

# Menschliche Zuverlässigkeit im Bahnbereich – Einflussfaktoren und Bewertungsmethoden

---

Dipl.-Inform. Daniel Schwencke  
Institut für Verkehrssystemtechnik,  
Abteilung Bahnsysteme, DLR e.V., Braunschweig

---

## 1 Einleitung

Der Bahnbetrieb wird durch ein komplexes Zusammenspiel von Mensch und Technik ermöglicht. Dabei lag in der Vergangenheit der Fokus im Eisenbahnsystem auf dem technischen Fortschritt; ebenso wie in anderen Domänen war und ist eine fortschreitende Automatisierung zu beobachten. Treiber dieser Entwicklung ist zum einen die Wirtschaftlichkeit, zum anderen die Sicherheit des Eisenbahnbetriebs: technische Systeme übernehmen Funktionen des Menschen oder sichern seine Handlungen ab, weil sie oft eine deutlich höhere Zuverlässigkeit als der Mensch aufweisen.

Doch die Automatisierung hat Grenzen und bringt neue Probleme mit sich. In einem komplexen System wie dem Bahnsystem werden immer wieder neue, nicht beim Design des technischen Systems vorhergesehene Situationen eintreten. Der Mensch muss die Technik folglich überwachen, um in unvorhergesehenen Situationen geeignete Maßnahmen zu ergreifen – eine Aufgabe, die umso schwerer ist, wenn im Zuge der Automatisierung Personalkapazität abgebaut wurde und manuelle

Eingriffe des Menschen selten geworden sind. Paradoxerweise verlagern sich die Probleme mit der menschlichen Zuverlässigkeit in verschärfter Weise auf den Betrieb in der Rückfallebene [1]. Weiterhin gibt es Aufgaben, die nach wie vor effektiver oder sogar ausschließlich durch den Menschen erledigt werden können. Und schließlich ist ethisch und rechtlich die Frage nach der Verantwortlichkeit für den Betrieb eines Systems immer schwieriger zu beantworten, je komplexer, verwobener und automatisierter es ist [2].

All dies spricht dafür, dass der Mensch auch in Zukunft entscheidender Teil des Bahnsystems sein wird in seinen verschiedenen Rollen in der Organisation und Durchführung des Betriebs, aber auch als Wartungs- und Sicherheitspersonal. Da jedoch in der Vergangenheit der „Faktor Mensch“ vernachlässigt wurde, ergibt sich heute ein Nachholbedarf, z. B. bei der menschenzentrierten, nutzerfreundlichen Gestaltung der technischen Systeme und bei der Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit. Zudem sind inzwischen auch im Eisenbahnwesen Innovationszyklen kürzer und die Zahl der Änderungen größer geworden. Umso wichtiger ist es heute, den Menschen mit seinen Fähigkeiten und Schwächen in die Entwicklungen einzubeziehen sowie die Gestaltung der Arbeitsplätze den geänderten Aufgaben und Rahmenbedingungen anzupassen, um

das hohe Sicherheitsniveau der Eisenbahn aufrecht zu erhalten.

In den vergangenen 10 bis 15 Jahren wurde die Dringlichkeit der stärkeren Berücksichtigung des Menschen im Eisenbahnbetrieb verschiedentlich erkannt; „Rail Human Factors“ sind zu einem eigenen Forschungszweig geworden. Damit einher ging die Erkenntnis, dass die Betrachtung menschlicher Zuverlässigkeit im Bahnwesen nicht adäquat erfolgte [3]: an manchen Stellen wurde der Mensch schlichtweg ignoriert, an anderen Stellen wurden Bewertungsmethoden verwendet, die auf einfache Weise Zuverlässigkeit quantifizierten, deren Validität jedoch fraglich ist. Insgesamt fehlte der Blick für die vielfältigen Ursachen, die sich hinter menschlichen Fehlern verbergen, sowie die Anpassung an die geänderten Aufgaben der Menschen.

Grundlegende Motivation für eine fundierte Betrachtung der menschlichen Zuverlässigkeit ist die Erkenntnis, dass

- Menschen Fehler machen, jedoch in den allermeisten Fällen ohne Absicht. Damit stellt sich die Frage, welche Faktoren den Fehler begünstigt haben;
- eine hohe Zuverlässigkeit des Menschen einen wichtigen Beitrag zur Sicherheit des Bahnsystems liefert: der Großteil an Unfällen und kritischen Ereignissen wird menschlichem Versagen zugeschrieben;
- eine hohe menschliche Zuverlässigkeit die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit des Bahnsystems steigert: Fehler können sich in Form von Verspätungen leicht über weite Bereiche eines dicht befahrenen Schienennetzes ausbreiten und speziell bei Schäden an Fahrzeugen und Infrastruktur zu hohen Reparatur- und Folgekosten führen.

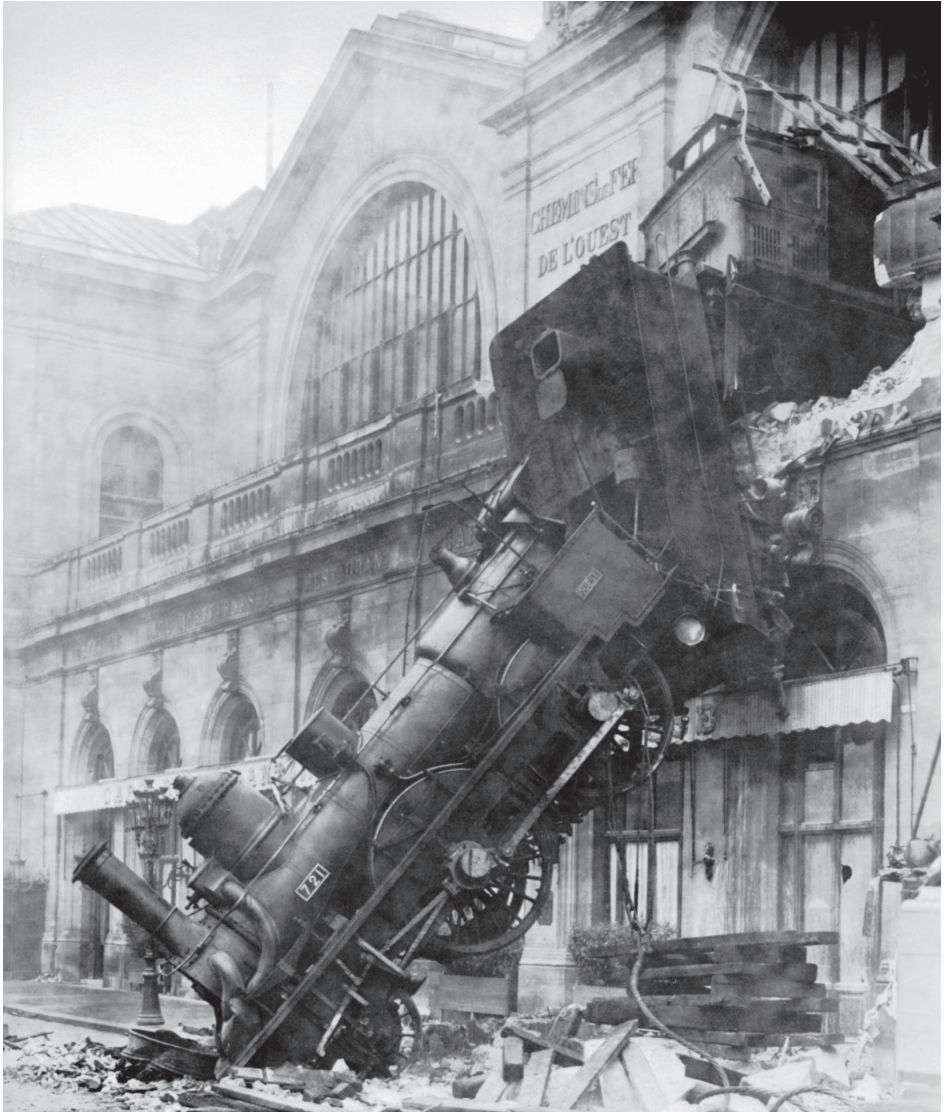
Der vorliegende Artikel soll dazu dienen, einen Überblick über das Thema der menschlichen Zuverlässigkeit im Bahnbereich zu geben. Dazu wird zunächst der historische Kontext genauer beleuchtet

