

A.2 Systemkonzept und Modellierung beruflicher Handlungen im FeDiNAR-AR-Lernsystem

Marvin Goppold¹, Sven Tackenberg², Alexander Atanasyan³, Torben Cichon³, Dennis Kobelt², Thilo Gamber², Jürgen Roßmann³, Martin Frenz¹

¹ *RWTH Aachen University, Institut für Arbeitswissenschaft*

² *Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Labor für Industrial Engineering*

³ *RWTH Aachen University, Institut für Mensch-Maschine-Interaktion*

1 Einleitung

Bei Betrachtung des gegenwärtigen Stands der Ausbildung in gewerblich-technischen Berufen zeigt sich, dass es viele gute Ansätze zur Integration moderner Technologien gibt, um den Lernprozess zu unterstützen oder zu vereinfachen (z. B. Fehling, 2017; Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2019). Die meisten technischen Ansätze eint, dass sie die Darstellung von Funktions- und Wirkzusammenhängen von technischen Systemen in Ausbildungs- und Lernsituationen unterstützen. Es reicht für die zukünftige Beruflichkeit vor dem Hintergrund verschiedener Szenarien (vgl. Frenz, Heinen & Schlick, 2015) jedoch nicht aus, lediglich Technologien abzubilden. Stattdessen müssen Fachkräfte bei der Problemlösung im realen Arbeitsprozess gefördert werden (vgl. z. B. Abele, 2014; Rauner, 2017). Im Gegensatz zu reinen Funktions- und Wirkzusammenhängen liegen hier multiple technische Systemzustände vor. Das FeDiNAR-Verbundprojekt möchte hierfür ein AR-gestütztes Lehr-Lernkonzept entwickeln, das sich auf die Ausführung von beruflichen Tätigkeiten bezieht und lernortübergreifend genutzt werden kann.

Dieses Ziel steht im Einklang mit der Förderung von Handlungskompetenz (vgl. Kultusministerkonferenz, 2018). Diese ermöglicht es zukünftigen Fachkräften, in komplexen beruflichen Situationen eigenständig Problemlösungen zu erarbeiten. Fachkräfte besitzen mit Abschluss der dualen Ausbildung eine Tiefenstruktur für berufliche Arbeitsprozesse und Problemsituationen, welche sie handlungsfähig macht. Sie verfügen über mehr als nur Fachwissen und gestalten daher ihre Arbeitsprozesse in hohem Maße eigenverantwortlich, um berufliche Anforderungen zu bewältigen (vgl. Kultusministerkonferenz, 2018).

Die Gestaltung eines konkreten Arbeitsprozesses hängt von vielen Faktoren und Randbedingungen ab, sodass es bei Entscheidungsproblemen keine eindeutige, offensichtlich richtige Lösung gibt (vgl. Heidegger & Rauner, 1990; Rauner, 2017). Für Fachkräfte ist deshalb die Auseinandersetzung mit Fehlentscheidungen sowie zuvor entstandenen Analyse- und Planungsfehlern oder darauf aufbauend

Ausführungsfehlern zentral (vgl. z. B. Weingardt, 2004). Zurzeit fehlen entsprechende lernwirksame Konzepte für Lernende und Lehrende in der industriellen und handwerklichen beruflichen Bildung der elektro- und metalltechnischen Berufe. Lehrende verhindern Fehler aktuell, um mögliche negative Folgen hinsichtlich Sicherheit, Wirtschaftlichkeit oder Umweltschutz nicht zu verantworten (vgl. Cannon & Edmonson, 2005; Janis & Mann, 1977). In arbeitsintegrierten Lernprozessen sollen Fehler möglich sein und lernwirksam genutzt werden, um die Konsequenzen für das Arbeitssystem und den Menschen, z. B. in Gefahrensituationen (bspw. durch AR-Visualisierungen) aufzuzeigen. Genau hier setzt das FeDiNAR-Forschungsvorhaben an, vgl. Abbildung 1.

