trägt somit zur Reduzierung von Unsicherheit bei.

**Schlüsselwörter:** Unsicherheit, Mensch-Technik-Interaktion, Human Error, Systembelastung, Feedback

### **1. Einleitung und Motivation**

Bei lasttragenden Systemen und Strukturen, wie z. B. einem Flugzeugfahrwerk, ist die Vorhersage der Systembeanspruchung durch die Nutzungsart auf Grund der Vielzahl an involvierten Faktoren sowie deren Variabilität eine herausfordernde Aufgabe (Hanselka & Platz 2010). Neben unerwarteten Einflussfaktoren, wie z. B. die natürliche Variation von Materialeigenschaften, spielt die Interaktion zwischen Mensch und System eine entscheidende Rolle im Kontext von Unsicherheit. Der Mensch kann einerseits durch unvorhergesehene Handlungen zu einer Überbelastung eines Systems beitragen, ist andererseits aber hilfreich bei der Kompensation unerwarteter externer Einflüsse (Dekker et al. 2008; König et al. 2016). In der Arbeitswissenschaft gewinnt das Konzept der Unsicherheit zunehmend an Bedeutung (Grote 2014). Eine reine Fokussierung auf die technische Optimierung von Systemen vernachlässigt nach Badke-Schaub et al. (2008) den Faktor Mensch, weshalb eine ganzheitliche Systembetrachtung zur Beherrschung von Unsicherheit notwendig ist. Entsprechend ist das Wissen über den menschlichen Einfluss auf die Unsicherheit in der Mensch-Technik-Interaktion von Bedeutung. Bisherige Studien zur Unsicherheit menschlicher Handlungen wurden im Zusammenhang mit menschlicher Zuverlässigkeit durchgeführt (z.B. Bubb 1992) und betrachten im Wesentlichen menschliche Fehler bei der Ausführung von komplexen Handlungen (Hinckley 1994). Die Fokussierung auf Fehler und der damit verbundene Begriff der Zuverlässigkeit stößt zudem an inhaltliche Grenzen in seiner Anwendung: Bei Wahrscheinlichkeiten nahe dem Wert 0 lassen sich keine sinnvollen Vorhersagen über das Eintreten von Fehlern treffen, da die Erfassung der Wahrscheinlichkeit nur auf wenigen oder sogar nur einem Wert beruht (Sheridan 2010). Im Zusammenhang mit der Beherrschung komplexer Systeme wird nach solchen menschlichen Handlungsvariationen („performance vari-

abilities“) gesucht, die für ein Systemversagen, aber auch für die erfolgreiche Bewältigung kritischer Situationen verantwortlich sein können (vgl. Wickens et al. 2012).

Im Artikel werden vier Studien vorgestellt, in denen der menschliche Einfluss auf die Unsicherheit in der Mensch-Technik-Interaktion untersucht wurde. Im Fokus ist insbesondere der Einfluss menschlicher Einflussgrößen wie z.B. Kraftvermögen oder Erfahrung auf die direkte Handlungsausführung und die Variation der Handlungssequenz und -auswahl sowie die Verwendung von Belastungsfeedback zur Unsicherheitsreduktion. Die Erfassung des menschlichen Einflusses auf die Unsicherheit trägt letztlich zur Reduzierung von Sicherheitsbeiwerten und somit zur Ressourcenschonung bei.

## 2. Vorstudie und Projektvorbereitung

In einer Voruntersuchung an einem einfachen Dreibein wurde mit Hilfe von 32 Probanden exemplarisch der Einflussparameter Anlernverhalten untersucht: Es wurde analysiert, inwiefern sich Anweisungen und Feedback während des Ablegens einer Last auf das Dreibein auf die Unsicherheit der Systembelastung auswirken. Den Versuchspersonen wurden drei unterschiedliche Anweisungen gegeben und diese jeweils über 10 Absetzversuche beibehalten:

- Anweisung 1: Die Masse soll vorsichtig mittig abgesetzt werden!
- Anweisung 2: Achten Sie darauf, dass die Masse mittig abgesetzt wird!
- Anweisung 3: Beachten Sie das Feedback auf dem Bildschirm! Versuchen Sie, die Masse so abzusetzen, dass keine der drei angezeigten Kräfte eine auffällige Kraftspitze zeigt!