und es werden Motivation und Schwierigkeiten des Themas vertieft. Ein Abschnitt zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit schlägt den Bogen von prinzipiellen Ansätzen bis hin zu einer aktuellen Übersicht existierender Methoden im Bahnbereich. Ein weiterer Abschnitt geht der Frage nach, welche die wichtigsten Einflussfaktoren auf die menschliche Zuverlässigkeit im Bahnbereich sind.

Regelmäßige Leser des Eisenbahn-Ingenieur Kalenders mögen bemerkt haben, dass es bereits in der Ausgabe von 2010 einen Artikel zum Themenfeld der menschlichen Zuverlässigkeit von Autoren des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) gab [4]. Während der Schwerpunkt dort auf der Integration menschlicher Zuverlässigkeit in Sicherheitsbetrachtungen und damit auch auf der Quantifizierung der Zuverlässigkeit lag, beleuchtet der vorliegende Artikel vor allem, warum die Beschäftigung mit menschlicher Zuverlässigkeit im Bahnbereich wichtig ist und was sie umfasst. Das Thema Bewertungsmethoden, das bereits in [4] dargestellt wurde, wird im aktuellen Artikel noch einmal aufgenommen und entsprechend der zwischenzeitlichen Entwicklungen aktualisiert.

## 2 Historische Entwicklung

Eisenbahnunfälle wie z.B. das Zugunglück 1895 am Gare Montparnasse in Paris (Abb. 1) dokumentieren, dass einfache menschliche Fehler spektakuläre Folgen haben können: durch die überhöhte Geschwindigkeit und die zu spät eingeleitete Bremsung überfuhr die Lokomotive Prellbock, Bahnsteig, durchbrach die Wand des Bahnhofs und stürzte auf den tiefergelegenen Platz, wo sie eine Frau (durch Bahnhofstrümmer) erschlug und eine Straßenbahn nur knapp verfehlte. Sie dokumentieren auch, dass menschliche Fehler oft durch eine Kombination von



**Abb. 1:** Das Eisenbahnglück am Gare Montparnasse vom 22. Oktober 1895

Faktoren aus dem Umfeld des Menschen begünstigt werden: im Fall Montparnasse verleiteten einige Minuten Verspätung den eigentlich erfahrenen Lokführer dazu, den Kopfbahnhof mit höherer Geschwin-

digkeit anzufahren. Es kam hinzu, dass die Druckluftbremse nicht angeschlossen war, die verbleibende Locomotivbremse für das Zuggewicht ungeeignet und ein Zugführer mit Dokumenten beschäftigt war. Auch die of-

fenbar vorhandene Regel, die die Nutzung der Druckluftbremse bei der Anfahrt auf den Bahnhof verbot, konnte das Unglück nicht verhindern. Trotzdem wurden allein die für die zu hohe Geschwindigkeit und zu späte Bremsung verantwortlichen Personen zur Rechenschaft gezogen. Diese Sichtweise ist typisch für ein technologisch geprägtes Zeitalter – wie bei einem technischen Versagen eines Bauteils ließ sich auch im Menschen eine einfache kausale Ursache finden; das ingenieurmäßige Vorgehen war auf die Beseitigung der Ursache bzw. auf die Installation von Schutzmaßnahmen ausgerichtet. Lange Zeit änderte sich daran nichts Grundlegendes; die Unfallbetrachtung wurde auf Kausalketten (Domino-Modell [5]) ausgeweitet, was jedoch eher zur Folge hatte, dass der Mensch noch stärker als Ursache wahrgenommen wurde. Es wurde begonnen, technische Barrieren gegen menschliches Versagen zu installieren (z. B. Zugsicherungssysteme wie die induktive Zugsicherung ab 1934). In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts führte die IT-Revolution zu völlig neuen Möglichkeiten der Automatisierung und damit zu einem Wandel der Arbeitsplätze und Aufgaben auch im Eisenbahnwesen. Kognitive, überwachende Aufgaben ersetzen aktive körperliche Arbeit wie beispielsweise beim Wandel vom mechanischen zum elektronischen Stellwerk beobachtbar; bis heute setzt sich eine Zentralisierung und Virtualisierung der Arbeitsplätze fort, wie z. B. die Einrichtung von Betriebszentralen oder die Ersetzung von Papierunterlagen und Streckensignalen durch elektronische Systeme im Führerstand des Lokführers, wodurch die innere und äußere Nähe des Menschen zum tatsächlichen Geschehen vor Ort abnimmt. Die Etablierung von Hochgeschwindigkeitsverkehren hängt ebenfalls mit der Entwicklung zusammen, dass der Mensch in die Überwachung technischer Systeme zurückgedrängt wird. All diese

Änderungen wurden jedoch lange kaum aus der Sicht der menschlichen Bediener, ihrer Bedürfnisse, Fähigkeiten und Schwächen reflektiert, was sich in ergonomischen Mängeln vieler entstandener technischer Systeme und ihrer Mensch-Maschine-Schnittstellen niedergeschlagen hat. Breit angewandte Standards entstanden erst spät, wie beispielsweise die deutsche Führerstandsnorm DIN 5566 (Vornorm seit 2000, Vollnorm [6] seit 2006) oder die internationale Variante UIC 612 ([7], 2009-2011).

Die Erforschung menschlicher Zuverlässigkeit ist – nicht nur bei der Eisenbahn – noch eine vergleichsweise junge Disziplin: gemäß Hollnagel [8] beginnt das „Human Factors-Zeitalter“ seit ca. 1980. Eine wichtige Rolle spielte hierbei das Unglück einer partiellen Kernschmelze im Kernkraftwerk Three Mile Island in den USA, bei dem deutlich wurde, dass hinter Fehlern des Teams im Kontrollraum mangelnde Information sowie mangelhaftes Training steckten. Im Eisenbahnwesen war insbesondere der Unfall von Ladbroke Grove 1999 als Teil einer ganzen Serie von Eisenbahnunglücken in England Auslöser dafür, dass dort in den vergangenen zehn Jahren eine umfangreiche Human Factors Forschung aufgebaut wurde, siehe z. B. [9]. Die damalige Kollision zweier Personenzüge im Londoner Stadtteil Ladbroke Grove forderte 31 Todesopfer und hinterließ über 400 Verletzte, nachdem einer der Lokführer ein halt zeigendes Signal überfahren hatte. Auch hier wurde deutlich, dass mehr als nur Unaufmerksamkeit hinter dem menschlichen Fehler steckte, z. B. die ungünstige Signalposition sowie die tief stehende Sonne.