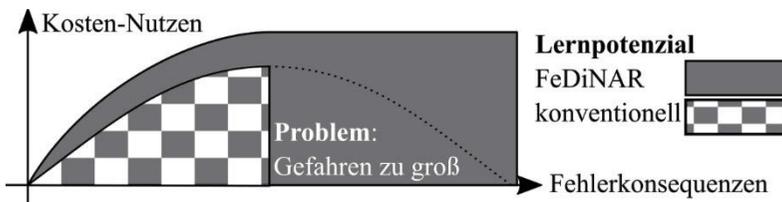


Abbildung 1: Lernansatz aus Fehlern im Projekt FeDiNAR (eigene Abbildung nach Seifried & Baumgartner, 2009)

Die Technologie von AR-Systemen ist bereits hoch entwickelt und wird in wenigen Jahren als Stand der Technik in Industrie und Handwerk erwartet (Gartner, 2017). Dies eröffnet die Chance, umfassende didaktische Konzepte zu erstellen, welche AR-Systeme lernwirksam als eine direkte Form der Rückmeldung eines Fehlers (vgl. Rausch, 2012) in der beruflichen Aus- und Weiterbildung einsetzen.

Forschungsfrage

Das Ziel ist die Entwicklung und Evaluation eines AR-gestützten Lernsystems mit zugehörigen Lernszenarien für industrielle und handwerkliche Berufe, um von einem Lernenden „gemachte“ Fehler möglichst wirksam und nachhaltig für den individuellen Kompetenzerwerb zu nutzen. Die Beschreibung der technischen Umsetzung anhand eines Demonstrators als ersten Umsetzungsschritt ist Gegenstand dieses Beitrags.

2 Fehlerdefinition

In einem Workshop haben Experten aus der arbeitswissenschaftlichen Forschung, Mensch-Maschine-Interaktion sowie betriebliche Anwendungspartner und Berufsbildungsexperten aus handwerklichen Ausbildungsberufen eine gemeinsame projektbezogene Fehlerdefinition erarbeitet. Im Fokus stehen die Fehler des Menschen, die aus einer Technikinteraktion resultieren. Das bedeutet, dass nur Fehlerquellen

betrachtet werden, welche durch eine menschliche Handlung im Arbeitsprozess hervorgerufen werden. Dies führt zu einem deterministischen Ansatz, welcher allen am Arbeitsprozess beteiligten technischen Artefakten keine stochastischen Anteile unterstellt. Eine Betrachtung der Zuverlässigkeit entsprechend z. B. Dhillon & Misra (1984) wird deshalb nicht vorgenommen.

Ein menschlicher Fehler wird nach Senders & Moray (1991) als eine Handlung aufgefasst, welche impliziten oder expliziten Standards nicht gerecht wird. Entsprechend des deterministischen Ansatzes tritt ein Fehler auf, wenn das durch die Handlung angestrebte und verfolgte Ziel nicht erreicht wird und das Nicht-Erreichen des Ziels nicht auf einen Zufall zurückzuführen ist. Aus diesem Grund werden Faults (ISO/IEC 24765:2010) und Failure (ISO/IEC 25000:2005) auf Grund ihrer stochastischen Elemente aus der Betrachtung ausgeschlossen. Die deterministische Sichtweise entspricht in der IEEE Standard Classification for Software Anomalies dem Error (IEEE STD 1044-2009) oder Mistake (vgl. ISO/IEC 24765:2017).

Die geforderten Standards für Handlungen müssen definiert werden, sodass ein Abgleich entsprechend den typischen Definitionen zur Fehlerbestimmung erfolgen kann (vgl. DIN 66271, 1995; EN ISO 9000 (DIN, 2005); DIN 55350 Teil 31, 1985). Diese sehen in Fehlern das Nichterfüllen von definierten Anforderungen. Für das Festlegen von Standards werden Verfahren entwickelt, welche die Einhaltung der Standards in diskretisierter Form feststellen können, um eine Verarbeitung durch das FeDiNAR-System zu gewährleisten. Hierbei ist zu beachten, dass die Standards selbst einen gestuften Lösungsraum beinhalten müssen, damit sie die kontinuierliche Situation eines Arbeitsprozesses trotzdem abbilden können (vgl. Senders & Morray, 1991).