Über die in den drei Beinen gemessenen Kräfte wurden die maximalen Absetzkräfte sowie der Abstand der Masse vom Zentrum der Platte bestimmt.

Bei allen Versuchspersonen sind die gemessenen Kraftspitzen bei der ersten (vorsichtiges Aufsetzen) und der zweiten Anweisung (mittiges Aufsetzen) sehr ähnlich. Mit der dritten Anweisung, auf die Kräfte zu achten, ist nun eine deutliche Minderung der gemessenen Kräfte zu erkennen: Im Vergleich zur ersten Messung ließen sich mit der dritten Anweisung und dem Feedback der gemessenen Kräfte auf dem Bildschirm die beim Aufsetzen der Masse gemessenen Maximalkräfte um knapp 14% verringern.

Neben der Kraft beim Aufsetzen der Masse ist auch die geometrische Lage der Masse auf der Dreibein-Plattform für die Unsicherheit der lasttragenden Struktur von Bedeutung. Es zeigt sich, dass die zweite Anweisung, die explizit betont, dass die Masse mittig abzustellen sei, gegenüber der ersten Anweisung, die nur nebenbei erwähnt, dass die Masse mittig abgestellt werden solle, zu einer Verringerung der Exzentrizität des Abstellortes um 17% führt. Die Konzentration der Probanden auf einen anderen Faktor, nämlich die Minimierung der Abstellkräfte im Verlauf der dritten Anweisung, führt allerdings zu einer deutlichen Erhöhung der Exzentrizität um 21% im Vergleich zur ersten Messung.

Der und weitere Vorversuche legen die Vermutung nahe, dass eine konkretisierte Anweisung gegenüber einer nebensächlichen Erwähnung der Aufgabe zu einer merklichen Verbesserung des Ergebnisses führt. Gleichzeitig wird aufgrund dieser ersten Ergebnisse angenommen, dass die Konzentration auf einen bestimmten Aspekt der Aufgabe zu Verschlechterungen eines anderen Ergebnisaspekts führen kann.