Seit Mitte der 1990er Jahre wurde verstärkt wahrgenommen, dass auch organisatorische Faktoren bedeutenden Einfluss auf die menschliche Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit haben. Hollnagel [8] bezeichnet dies als „Zeitalter des Sicher-

heitsmanagements“. Verbunden damit ist neben der reaktiven Behandlung des Themas Sicherheit die zunehmende Ergänzung um proaktive Maßnahmen: neben dem Lernen aus kritischen Ereignissen und Unfällen wird versucht, Gefährdungen vorher zu entdecken und zu vermeiden. Unternehmen werden ganzheitlich als Zusammenwirken von Mensch, Technik und Organisation [10] betrachtet und eine Sicherheitskultur (z. B. der Verantwortungsübernahme und Offenheit) geschaffen; in vielen Unternehmen setzt sich die Erkenntnis durch, dass Investitionen in solch eine Kultur durchaus positive wirtschaftliche Effekte bringen können. Teils ersetzt die neue Sicherheitskultur eine Bestrafungs- und Angstkultur, die zuvor Leistung hemmte und Sicherheit untergraben konnte. Nicht zuletzt reflektiert all dies auch die gesellschaftliche Entwicklung von der Aufgaben- und Vorschriftenerfüllung einer Dienstleistungsgesellschaft hin zu einer Kultur des Lernens und Mitdenkens der Wissensgesellschaft.

Nicht zu vergessen ist der bahnpolitische Einfluss der EU seit Beginn der 1990er Jahre: die Liberalisierung des europäischen Bahnmarktes und Harmonisierung der Eisenbahnen brachte umfassende Änderungen der Bahnsysteme und Organisationsstrukturen mit sich. Eine intensive Auseinandersetzung damit, wie dabei das höhere Sicherheitsniveau in einigen Mitgliedsstaaten gehalten und das geringere in anderen angehoben werden konnte, war nötig. Mit der Entscheidung für einen risikobasierten Ansatz stellte man zwar die Weichen für Vergleichbarkeit und Harmonisierung der Sicherheit, legte aber auch den Grundstein für Schwierigkeiten im Umgang mit der menschlichen Zuverlässigkeit: in den CENELEC-Normen wird die Durchführung von Risikoanalysen und generell eine Einbeziehung menschlicher Faktoren gefordert [11]. In quantitativen Analysen ergibt sich damit die Notwendig-

keit, auch Fehlerraten für den Menschen zu ermitteln, was jedoch – verglichen mit der Technik – eine ungleich schwerere Aufgabe ist, wenn die Zahlen valide und ausreichend genau sein sollen. Seit 2009 ist die explizite Risikoanalyse sogar im EU-Recht als eine Säule der europäischen Verordnung zur Risikobewertung [12] verankert, öffentliche und praktisch anwendbare Bewertungsmethoden für die menschliche Zuverlässigkeit jedoch kaum vorhanden. Aus diesen Gründen hat die europäische Eisenbahn-Agentur (ERA) begonnen, auf dem Gebiet aktiv zu werden [13]. Ebenso gibt es bei der ERA seit 2012 einen Human-Factors-Schwerpunkt der Safety Unit mit dem Ziel, menschliche Faktoren zu stärkerer Berücksichtigung sowohl in der europäischen Gesetzgebung als auch im Eisenbahnsektor zu verhelfen.

Inzwischen ist die Situation in Europa durch ein starkes Gefälle in Forschung und Anwendung im Bereich Human Factors geprägt. Eindeutig führend ist hier England; aber auch in Ländern wie Schweden, den Niederlanden und der Schweiz findet das Thema größere Beachtung. In Deutschland ist das DLR eine von mehreren Institutionen, die auf dem Gebiet forschen. In anderen europäischen Staaten ist kaum Forschung und Know-how vorhanden, weswegen die ERA einen entsprechenden Wissenstransfer unterstützt. International schlagen sich, gerade wenn es um das Thema menschliche Faktoren geht, verschiedene Automatisierungsgrade, aber auch kulturelle Unterschiede in den Forschungsschwerpunkten nieder. So scheint in Japan, wo minutiöse Arbeit von großer Wichtigkeit ist und Triebfahrzeugführer bereits bei geringen Verspätungen mit Konsequenzen zu rechnen haben, besonderes Interesse am Thema der Sicherheitskultur zu bestehen [14]. Was die Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit angeht, sind es international eher die großen Staaten, in denen Methodenentwick-

lung geschieht.

### 3 Motivation und Schwierigkeiten

Warum ist es wichtig, sich mit der menschlichen Zuverlässigkeit im Bahnbereich auseinander zu setzen? Diese Frage stellt sich umso mehr, als dass es in der Vergangenheit offensichtlich ausreichend war, sich vor allem der Sicherheit der technischen Systeme zuzuwenden und menschliche Handlungen allenfalls durch technische Einrichtungen abzusichern.

Wie jedoch bereits in der Einleitung diskutiert, geben gerade die fortschreitende Automatisierung und die immer komplexeren Systeme Anlass zur Beschäftigung mit der menschlichen Zuverlässigkeit, da grundlegende Änderungen der Arbeitsplätze aus Sicht des Menschen bislang nicht ausreichend reflektiert wurden und da speziell im Störfall die Zuverlässigkeit des Menschen immer größere Bedeutung bekommt. Zudem ist die Sicherheitstechnik der Bahn über viele Jahrzehnte ausgereift und das Sicherheitsniveau hoch. Echte Neuerungen, die die Sicherheit weiter verbessern, werden nur noch selten realisiert. Die Ursache von Unfällen wird in der Mehrzahl der Fälle mit „menschlichem Versagen“ angegeben – Grund genug, die menschliche Zuverlässigkeit in den Fokus zu nehmen und genauer zu untersuchen. Ebenso in der Einleitung bereits angeklungen ist die Erkenntnis, dass eine bessere Nutzung der Potenziale des Menschen einen Beitrag zur Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit des Eisenbahnbetriebs genauso wie zu seiner Sicherheit beitragen kann.

Ein ganz praktischer Grund, der viele Unternehmen im Eisenbahnsektor streng genommen sogar dazu verpflichtet, sich mit dem Thema auseinander zu setzen, ist die in Regelwerken geforderte Einbeziehung der menschlichen Faktoren in Entwicklungsprozesse und Sicherheitsana-

lysen [11, 15]. Eine genauere Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit kann hier jedoch nicht nur Last, sondern auch Chance sein: durch die Verwendung realistischerer statt der meist konservativen Abschätzungen können sich Chancen für neue und kostengünstigere Systemdesigns ergeben.

Nicht zu vernachlässigen ist, dass auch der menschliche Bediener in seinem Arbeitsalltag profitiert, wenn er mehr ins Zentrum der Systementwicklung rückt, z. B. von auf seine Fähigkeiten abgestimmten Aufgaben und benutzerfreundlichen technischen Systemen.