Diese Fehlerdefinition entspricht innerhalb der frühen pädagogischen Fehlerforschung nach Weimer (1929) der zweiten Kategorie von Fehlern, die eindeutig einer Handlung zugeordnet werden kann. Im Gegensatz zu dieser historischen Sichtweise (vgl. Weimer, 1940), gehen die in dieser Untersuchung Beteiligten jedoch davon aus, dass ein Irrtum auch trotz vorhandenen Wissens, Fertigkeiten, Motivation und hoher Aufmerksamkeit immer gegeben sein kann. Als Fundierung dieser These lassen sich Grundlagenergebnisse von z. B. Schwarz (1927) oder Reason (1984) anführen.

3 Didaktischer Ansatz

Ausgehend von der empirisch belegten Effektivität von Fehlern im Lernprozess überzeugt ist (vgl. z. B. Bauer & Harteis, 2012; Kapur, 2015), wird im Verbundprojekt FeDiNAR nicht versucht, Fehler zu vermeiden. Ziel ist es wiederum auch nicht, dass Fehler zwangsläufig gemacht werden. Aus einer positiven Grundhaltung gegenüber Fehlern (vgl. Tulis, Steuer & Dresel, 2017) soll durch die Gestaltung

der Rahmenbedingungen des Arbeitsprozesses eine Erhöhung der Fehlerhäufigkeit bestimmter Fehler erreicht werden, wenn dies für den Lernprozess im korrespondierenden Arbeitsprozess als sinnvoll erachtet wird. Eine Lerntheorie (z. B. Oser & Spychiger, 2005) wird im Rahmen des didaktischen Konzepts erarbeitet oder ausgewählt.

Entsprechend des Modells der vollständigen Handlung (vgl. Hacker, 1978; Bader, 2000) sind die einzelnen Phasen im Kontext der Entwicklung und Anwendung des FeDiNAR-Systems diskutiert worden. Dabei hat sich gezeigt, dass ein technisches System nur in der Lage ist, durch Beobachtung Zustandsänderungen zu erfassen. Für alle weiteren Analysen sind zusätzliche Informationen erforderlich, welche z. B. durch Befragung zu erheben sind. Aus diesem Grund werden vorerst reine Ausführungsfehler betrachtet, die durch das technische System erfasst und verarbeitet werden können.

Methodisch ergeben sich nach Mehl (1993) aus einer solchen Betrachtung mit Schwerpunkt Handlung Probleme hinsichtlich der Interpretation der Fehlerursache, da diese alleinig auf den beobachteten Zustandsänderungen im Arbeitsprozess basiert. Aus diesem Grund kann für einen effektiven und effizienten Lernprozess eine fehlerhafte Handlung alleine nicht ausreichen, um das Lernen aus Fehlern zu unterstützen. Es ist daher eine Vorgehensweise für das Lernen aus Fehlern im Arbeitsprozess zu entwickeln, wie es beispielsweise die Artikulation von Kapur (z. B. 2015, 2016) vorsieht. Besonders hilfreich ist unabhängig vom Vorliegen von Fehlern die Reflexion, welche ein wichtiger Bestandteil der vollständigen Handlung ist (vgl. Ellis & Davidi, 2005). Hierfür ist qualifiziertes Ausbildungspersonal notwendig, um den Reflexionsprozess der Lernenden zu unterstützen.

Das didaktische Konzept entsteht auf Basis einer allgemeingültigen Fehlermodellierung (z. B. Reason, 1990). Hierbei wird auf eine begründete Auswahl der Lern- und Arbeitsaufgaben in Verbindung mit Fehlermöglichkeiten aus den objektiven Arbeitsprozessvoraussetzungen geachtet. In der Umsetzung hilft hierfür die Analyse des Begründungszusammenhangs (Klafki, 1997). Entsprechend der vollständigen Handlung wird eine theoriegestützte Aufarbeitung der Fehlereinordnung integriert, um die Kausalkette zu ergründen, welche zur beobachteten fehlerhaften Ausführung geführt hat.