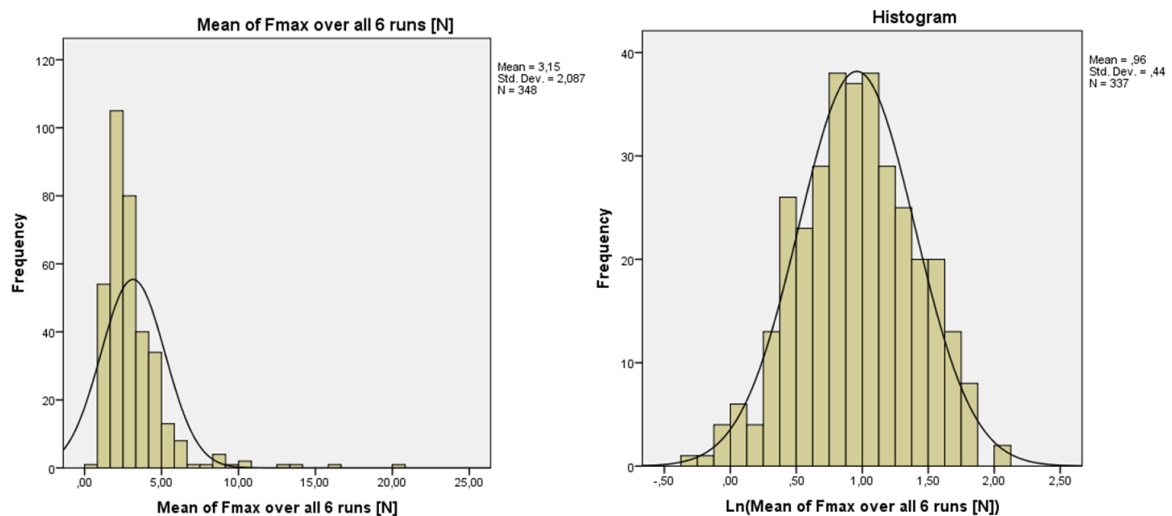
### 3. Forschungsergebnisse

Im Folgenden werden drei unabhängige Laborstudien zur Untersuchung des menschlichen Einflusses auf die Unsicherheit in der Mensch-Technik-Interaktion ausgehend von der Vorstudie vorgestellt und diskutiert.

#### 3.1 Unsicherheit der Handlungsausführung

Mit der ersten Studie wurde der menschliche Einfluss auf die Unsicherheit im Rahmen der Handlungsausführung untersucht. Konkret wurde der Einfluss von Geschicklichkeit und Kraftvermögen auf die Belastung des Dreibeins (siehe Kapitel 2), in Anlehnung an die zuvor beschriebene Vorstudie, untersucht.

Die Systembelastung wird über die maximale Kraft im Moment des Abstellens eines Gewichts (maximale Belastung) sowie über die sich anschließend einstellende statische Lastverteilung über alle drei Beine (Exzentrizität) erfasst. Die Erfassung des maximalen Kraftvermögens der Probanden erfolgt am institutseigenen Kraftmessgerät. Zur Erfassung der Geschicklichkeit wird u.a. der Box-Block Test nach Mathiowetz et al. (1985) verwendet. Weiterhin wird die Bewegungsbahn des rechten Arms der Probanden, ihre Herzfrequenz sowie die Fingerkräfte zum Halten der Gewichte mit dem Captiv-Messequipment der Firma TEA erfasst. Die Aufgabe der Probanden besteht darin, ein Gewicht von der Tischplatte aufzunehmen und auf der Oberfläche des Dreibeins abzustellen. Dabei werden zum einen die abzustellenden Gewichte (1 kg und 3 kg) und zum anderen die Anweisung für die Probanden („Mittig abstellen“, „Sanft abstellen“ und „Sanft und mittig abstellen“) variiert. Weitere demographische Daten werden über einen Fragebogen erfasst. Am Versuch nahmen 58 männliche, rechtshändige Probanden im Alter zwischen 19 bis 25 Jahren (MW: 22,3 Jahre) teil. Alle Probanden waren Studenten an der Technischen Universität Darmstadt. Für jeden Probanden wurden insgesamt 36 Abstellvorgänge gemessen (2 Gewichte \* 3 Anweisungen \* 6 Wiederholungen pro Variante). Die Versuchsteilnahme wurde mit Sachgegenständen im Wert von ca. 10 € vergütet und dauerte pro Proband etwa 50 Minuten. Für eine ausführliche Beschreibung des Studiendesigns siehe Oberle et al. (2017).



**Abbildung 1:** Histogramme für die resultierende maximale Belastung des Dreibeins im Moment des Abstellens der Gewichte für alle Probanden und Abstellvorgänge. Links: Rechtsschiefe Realverteilung der Belastung. Rechts: Logarithmierte Normalverteilung der Belastung.

Aus dem Versuch konnten folgende Erkenntnisse gezogen werden:

- Die resultierenden Belastungen folgen einer Lognormalverteilung (siehe Abbildung 1). Zur Angabe der Verteilungsfunktion der Unsicherheit empfiehlt sich daher die Verwendung des logarithmierten Mittelwerts sowie der logarithmierten Standardabweichung.
- Die Höhe des Gewichts wirkt sich signifikant verstärkend auf den Mittelwert und die Streuung der maximalen Belastung aus, hat jedoch keine Auswirkung auf die Exzentrizität.
- Die Anweisungen wirken sich nicht signifikant auf die Belastung aus.
- Mit steigender Körperkraft nimmt zum einen die Streuung der maximalen Belastung und zum anderen die Exzentrizität signifikant zu.
- Mit steigender Geschicklichkeit nimmt der Mittelwert und die Streuung der Exzentrizität signifikant ab.