Doch bei der Auseinandersetzung mit der menschlichen Zuverlässigkeit trifft man auch auf verschiedene Widerstände und Schwierigkeiten: die Forschung der vergangenen 10 bis 15 Jahre ist vielerorts unbekannt, Sicherheit wird traditionell aus technisch-funktionaler Perspektive betrachtet.

Die Komplexität des Themas zusammen mit einem oft erst zeitversetzt einsetzenden Return of Invest, von dem möglicherweise schwer nachweisbar ist, dass er auf ein Maßnahmenbündel im Human Factors-Bereich zurückgeht, bewirken, dass das Thema auf Management-Ebene nicht einfach vermittelbar ist. Darüber hinaus formuliert Hollnagel [16] allgemein ein auf proaktive Sicherheitsmaßnahmen zutreffendes Dilemma, das auch für die menschliche Zuverlässigkeit gilt: wenn das Investment gut ist, gibt es keine Vorfälle, die es rechtfertigen; wenn es schlecht ist, gibt es genügend Vorfälle, was jedoch reaktive Maßnahmen stärkt.

Auf der praktischen Anwendungsebene wird bei der Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit teils aus Unkenntnis, teils wegen des zunächst höheren Aufwands und der möglichen Probleme bei der Anerkennung durch Gutachter und Sicherheitsbehörden die Änderung gescheut; qualifiziertes Bewertungspersonal ist rar.

Für die Durchführung klassischer Bewertungsmethoden menschlicher Zuverlässigkeit (human reliability assessment – HRA), braucht es Experten zur Durchführung; da die Methoden meist aus anderen Domänen wie der Kernkraft stammen und Jahrzehnte alt sind, ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Bahnbereich fraglich. Lange Lebenszyklen und Kompatibilitätsanforderungen mit Altsystemen ebenso wie der schwierigere Nachweis gleicher Sicherheit hemmen Innovationen im Bereich sicherheitsrelevanter Displays und Bedienelemente.

Doch auch bereits im Forschungsbereich liegen Hindernisse: die Mittel zur systematischen Erforschung der Vielzahl der Einflüsse auf die menschliche Zuverlässigkeit sind kaum gebündelt vorhanden. So bleibt es oft bei Studien einzelner Faktoren, obwohl in der Realität typischerweise ein ganzes Netz von Abhängigkeiten vorliegt. Einige „weiche“ Faktoren sind nicht messbar, andere nicht zugänglich, da sie aus dem persönlichen Bereich stammen. Eine Validierung von Aussagen zur menschlichen Zuverlässigkeit ist mangels geeigneter Daten oft schwer möglich. Simulationsstudien, z. B. am Führerstands- und Stellwerksimulator RailSET\* des DLR, machen Sinn um psychologische Konzepte zu validieren; mit Stichproben typischerweise deutlich unter 100 Teilnehmern und maximal einigen Stunden Dauer pro Proband können jedoch schwerlich Fehlerraten im Bereich von  $10^{-3}/h$  oder sogar  $10^{-4}/h$  mit der nötigen Genauigkeit nachgewiesen werden. Bei Experteneinschätzungen besteht die Gefahr, dass das Ergebnis von aktuellen Trends, der persönlichen Perspektive der Experten und Gruppeneffekten beeinflusst wird. Schwierigkeiten der Quantifizierung menschlicher Zuverlässigkeit im Bahnbereich werden ausführlich in [3] diskutiert; generell täuschen exakte Zahlen, zumal ohne Angabe der Annahmen und Randbedingungen, eine Genauigkeit vor, die so

nicht existiert.

Nicht zu unterschätzen sind die Herausforderungen, die durch die Interdisziplinarität des Themas (Bahnbetrieb, Sicherheitswissenschaft, Psychologie, Arbeitswissenschaft, s. [4]) entstehen. Es gilt, unterschiedliche Sichten, Denkmodelle und Ausdrucksweisen zu verstehen und zu praxistauglichen Ergebnissen zu integrieren. Den Fall, dass wie am DLR bereits ein großer Teil dieser Interdisziplinarität unter einem Dach vorhanden ist, findet man selten.

Aus all diesen Gründen ergibt sich ein unbefriedigender Status Quo, was die Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit angeht: in Deutschland wird die menschliche Zuverlässigkeit in Sicherheitsanalysen immer noch vernachlässigt bzw. nach Hinzen [17] aufgrund weniger Parameter bewertet. Auch die neuere, in DIN VDE V 0831-103 [18] genormte Methode „Risk Score Matrix“ zur Sicherheitsbewertung technischer Systeme legt für die Integration der menschlichen Zuverlässigkeit wieder die Hinzen-Kriterien zugrunde, obwohl zwischenzeitlich die von Hinzen verwendete Aufgabenstufung nach Rasmussen als nicht immer zutreffend kritisiert wurde [19]. Unbefriedigend ist auch die mangelnde Durchgängigkeit der angewandten Methoden, was die Einbeziehung menschlicher Zuverlässigkeit in die Systemgestaltung betrifft.

## 4 Bewertungsmethoden

Da wie zuvor beschrieben die im Eisenbahnwesen verwendeten Methoden zur Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit unzureichend sind, wird in diesem Abschnitt ein Überblick über differenziertere Methoden zur Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit (HRA-Methoden, HRA = human reliability assessment) gegeben. Vorangestellt seien einige generelle Bemerkungen:

- Wegen der Komplexität der Bewertung ist es übliches und sinnvolles Vorgehen, dass Experten Methoden erstellen. Bei den meisten HRA-Methoden werden selbst für die Anwendung Experten oder zumindest eine gewisse Erfahrung mit der Methode benötigt. Je nach Methode kann ein erheblicher Zeit- und Personalaufwand für die Durchführung nötig sein.
- Der Anwender sollte sich über die Validität der Methode informieren. Wie im vorigen Abschnitt diskutiert, ist es schwierig, HRA-Methoden zu validieren; zumindest kann man sich darüber klar werden, aus welcher Datengrundlage heraus die Methode Ergebnisse produziert. Teils gibt es vergleichende Studien der Methoden, die zeigen, wo einzelne Methoden „aus dem Rahmen fallen“. Eine andere wichtige Frage ist, welche Modelle und Annahmen der Methode zugrunde liegen, z. B. Modelle menschlicher Fehler oder menschlicher Kognition.
- Einige Methoden sind speziell für einen Anwendungsbereich, z. B. den Kernenergiebereich konzipiert; viele sind prinzipiell domänenübergreifend anwendbar, stammen aber dennoch ursprünglich aus einer speziellen Domäne. Hier stellt sich die Frage nach der Übertragbarkeit auf den Bahnbereich. Auch bahnspezifische (Anpassungen von) Methoden existieren; sie werden am Ende des Abschnitts separat dargestellt.
- Der Ablauf der Bewertungsmethoden ist meist ähnlich [20]: ein Szenario wird auf die vorliegenden Aufgaben des Menschen sowie den Aufgabenkontext (Einflussfaktoren, performance shaping factors – PSF) analysiert. Für eine Aufgabe werden die Informationsverarbeitung des Menschen sowie sein Verhalten untersucht (Fehleridentifikation und -taxonomie). Daraus werden schließlich resultierende sicherheitstechnische

Konsequenzen und Abhilfemaßnahmen identifiziert.