4 Arbeitssystem des Demonstrators

Zur einfacheren Verständlichkeit und Kommunikation bei der interdisziplinären Bearbeitung des Forschungsprojekts wird ein systemtheoretischer Ansatz gewählt. Aus der technischen Systemtheorie kommend (vgl. Ropohl, 2009; Wiener, 2007) ist der Demonstrator in einem Arbeitssystem zu verorten (Schlick, 2018), das als soziotechnisches System aufgefasst und beschrieben wird, s. Abbildung 2. Dieser technozentrische Ansatz besitzt auch in der dualen Ausbildung Anschluss an die didaktischen und erziehungswissenschaftlichen Fragestellungen (vgl. Bader, 1991).

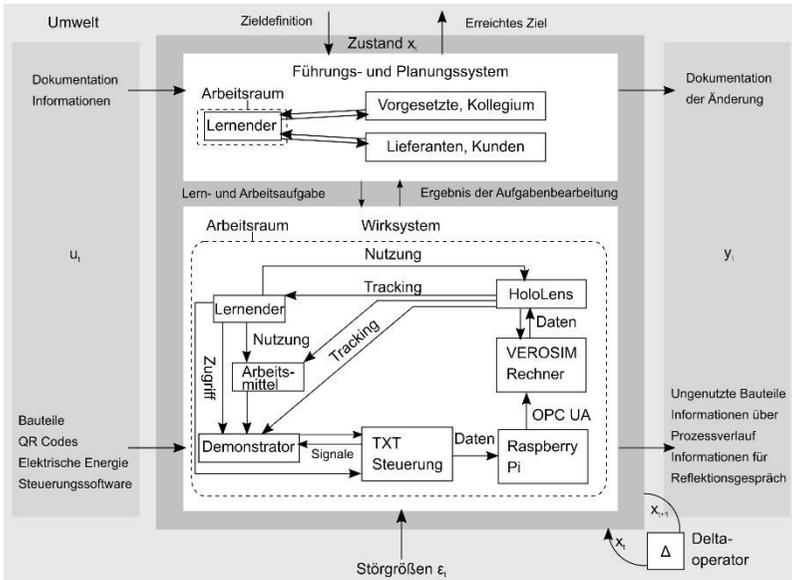


Abbildung 2: Arbeitssystem des Demonstrators (eigene Abbildung)

Die Systemkonzeption integriert bestehende AR- und Simulationen zu einem neuartigen Lernsystem. Lernende stehen hierbei an der realen Maschine und können mit dieser direkt interagieren. Ein Teil der Handlungen (und deren Auswirkungen) erfolgt allerdings ausschließlich in der augmentierten Welt, sodass z. B. ein Stromunfall durch ein vergessenes Trennen der Stromquelle nur virtuell dargestellt wird. Zum Abschluss des Lernprozesses erfolgt die Reflexion durch Lernende und Lehrende. Hier wird die gesamte Handlung basierend auf einer aufgezeichneten Sequenz der Interaktionen und ihren simulierten Auswirkungen kooperativ nachvollzogen, um potentielle Fehler lernwirksam zu nutzen.

Um die Zustandsänderungen des Arbeitssystems zu definieren und zu beschreiben, werden gewerblich-technische Arbeitsprozesse mit arbeitswissenschaftlichen Methoden erhoben und im Anschluss modelliert. Die Modellierung erfolgt mit der Modellierungssprache eEPK (Keller, Nüttgens & Scheer, 1992; z.B. Staud, 2006). Diese beschreibt den beruflichen Handlungsablauf prozessorientiert und bietet eine gute Kompatibilität mit Petri-Netzen (vgl. Langner, Schneider & Wehler, 1997).