### 3.2 Unsicherheit der Handlungsauswahl

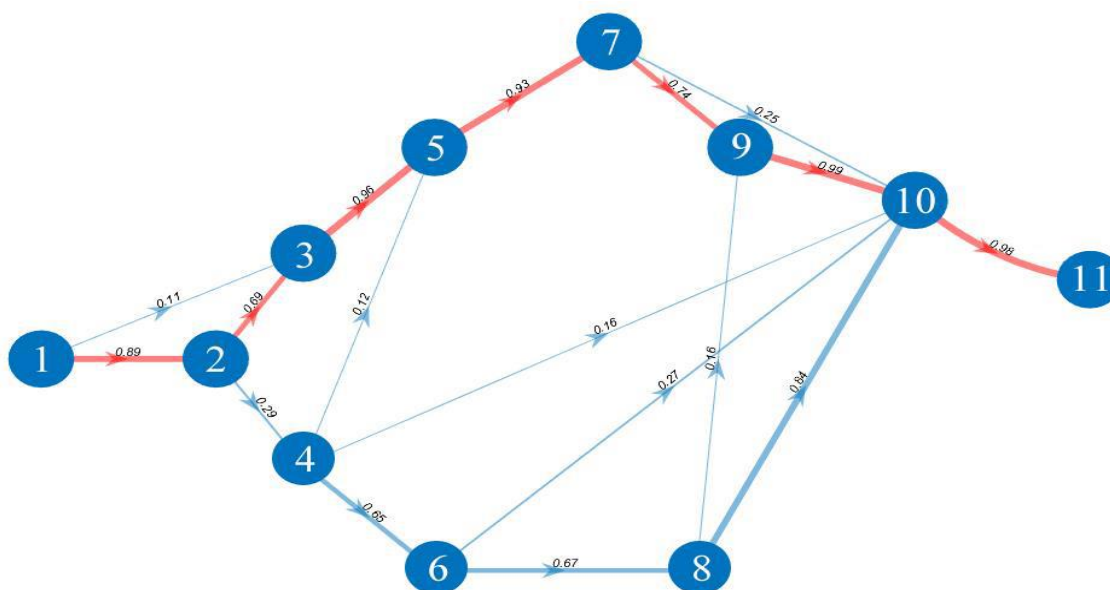
In der zweiten Studie wurde die Variation der Handlungsauswahl und deren Auswirkung auf die Systembelastung untersucht. Als Beispielprozess diente die Landung eines Flugzeuges (Typ Cessna S172) in einem eigens dafür aufgebauten Flugsimulator. Da für die resultierende Fahrwerksbelastung neben dem direkten Aufsetzen bereits die ersten Handlungen wie Durchführen des Sinkflugs oder Reduzieren der Anfluggeschwindigkeit relevant sind, wurde die vertikale Geschwindigkeit des Fahrwerks im Moment des Aufsetzens als Belastungsgröße verwendet. Die Umwelt wurde in der Laborstudie sowie der Simulation konstant gehalten. Zur genauen Untersuchung der möglichen und durchgeführten Handlungen während des Landemanövers wurde ein Prozesskettenmodell für eine Flugzeuglandung abgeleitet (Oberle & Bruder 2015) und zur Beschreibung der Handlungsausführungsvariation ein Markov-Modell entwickelt (Abbildung 2). Literaturbasiert wurden relevante menschliche Einflussgrößen identifiziert (beispielsweise Erfahrung, Qualifikation und Ermüdung) und ihr Einfluss auf die Belastung sowie die gewählte Handlungssequenz experimentell untersucht.