Allgemein unterscheidet man drei aufeinander aufbauende Phasen von HRA-Methoden:

- die Identifikation menschlicher Fehler (human error identification – HEI),
- die Bestimmung der Fehlerwahrscheinlichkeit (human error quantification – HEQ) aufgrund von Aufgabentyp, Einflussfaktoren und Fehlermechanismen und
- die Ableitung von Maßnahmen zur Vermeidung menschlicher Fehler (human error reduction – HER).

Die einzelnen HRA-Methoden umfassen nicht immer alle Phasen bzw. besitzen Schwerpunkte auf einzelnen Phasen. Um Missverständnisse bzgl. der Quantifizierung menschlicher Fehler zu vermeiden, sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass selbstverständlich nicht alle Menschen unter gleichen Bedingungen das gleiche Verhalten und die exakt gleiche Fehlerwahrscheinlichkeit bei einer Aufgabe aufweisen – es handelt sich in der Realität vielmehr um Wahrscheinlichkeitsverteilungen um einen Zuverlässigkeitswert herum. Ein anderes Missverständnis entsteht oft durch die in der Methodenanwendung bis auf mehrere Nachkommastellen berechnete Fehlerwahrscheinlichkeit, die eine Genauigkeit der Methode suggeriert, die in Wirklichkeit nicht vorhanden ist. Solche Zahlen sind mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet, die von manchen Methoden sogar mit bestimmt wird.

Des Weiteren unterscheidet man Methoden der

- ersten Generation (Fokus auf der Bewertung der einzelnen Aufgabe),
- zweiten Generation (Erweiterung um Aufgabenkontext und „errors of commission“, d.h. Fehler durch nicht notwendige Handlungen) und gelegentlich auch der
- dritten Generation (domänenspezifische



Adaptionen von Methoden der ersten Generation).

Wichtige domänenübergreifende Methoden der ersten Generation sind z.B. THERP, HEART, SPAR-H und TRACER.

THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) wurde im Nuklearbereich von Swain entwickelt; ein Handbuch für die Methode wurde 1983 veröffentlicht. Es enthält zusätzlich zum Vorgehen auch die Daten, auf denen die Methode basiert. Im Nuklearbereich wurde die Methode vielfach angewandt, aber auch in anderen Domänen wurde sie eingesetzt. Sie bietet eine ausführliche Fehleridentifikation (HEI) und -quantifizierung (HEQ) der menschlichen Zuverlässigkeit und ist öffentlich verfügbar. Nachteil der Methode ist, dass die Anwendung sehr ressourcenintensiv sein kann.

HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique) wurde von Williams entwickelt und ab 1985 in Form von wissenschaftlichen Artikeln veröffentlicht. Die Methode ist generisch und relativ schnell anwendbar. Sie umfasst sowohl die Phasen HEI und HEQ als auch HER. Sie basiert auf der Annahme, dass die menschliche Zuverlässigkeit primär vom Aufgabentyp abhängt und ggf. um negative Einflussfaktoren nach unten korrigiert werden muss. Die Methode wurde empirisch validiert, die Herkunft einiger zugrunde liegender Daten ist jedoch unklar und der mathematische Ansatz insofern unschön, als dass er bisweilen Wahrscheinlichkeiten größer als 1 generiert.

SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk – Human Reliability Assessment) basiert auf HEART und wurde als SPAR 1994 von der US Nuclear Regulatory Commission erarbeitet und 1999 zu SPAR-H weiterentwickelt. Eine Verwendung außerhalb des Nuklearbereichs sollte möglich sein, ist aber nicht bekannt. Die Methode ist in Form des Handbuchs öffentlich verfügbar. Sie ist relativ schnell anwendbar, wurde

jedoch für ihren beschränkten Satz an betrachteten Einflussfaktoren kritisiert. Die verwendeten Daten stammen aus verschiedenen anderen HRA-Methoden.

TRACER (Technique for the Retrospective and Predictive Analysis of Cognitive Errors) ist eine reine HEI-Methode. Sie wurde im Luftfahrtbereich von Shorrock und Kirwan entwickelt, ist aber domänenübergreifend verwendbar. Die Methode wurde 2002 veröffentlicht und basiert auf einem eigenen Modell menschlicher Kognition. Zu den Methoden der zweiten Generation gehören u. a. CREAM, ATHEANA und CAHR. Alle drei betonen, dass sie sowohl retrospektiv (rückblickend, analysierend) als auch prospektiv (vorausschauend, vorhersagend) angewendet werden können.

CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method) wurde 1993 von Hollnagel im Nuklearbereich entwickelt, eignet sich jedoch auch für die Anwendung in anderen Domänen. Die Methode ist öffentlich verfügbar, wird aber offensichtlich kaum noch als HRA Methode weiterentwickelt und scheint eher schwer anwendbar.

ATHEANA (A Technique for Human Event Analysis) wurde ca. 1996 bis 2000 von einem ganzen Entwicklerteam bei der US Nuclear Regulatory Commission erstellt und ist öffentlich verfügbar. Die Methode ist prinzipiell aber auch für andere Domänen geeignet. Für die tendenziell aufwändige Anwendung ist eine gute Methodenkenntnis unbedingt notwendig.

CAHR wurde 1996 von Sträter bei der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit konzipiert und basiert auf einer Datenbank mit analysierten Unfall- bzw. Ereignisdaten. Aus diesen Daten können menschliche Zuverlässigkeitswerte generiert werden. CAHR ist ein vollständig generischer Ansatz und nicht öffentlich verfügbar.

Die Methoden der zweiten Generation können allgemein als noch nicht vollständig ausgereift bzw. noch in der Entwick-

lung angesehen werden. Ihre praktische Anwendung beschränkt sich meist auf wenige Fälle. Einen nützlichen Überblick über die genannten und weitere HRA-Methoden sowie Literaturverweise erhält der interessierte Leser in [21].

Einen Überblick über die existierenden bahnspezifischen HRA-Methoden gibt Tab. 1. Einige basierend dabei auf generischen HRA-Methoden der ersten Generation.

Das Human Factors Analysis Toolkit stammt aus dem EU-Projekt HUSARE und stellt ein HEI-ähnliches Verfahren ergänzt um eine Art FMEA dar. Rail-HEI und Rail-HEQ sind im Zusammenhang entstanden und werden gemeinsam als

Rail-HRA bezeichnet. Sie waren primär für den Triebfahrzeugführer gedacht, Anwendungen auf und Weiterentwicklungen für andere Bereiche existieren jedoch. Das Railway Action Reliability Assessment stellt den Nachfolger von Rail-HEQ dar. Die MBI sowie der HuPeROI weichen vom klassischen Schema einer HRA teilweise ab; beide bieten die Möglichkeit einer Semiquantifizierung (eines „Scores“ auf einer Skala). Die MBI basiert auf der Hypothese, dass die Komplexität der Mensch-Barrieren-Interaktion mit der Fehlerwahrscheinlichkeit des Menschen zusammenhängt und wurde vor allem für Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter entwickelt. Methoden, die primär der Un-

Akronym	voller Name	Land	Jahr	basiert auf	Literatur
---	Human Factors Analysis Toolkit	EU	2000		[22]
Rail-HEI	Rail Human Error Identification	GB	2005	TRACEr	[23]
Rail-HEQ	Rail Human Error Quantification	GB	2005	HEART	s. Rail-HEI
(CAS-) HEAR	(Computer-Aided System for) Human Error Analysis & Reduction	KOR	2007/2008		[24]
TRACEr-RAV	Technique for the Retrospective Analysis of Cognitive Errors for Rail, Australian Version	AUS	2008	TRACEr	[25]
MBI	Mensch-Barrieren-Interaktion	DE	2011		[26]
---	Railway Action Reliability Assessment	GB	2011	HEART	[27]
HuPeROI	Human Performance Railway Operational Index	GB	2012		[28]
---	SMSmod-Methodik	DE	2012/2013		[29]

Tab. 1: Eisenbahnspezifische Methoden zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit

falluntersuchung dienen wie das Railway Accident Investigation Tool (RAIT, GB 1994) oder das Human Factors Analysis and Classification System for Railroad (HFACS-RR, USA 2006) wurden in Tabelle 1 nicht aufgenommen.