5 Prototypische Umsetzung des Konzepts (Demonstrator)

Die formale Beschreibung der Zustände der Dynamik im Wirksystem erfolgt mit zeiterweiterten Petri-Netzen entsprechend der Dissertation „Kommunikation mit Automaten“ von Petri (1962). Petri-Netze bieten eine präzise, visuelle Modellierungssprache mit einer mathematischen Fundierung zur Beschreibung von a priori bekannten Zuständen eines Systems. Sie besitzen eine formale Syntax und Semantik, aus denen sich eine graphische Repräsentation sowie eine formale Beschreibung der zeitlich veränderlichen Zustände eines Systems ableiten lassen. Somit sind Petri-Netze geeignet, sequentielle, sich gegenseitig ausschließende aber auch nebenläufige Zustände zu beschreiben, die auf definierten Ereignissen basieren. Petri-Netze sind gerichtete Graphen, die abwechselnd aus der Beschreibung von zulässigen Zuständen (abgebildet durch Stellen) und Ereignissen (abgebildet durch Transitionen) bestehen. Letztere ergeben bei Erfüllen der erforderlichen Rahmenbedingungen für ein konkretes Ereignis einen Zustandswechsel des Systems, sodass hieraus das zu beschreibende dynamische Verhalten resultiert. Der Systemzustand zum spezifischen Zeitpunkt ist durch Zuordnung von Token (Marken) zu den Stellen des Petri-Netzes gegeben. Erfolgt ein Ereignis, so wird durch eine diskrete Erzeugung und Vernichtung von Token entsprechend des a priori definierten Systemverhaltens – abgebildet durch die Schaltregeln der Transitionen – der zeitlich nachfolgende Zustand abgebildet. Für eine weiterführende formale Einführung in die Petri-Netz Theorie wird auf Reisig (2010) verwiesen.

Entsprechend des oben eingeführten Fehlerverständnisses ist die Gesamtheit der möglichen Zustände des Lernsystems bekannt, die sich aus den potentiellen Handlungen des Lernenden ergeben können. Daher müssen diese Handlungsausführungen durch das FeDiNAR-System detektierbar sein, um eine chronologische Reihenfolge von Ereignissen und Systemzuständen abzuleiten. Wird das durch die Handlung angestrebte und zudem bekannte Ziel – repräsentiert durch einen konkreten Systemzustand des Petri-Netzes – nicht erreicht, so wird dem System entsprechend der vorliegenden Handlungsausprägung ein anderer a priori bekannter Zustand zugewiesen. Dieser aus der Handlung resultierende Zustand repräsentiert nach Senders und Moray (1991) den Fehler. Ein solcher, nicht angestrebter Zustand kann Lernenden bekannt oder unbekannt sein.

Durch das vorliegende Verständnis ist die Gesamtheit der a priori bekannten, fehlerfreien und fehlerbehafteten Handlungsergebnisse durch das Petri-Netz abzubilden. Der Eintritt eines konkreten Ergebnisses – definierter Zustand des Petri-Netzes – wird durch die Schaltregeln des Netzes sowie aus den Daten der „realen Welt“ berechnet. Letzteres sind Daten, die mittels der Sensorik einer AR-Brille (Microsoft HoloLens) erfasst werden oder durch Sensoren der jeweiligen Arbeits-/Betriebsmittel bzw. des Arbeitsobjektes vorliegen.

Als Demonstrator für die Konzeptentwicklung und Validierung ist der „Fischertechnik Computing Robo TXT“ ausgewählt worden. Dieser weist eine hohe Analogie zu den Komponenten und Funktionen eines Betriebsmittels in Unternehmen auf und verfügt über freie Schnittstellen, s. Abbildung 3.