Am Versuch nahmen 44 männliche Piloten teil. 30 Piloten besaßen eine private Pilotenlizenz, 9 eine kommerzielle Pilotenlizenz und 5 andere Lizenztypen, z.B. für Segelflugzeuge. Die reale Flugerfahrung variierte von 60h bis zu 24.000h absolvierter Flugzeit. Alle Piloten waren zudem mindestens mit Simulationssoftware, darüber hinaus aber auch mit professionellen Simulatoren, erfahren. Das Landeszenario wurde von allen Piloten 5 Mal in Folge absolviert. Der Versuch dauerte pro Proband ca. 1h.

Aus dem Versuch konnten folgende Erkenntnisse gezogen werden:

- Die resultierende Systembelastung folgt erneut einer Lognormalverteilung.
- Hohe Variation der Handlungsfolge aller Piloten: 39,7% Wahrscheinlichkeit für den präferierten Pfad.
- Signifikanter positiver Einfluss von Qualifikation, Simulationserfahrung und Flugerfahrung mit der Cessna auf die Wahrscheinlichkeit, dem präferierten Pfad zu folgen.
- Piloten, die dem präferierten Pfad folgten, erzielten eine signifikant geringere Belastungsstreuung.
- Für die Markov-Zustände 4, 8, 10 und 11 wurden Prädiktoren für die Vorhersage der resultierenden Belastung gefunden.

Eine ausführliche Darstellung und Ausführung des Versuchs und der Studienergebnisse befindet sich in Oberle & Bruder (2015) und Oberle et al. (im Druck).



**Abbildung 2:** Resultierendes Markov-Modell zur Beschreibung der Handlungsvariation für alle 5 Flüge aller 42 Piloten während der Durchführung eines Landemanövers. Dargestellt sind die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den 11 potentiellen Teilhandlungen. Der wahrscheinlichste Pfad ist rot hervorgehoben.

### 3.3 Ansätze zur Unsicherheitsreduzierung

In der dritten Studie wurde überprüft, ob durch geeignete Darstellung eines Belastungsfeedbacks für den Nutzer eine Unsicherheitsreduktion möglich ist und inwieweit die Umsetzung und Gestaltung des Belastungsfeedbacks die Unsicherheit beeinflusst. Hierfür wurde eine Studie mit 32 Probanden am Dreibein-Demonstrator durchgeführt. Die Aufgabe der Probanden bestand im Stapeln zweier identischer Gewichte auf dem Dreibein, wobei einmal kein zusätzliches Feedback und zweimal verschiedene digitale Feedbackvarianten zur Darstellung der resultierenden Belastung eingesetzt wurden. Eine der verwendeten digitalen Feedbackvarianten wurde unter Verwendung des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses nach DIN EN ISO 9241-210:2010 (2011) entwickelt.

Es konnte gezeigt werden, dass die Verwendung eines digitalen Belastungsfeedbacks zu einer signifikanten Unsicherheitsreduktion führt, wobei das menschenzentriert gestaltete Feedback gegenüber dem normalen Feedback zu einer tendenziell geringeren Unsicherheit beitrug.

Eine ausführliche Beschreibung des Versuchs sowie der Ergebnisse ist in Oberle et al. (2017) dargestellt.

## 4. Fazit und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die empirische Quantifizierung des menschlichen Einflusses auf die Unsicherheit in der Mensch-Technik-Interaktion generell möglich ist. Die resultierende Belastung scheint bei Existenz eines absoluten Nullpunktes zudem einer Lognormalverteilung zu folgen. Dies ist bei der Verwendung von statistischen Werten wie z.B. Mittelwert und Standardabweichung zu berücksichtigen. Explizit konnte zudem die Auswirkung von spezifischen, menschlichen Einflussgrößen sowie die Unsicherheit einer reinen Handlungsausführung gegenüber

einer Handlungssequenz quantifiziert werden. Der positive Einfluss eines digitalen, menschenzentriert gestalteten Belastungsfeedbacks wurde ebenfalls nachgewiesen.