Eine letzte Kategorie von Methoden sind diejenigen, die auf neueren systemtheoretischen Ansätzen beruhen (s. u. im Fazit des Artikels). Sie sind domänenübergreifend und analysieren Mensch und Technik nicht mehr getrennt, sondern gemeinsam in einer Methode.

## 5 Die wichtigsten Einflussfaktoren

Die menschliche Zuverlässigkeit bei der Erledigung einer Aufgabe ist zunächst einmal davon abhängig, wie schwierig die Aufgabe selbst ist; an modernen Arbeitsplätzen wird dies vor allem durch die kognitiven Anforderungen der Aufgabe abgebildet. Eine wichtige Erkenntnis, die zu den Bewertungsmethoden der zweiten Generation führte, war jedoch, dass der Kontext, in dem der Mensch die Aufgabe erfüllt, ebenfalls bedeutenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit nehmen kann. Einflussfaktoren (engl. performance shaping factors, PSFs) dienen dazu, den Kontext, also die Eigenschaften der technischen Systeme, des Menschen selbst, der Umwelt und der Organisation, sowie deren negative oder positive Einflüsse auf die Belastung und Beanspruchung des Menschen abzubilden. Einflussfaktoren finden sich – teils unter anderer Bezeichnung – in den verschiedenen HRA-Methoden wieder. In der Auswahl, Anzahl und Granularität der PSF unterscheiden sich die Methoden jedoch teils deutlich. Dies kann daran liegen, dass einige Methoden auf eine bestimmte Domäne zugeschnitten sind, erklärt sich aber vor allem durch die verschiedenen Perspektiven auf die PSF, die unterschiedliche Anforderungen an die Liste der verwendeten Faktoren stellen:

- PSF dienen zum einen zur Beschreibung und zum Verständnis des Arbeitssystems. Dazu ist eine möglichst vollständige Liste der PSF mit allen ihren gegenseitigen Abhängigkeiten wünschenswert.
- Zum zweiten dienen sie zur qualitativen und quantitativen Bewertung der Zuverlässigkeit. Hierzu sollte eine handhabbare Menge der für die Bewertung relevantesten und zugänglichen PSF vorliegen, die möglichst überschneidungsfrei ist, um Doppelzählungen von Einflüssen (wie z. B. bei Nachtdienst und Müdigkeit) zu vermeiden.
- Zum dritten dienen PSFs als Ansatzpunkte zur Fehlerreduktion, z. B. durch Verbesserung der Systeme, Prozeduren und Organisationsstrukturen. Anforderungen bestehen hier in einer Strukturierung der PSFs gemäß dem realen Arbeitssystem, sowie in einer Priorisierung und einem Clustering in Wirkkomplexe entsprechend ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten.

Daneben beeinflussen weitere Aspekte das Design einer Liste von PSF wie die Abwägung, wie man dynamische PSF (sich schnell ändernde Größen wie das Wetter, die Stimmung des Menschen oder die Arbeitsbelastung) im eigentlich statischen PSF-Bewertungskonzept einbinden möchte oder wie eine sinnvolle Möglichkeit einer Wertzuordnung zu einem PSF bei tool-unterstützten Methoden aussehen kann. Entsprechend sind in den Methoden und in der Literatur diverse Klassifikationen von PSFs vorzufinden. Eine allgemeine Klassifikationsmöglichkeit bietet z. B. die VDI-Norm 4006 [30], die auf der obersten Ebene externale (technische und organisatorische) und internale Faktoren (Leistungsfähigkeit und -bereitschaft des Menschen) unterscheidet. Eisenbahnspezifisch strukturierte PSF-Sammlungen finden sich z. B. in Anhang 5 des Berichts zur Methode Rail-HEI ([31], 97 PSF in neun Gruppen), bei Hammerl ([26], 20 PSF in drei Grup-

pen), Schwencke et al. ([32], über 150 PSF in vier Gruppen und 22 Untergruppen) und Kyriakidis et al. ([28], 49 PSF in sieben Gruppen).

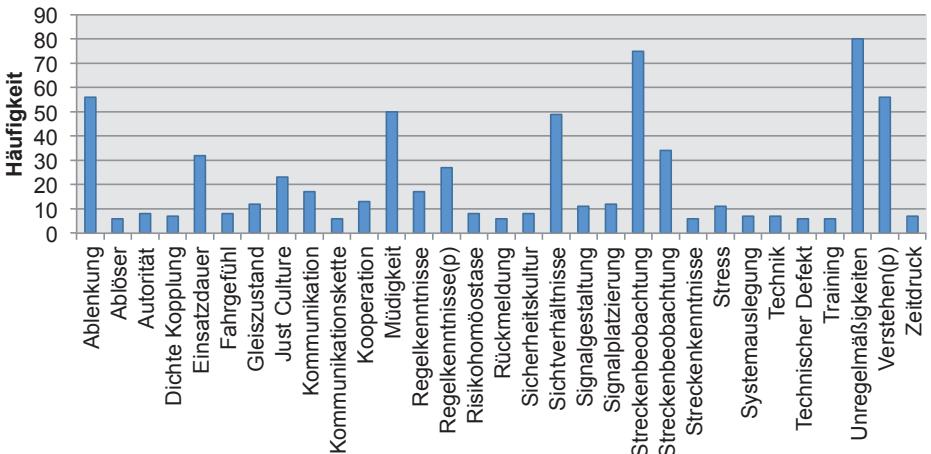
Wenn es nun in diesem Abschnitt darum geht, die wichtigsten Einflussfaktoren auf die menschliche Zuverlässigkeit im Bahnwesen zu identifizieren, ist ein Blick auf die Themen der Rail Human Factors-Forschung hilfreich. Wilson und Norris haben bereits vor zehn Jahren als Standortbestimmung und Literatursammlung der aufblühenden Disziplin einen Artikel geschrieben [33], der die bekannte Forschung sowie zukünftige (britische) Vorhaben zusammentrug. Im Zentrum des Interesses standen dabei Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter, daneben auch das Wartungspersonal.