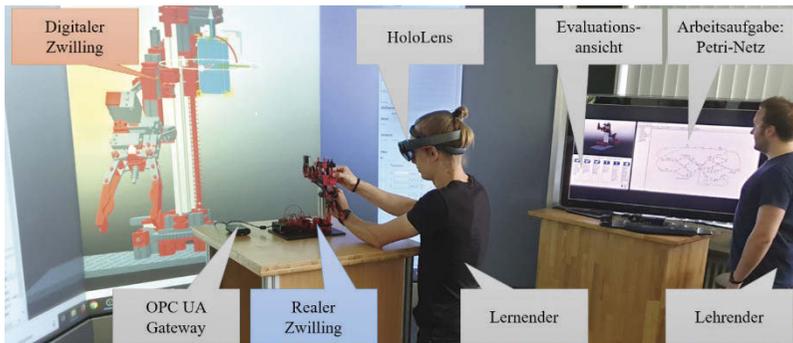


Abbildung 3: Lernsystem am Demonstrator (eigene Abbildung)

Lernende interagieren mit dem realen Demonstrator, welcher unmittelbar mit dem zugehörigen Digitalen Zwilling verbunden ist. Der aktuelle Zustand ist der Initialzustand für Simulationen am Digitalen Zwilling (vgl. Cichon & Rossmann, 2017). Simulationen lassen sich direkt in AR am realen System visualisieren. Lehrende können über ein eigenes Interface den Fortschritt des Lernenden verfolgen, den Abschluss einzelner Lernschritte bestätigen, Lernende direkt unterstützen oder nach Abschluss der Lernerfahrung zusammen mit ihm die Reflexionsphase durchführen.

Im Rahmen eines ersten Use Cases soll u. a. der Motor Nr. 1 durch Lernende gewechselt werden. Bei der Ausführung können verschiedene Fehlerarten entstehen, die durch das Petri-Netz entsprechend abzubilden sind. Beispielsweise sind Auslassungsfehler, wie das fehlende Herstellen der Spannungsfreiheit oder das Auslassen des Lösens der Motoverkabelung, durch den Lernenden möglich.

Das initiale Petri-Netz für diesen exemplarisch ausgewählten Ausschnitt einer Handlung mit der Gesamtheit an zulässigen Zuständen zeigt Abbildung 4. Durch den Token in Hilfsstelle 1 (initialer Zustand) erfolgt ein Aktivieren und Schalten der Transitionen t_1 und t_3 und jeweils ein Token wird in den Stellen p_1 und p_2 platziert, was die aktuell durchgeführte Handlung des Lernenden repräsentiert. Das FeDiNAR-System erfasst mittels Sensoren den Abschluss einer Handlung und den Systemzustand (*Anlage spannungsfrei*: {ja, nein}). Entsprechend des realen Zustands des Roboters, erfolgt bei Abschluss der Handlung und eines Auslassungsfehlers das Platzieren von jeweils einem Token in den Stellen h_1 und z_1 . Bei einer fehlerfreien Ausführung kommt es zu einer Platzierung in den Stellen h_2 und z_2 , was die Transition t_2 oder t_4 aktiviert und zu ihrem unmittelbaren Schalten führt. Dies bedingt das Platzieren eines Tokens in Hilfsstelle 2, was dem Abschluss der Handlung entspricht. Ferner wird durch den Schaltvorgang der Transition ein Attribut bzgl. des Handlungsergebnisses (Aktivität „Spannung freischalten“ | Auslassungsfehler {ja, nein}) zum Token hinzugefügt. Dieser bildet dann auch den Start-Trigger für die nachfolgende Aktivität „Verkabelung lösen“, die ebenfalls einen Auslassungsfehler aufweisen kann.