Die gewonnenen Erkenntnisse können in einem nächsten Schritt zur Gestaltung und Anpassung von Mensch-Maschine-Systemen verwendet werden. Durch die Kenntnis der Auswirkung von Einflussgrößen sowie der Handlungsausführung und Handlungssequenz können Schnittstellen so ausgelegt werden, dass positive Faktoren verstärkt und negative Aspekte abgeschwächt werden. Weiterhin lässt sich die resultierende Unsicherheit durch eine menschenzentrierte Gestaltung von Belastungsfeedback reduzieren.

Aufbauend auf den Ergebnissen ist für die Zukunft die Entwicklung einer Systematik zur unsicherheitsgerechten und resilienzförderlichen Systemgestaltung geplant.

## 5. Literatur

- Badke-Schaub P, Hofinger G, Lauche K (2008) Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen: mit 17 Tabellen. Heidelberg: Springer.
- Bubb H (Ed.) (1992) Menschliche Zuverlässigkeit. Definitionen, Zusammenhänge, Bewertung. 1. Aufl. Landsberg: Ecomed.
- Dekker S, Hollnagel E, Woods D, Cook R (2008) Resilience Engineering. New directions for measuring and maintaining safety in complex systems. Final Report 2008. Lund University School of Aviation.
- DIN EN ISO 9241-210:2010 (2011) Ergonomie der Mensch-System-Interaktion. Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme. Berlin: Beuth.
- Grote G (2014) Adding a strategic edge to human factors/ergonomics: Principles for the management of uncertainty as cornerstones for system design. *Applied Ergonomics* 45(1): 33–39. DOI: 10.1016/j.apergo.2013.03.020.
- Hanselka H, Platz R (2010) Ansätze und Maßnahmen zur Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus. *Konstruktion* 11/12: 55-62.
- Hinckley CM (1994) A global conformance quality model. A new strategic tool for minimizing defects caused by variation, error, and complexity. Washington, D.C., Oak Ridge, Tenn.: United States. Dept. of Energy; Distributed by the Office of Scientific and Technical Information.
- König C, Oberle M, Hofmann T (2016) "Mein Telefon ist resilient?" - Resilienz als Chance zur Gestaltung von Arbeitsmitteln. 62. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft.
- Mathiowetz V, Volland G, Kashman N, Weber K (1985) Adult norms for the box and block test of manual dexterity. *The American Journal of Occupational Therapy* 36(6): 386–391.
- Oberle M, Bruder R (2015) Process model for the investigation of human uncertainty during the usage of load bearing systems. *Proceedings 19th Triennial Congress of the IEA*.
- Oberle M, König C, Bruder R (im Druck) Investigation of the Action Sequence of Pilots during Landing using Markov Models. *Proceedings 32<sup>nd</sup> EAAP Conference, Cascais, Portugal*.
- Oberle M, Sommer E, König C (2017) Reduction of Human Induced Uncertainty Through Appropriate Feedback Design. L. Isabel Nunes (Ed.) *Advances in Human Factors and System Interactions: Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Human Factors and System Interactions, July 27-31, 2016, Walt Disney World®, Florida, USA*. Cham: Springer International Publishing: 43–55.
- Sheridan TB (2010) The system perspective on human factors in aviation. In Eduardo Salas, Daniel E. Maurino (Eds.): *Human Factors in Aviation*. 2nd ed. Amsterdam, Boston: Academic Press/Elsevier.
- Wickens CD, Hollands JG, Banbury S, Parasuraman R (2012) *Engineering psychology and human performance*. Fourth edition.

**Danksagung:** Ein besonderer Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die Finanzierung dieser Forschung im Rahmen des Sonderforschungsbereich 805.