Für den Triebfahrzeugführer wurden die Faktoren Wachsamkeit und Wahrnehmung genannt, komplementiert durch die Gestaltung und Positionierung von Signalsystemen und Tafeln. Müdigkeit, Schichtpläne und Einsatzdauern waren

ebenso Untersuchungsgegenstand wie Alkoholeinfluss. Zuletzt wurden die Gestaltung der Führerräume und der einzelnen Anzeigen sowie die Arbeitsbelastung thematisiert. Bei Fahrdienstleitern (inklusive Disponenten, einer Rolle, die im englischen Bahnbetrieb mit dem Fahrdienstleiter zusammenfällt) wurden ebenfalls die (mentale) Arbeitsbelastung sowie die Gestaltung der Anzeigen genannt. Hinzu kommen die Faktoren Situationsbewusstsein, Teamwork und Kompetenz. Ergänzende Faktoren aus dem Bereich der Wartung waren Kommunikation und Sicherheitskultur. Zukunftsgerichtet wurden die Themen Aufmerksamkeit und Gestaltung von Alarmen, Streckenkenntnis und Berufserfahrung sowie die Führerstandumgebung und die Gestaltung des Regelwerks für den Triebfahrzeugführer ergänzt.

Dass diese Forschungsthemen tatsächlich auch für den heutigen deutschen Bahnbetrieb den größten Teil der wichtigsten Einflussfaktoren auf die menschliche Zu-

## Einflussfaktoren (PSF)



**Abb. 2:** Häufigkeiten der wichtigsten (mehr als fünf Nennungen) im Projekt SMSmod identifizierten PSF nach [29]. Durch (p) sind positiv wirkende Einflüsse gekennzeichnet.

verlässigkeit darstellen, bestätigt ein Blick auf die Ergebnisse des Projektes „System Mensch-Sicherheit modellieren“ (SMSmod), das von der DFG gefördert und gemeinsam von der Universität Kassel, dem DLR und der TU Braunschweig durchgeführt wurde. Dort wurden knapp 150 kritische Ereignisse aus dem Zeitraum 2001 bis 2010, die mit menschlichen Fehlern von Triebfahrzeugführer und/oder Fahrdienstleiter zusammenhängen, u. a. auf die wirkenden Einflussfaktoren untersucht [29]. Nahezu alle bei Wilson genannten Faktoren (bis auf Schichtplanung, Alkoholeinfluss, die Gestaltung von Alarmen und die Führerstandumgebung) fanden sich unter den mindestens fünfmal in Ereignissen vorhandenen Faktoren wieder (teils unter anderem Namen, Abb. 2). Weitere Faktoren mit hoher Bedeutung, die in SMSmod detektiert wurden, waren der Komplex Streckenbeobachtung und Sichtverhältnisse sowie (betriebliche) Unregelmäßigkeiten und Ablenkung. Möchte man den Kreis der wichtigsten Faktoren noch größer ziehen, so findet sich bei Kyriakidis [34] eine detaillierte Aufstellung von in der Literatur oder im Bahnsektor als relevant gefundenen Faktoren. Insbesondere sind demnach weitere persönliche (Gesundheitszustand, Motivation), aufgabenbezogene (Monotonie, Zeitdruck) und organisatorische Faktoren (Gestaltung des Trainings, Überwachung, Führungskultur, Beziehung zur Organisation) relevant. Außerdem bestätigt sich, dass zwischen nahezu allen einzelnen Faktoren Abhängigkeiten bestehen.

## 6 Fazit und Ausblick

Die menschlichen Zuverlässigkeit im Bahnwesen bettet sich neben der Eisenbahnsicherheit in das Themengebiet der „Rail Human Factors“ ein, dessen Erforschung in den vergangenen 15 Jahren deutlich an Umfang gewonnen hat. Die Wichtigkeit

des Themas ergibt sich dabei vor allem aus größeren Änderungen der Strukturen und Arbeitsplätze im Eisenbahnwesen über Jahrzehnte, deren Auswirkungen auf den Menschen nicht ausreichend reflektiert wurden und schließlich vermehrt zu Unfällen führten.

Die Erforschung der menschlichen Zuverlässigkeit ist dabei eine komplexe Aufgabe. Dies wird an der Vielzahl Einflussfaktoren deutlich, von denen die wichtigsten in diesem Artikel dargestellt wurden. Nicht zuletzt liegt die Ursache für die Vielfalt der Faktoren in den ganz unterschiedlichen Arbeitsplätzen und Aufgaben, die der Bahnbereich bietet. Für die Bewertung der Zuverlässigkeit sind in der Praxis oft veraltete, wenig differenzierende Methoden im Einsatz; ein Überblick über aktuelle Methodenentwicklungen für den Bahnbereich wurde gegeben.

Neuere Forschung und Theorien, die den Bereich menschlicher Zuverlässigkeit weiter voranbringen, existieren durchaus: die Systemtheorie liefert speziell seit Perrows [2] Klassifizierung der Beherrschbarkeit moderner Systeme anhand ihrer Komplexität und ihrem Kopplungsgrad neue Denkmodelle wie Levesons „System-Theoretic Accident Model and Processes“ (STAMP, [35]) oder das „Resilience Engineering“ [36], das maßgeblich von Hollnagel geprägt wurde. Was speziell die menschlichen Aspekte der Sicherheit angeht, werden Themen wie Verhaltensvariabilität und lokales Wissen thematisiert. Erste Methoden, die diese neuen Denkmodelle umsetzen, wie die „System-Theoretic Process Analysis“ (STPA, Gefährdungsidentifikation), „Causal Analysis using System Theory“ (CAST, Unfallanalyse) oder „Functional Resonance Analysis Method“ (FRAM, Analyse von Verhaltensvariabilität in komplexen soziotechnischen Systemen), liegen vor. Im Bahnsektor scheinen diese Methoden jedoch kaum verbreitet und genutzt zu sein.

Die aktuelle Situation in Europa ist gekennzeichnet durch ein starkes Gefälle in der Erforschung der Rail Human Factors und der Umsetzung der Erkenntnisse in den einzelnen Ländern. Diese deutet ebenso wie erste Aktivitäten der ERA auf dem Gebiet darauf hin, dass das Thema im Rahmen der europäischen Harmonisierung weiter gestärkt wird. Speziell zur Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit bedarf es noch einiger Anstrengungen, bevor eine Methode vorliegt, die valide, praktisch anwendbar und durch die europäischen Sicherheitsbehörden anerkannt ist.

Ein weiterer Schritt ist, Human Factors erfolgreich, konsistent und nachhaltig in das Bahnsystem zu integrieren. Dazu ist an vielen Stellen Überzeugungsarbeit zu leisten, dass der Mensch bei Bahnentwicklungen wichtiger genommen werden muss als bisher. Ziel ist, durch eine erfolgreiche Integration in Organisationskultur, Planung, betriebliche Abläufe und die ergonomische Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen die menschlichen Fähigkeiten optimal zu nutzen, die Arbeitsbelastung auszubalancieren und die menschliche Zuverlässigkeit zu unterstützen und zu verbessern.

\*RailSET ist eine eingetragene Marke.

## Quellen

- [1] Bainbridge, L.: Ironies of Automation – Increasing levels of automation can increase, rather than decrease, the problems of supporting the human operator. *Automatica*, 19, Seite 775–779, 1983
- [2] Perrow, C.: *Normal Accidents – Living with High-Risk Technologies*, Princeton University Press, 1999
- [3] Feldmann, F.; Hammerl, M.; Schwartz, S.: Questioning Human Error Probabilities in Railway, in: *The 3rd IET International Conference on System Safety*, 20–22 October 2008, NEC, Birmingham, UK
- [4] Hammerl, M.; Feldmann, F.; Schwartz, S.: Integration menschlicher Zuverlässigkeit in Sicherheitsbetrachtungen, in: *EIK 2010*, Seite 167–176
- [5] Heinrich, H. W.: *Industrial Accident Prevention, A Scientific Approach*, 1931
- [6] *Schienenfahrzeuge – Führerräume – Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Teil 2: Zusatzanforderungen an Eisenbahnfahrzeuge*, DIN 5566:2006
- [7] *Schnittstelle Triebfahrzeugführer-Maschine für elektro- und Dieseltriebwagen (EMU/DMU) – Lokomotiven und Steuerwagen – Funktions- und Systemanforderungen für eine harmonisierte Schnittstelle Triebfahrzeugführer-Maschine*, UIC-Merkblatt 612-0, deutsche Übersetzung 2011
- [8] Hollnagel, E.: *Safety Culture, Safety Management, and Resilience Engineering*, Präsentation bei Association of Air Transport Engineering&Research, 2009, verfügbar unter [http://www.atec.or.jp/Forum\\_09\\_Hollnagel.pdf](http://www.atec.or.jp/Forum_09_Hollnagel.pdf)
- [9] Human Factors Library des Rail Safety and Standards Board, <http://www.rssbhumanfactorslibrary.co.uk>
- [10] Strohm, O.; Ulich, E. (Hrsg.): *Unternehmen arbeitspsychologisch bewerten. Ein Mehr-Ebenen-Ansatz unter besonderer Berücksichtigung von Mensch, Technik, Organisation*, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1997
- [11] *Bahnanwendungen – Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit (RAMS)*, Deutsche Fassung EN 50126:1999
- [12] *Durchführungsverordnung (EU) Nr. 402/2013 der Kommission vom 30. April 2013 über die gemeinsame Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 352/2009*
- [13] Kecklund, L.; Mowitz, A. O.; Antova, M.: *Current practices of the assessment and acceptance of risks related to human interactions within the European railways*, in: N. Dadashi, A. Scott, J. R. Wilson and A. Mills (Hrsg.): *Rail Human Factors: Supporting reliability, safety and cost reduction*, CRC Press, 2013, Seite 508–516
- [14] Dadashi, N.; Scott, A.; Wilson, J. R.; Mills, A. (Hrsg.): *Rail Human Factors: Supporting reliability, safety and cost reduction*, CRC Press, 2013
- [15] *Bahnanwendungen - Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme – Sicherheitsrelevante elektronische Systeme für Signaltechnik*; Deutsche Fassung EN 50129:2003
- [16] Hollnagel, E.: *Risk + Barriers = Safety?* *Safety Science*, Band 46, Issue 2, Elsevier, 2008, Seite 221–229
- [17] Hinzen, A.: *Der Einfluss des menschlichen Fehlers auf die Sicherheit der Eisenbahn*, Dissertation, RWTH Aachen, 1993
- [18] *Elektrische Bahn-Signalanlagen – Teil 103: Ermittlung von Sicherheitsanforderungen an technische Funktionen in der Eisenbahnsignaltechnik*, Vornorm DIN VDE V 0831-103:2013
- [19] Sträter, O.: *Cognition and Safety*. Ashgate, 2005

- [20] Sträter, O.; Arenius, M.; Athanassiou, G: Zuverlässigkeitsbetrachtungen im Bahnbetrieb, *Deine Bahn* 11/2011, Seite 22 – 27
- [21] Bell, J; Holroyd, J: Review of human reliability assessment methods, Research Report 679 for the Health and Safety Executive (HSE), 2009
- [22] HUSARE Projektkonsortium (Hrsg.): HUSARE Project (Human Safe Rail in Europe) – Final Report for Publication, erhältlich unter <http://www.transport-research.info/Upload/Documents/200310/husare.pdf>, Version vom 2000-02-28
- [23] Gilroy, J; Grimes, E.: The development and application of a rail human reliability assessment tool, in: Wilson et al.: *People and rail systems – Human factors at the heart of the railway*, Ashgate, 2007, Seite 455 – 464
- [24] Kim, D.S.; Baek, D.H.; Yoon, W.C.: Development and evaluation of a Computer-Aided System for Analyzing Human Error in Railway Operations, *Reliability Engineering & System Safety* 95 (2010) 2, Seite 87 – 98
- [25] Caponecchia, C.; Baysari, M.; McIntosh, A.: Development, use and usability of TRACER-RAV (Technique for retrospective analysis of cognitive errors for rail, Australian Version), in: Wilson, Mills, Clarke, Rajan, Dadashi (Hrsg.): *Rail Human Factors Around the World: Impacts on and of people for successful Rail Operations*, 2012, Seite 85 – 93
- [26] Hammerl, M.: *Analyse der menschlichen Einflussfaktoren und Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr*, Dissertation, TU Braunschweig, 2011
- [27] Gibson, H.: *Railway Action Reliability Assessment user manual – A technique for the quantification of human error in the rail industry*, RSSB, 2012
- [28] Kyriakidis, M.; Majumdar, A.; Grote, G.; Washington, Y.O.: The development and assessment of a performance shaping factors taxonomy for railway operations, *Proceedings of the Transportation Research Board 91st Annual Meeting*, Washington D.C., 2012
- [29] Lindner, T.; Milius, B.; Arenius, M.; Schwencke, D.; Grippenkoven, J.; Sträter, O.: *Betrachtungen zur Zuverlässigkeit des Triebfahrzeugführers – Erfassung sicherheitsbeeinflussender Faktoren und ihrer Bedeutung auf Basis von Ereignisdaten*, *EI – Der Eisenbahningenieur* 01/2014, Seite 10 – 16
- [30] *Menschliche Zuverlässigkeit – Teil 1: Ergonomische Forderungen und Methoden der Bewertung*, VDI 4006-1:2002, Beuth-Verlag
- [31] *Rail-Specific HRA Tool for Driving Tasks*, Rail Safety and Standards Board, T270 Phase 1 Report, 2005
- [32] Schwencke, D.; Lindner, T.; Milius, B.; Arenius, M.; Sträter, O.; Lemmer, K.: *A New Method for Human Reliability Assessment in Railway Transport*, in: *Proc. PSAM11 und ESREL 2012*, Band 8, Curran Associates Inc., 2012, Seite 6139 – 6147
- [33] Wilson, J. R.; Norris, B. J.: *Human Factors in Support of a Successful Railways: a Review*, *Cognition, Technology and Work*, Band 8, Springer, 2006, Seite 4 – 14
- [34] Kyriakidis, M.; Majumdar, A.; Ochieng, W. Y.: *A Human Performance Railway Operational Index to estimate operator's error probability*, *Proceedings of the Applied Human Factors and Ergonomics International 2012 Conference*, San Francisco, 2012, Seite 85 – 95
- [35] Leveson, N.: *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety*, The MIT Press, 2012
- [36] Hollnagel, E.; Woods, D. D.; Leveson, N.: *Resilience Engineering – Concepts and Precepts*, Ashgate, 2006