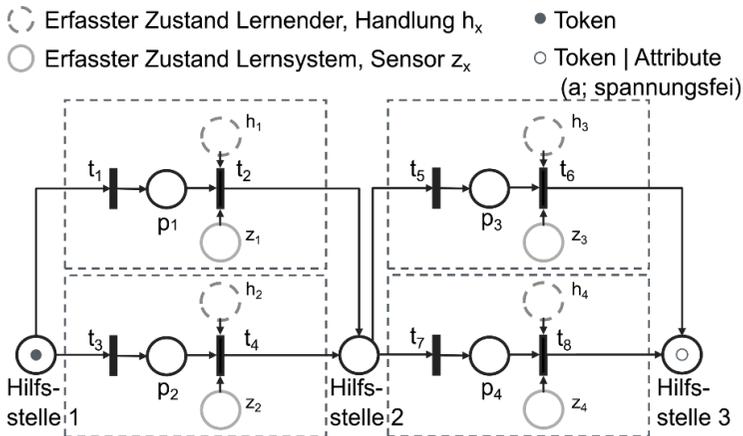


Abbildung 4: Ausschnitt Petri-Netz (eigene Abbildung)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag zeigt die technische Systemkonzeption eines AR-Lernsystems vor dem Hintergrund der didaktischen Fragestellung des Lernens aus Fehlern in der beruflichen Bildung. Der Ansatz ist für eine interdisziplinäre Bearbeitung ausgelegt. Darüber hinaus wird eine ereignisorientierte Modellierung beruflicher Handlungen in Form von Petri-Netzen eingeführt, welche die konzeptionelle Grundlage des Lernsystems bilden.

Die weitere technische Umsetzung nutzt das 3D-Simulationssystem VEROSIM (Rossmann et al., 2013). Der Demonstrator wird mittels OPC UA-Schnittstelle (vgl. Lange, Iwanitz & Burke, 2010) und der Lernende mit Hilfe der optischen Sensoren der AR-Brille mit den Digitalen Zwillingen im Virtuellen Testbed verbunden (Schluse et al., 2018). Das Verhalten des Demonstrators kann mit Hilfe von AR-Technologie in das Sichtfeld der Nutzenden projiziert werden, um gefährliche Fehlerfolgen entsprechend des didaktischen Ansatzes zu veranschaulichen.

Danksagung

Der Beitrag entstammt dem Projekt „FeDiNAR – Fehler didaktisch nutzbar machen mit AR“. Es wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Fachprogramms „Digitale Medien in der beruflichen Bildung“ gefördert und vom DLR Projektträger unter den FKZ 01PV18005A und 01PV18005C betreut.

Literaturangaben

- Abele, S. (2014). Modellierung und Entwicklung berufsfachlicher Kompetenz in der gewerblich-technischen Ausbildung. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Bader, R. (1991). Entwicklung beruflicher Handlungskompetenz durch Verstehen. Ein Beitrag zum systemtheoretischen Ansatz in der Technikdidaktik. Die berufsbildende Schule, 43(7–8), 441–458.
- Bader, R. & Sloane, P. F. E. (Hrsg.). (2000). Lernen in Lernfeldern. Theoretische Analysen und Gestaltungsansätze zum Lernfeldkonzept ; [Beiträge aus den Modellversuchsverbänden NELE & SELUBA ; Fachtagung vom 25.–26. November 1999 in Magdeburg]. Markt Schwaben: Eusl-Verl.-Ges.
- Bauer, J. & Harteis, C. (Eds.). (2012). Human Fallibility. The Ambiguity of Errors for Work and Learning (Professional and Practice-based Learning, vol. 6). Dordrecht: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3941-5>
- Baumgartner, A. & Seifried, J. (2009). Lernen aus Fehlern in der betrieblichen Ausbildung – Problemfeld und möglicher Forschungszugang. bwp@Berufs- und Wirtschaftspädagogik – online, (17), 1–20.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.). (2019). eQualification. Lernen und Beruf digital verbinden. Projektband des Förderbereiches „Digitale Medien in der beruflichen Bildung“. Berlin.
- Cannon, M. D. & Edmondson, A. C. (2005). Failing to Learn and Learning to Fail (Intelligently) (Bd. 38). <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2005.04.005>
- Cichon, T. & Rossmann, J. (2017). Simulation-based User Interfaces for Digital Twins: Pre-, In-, or Post-Operational Analysis and Exploration of Virtual Testbeds. In P. J. S. Gonçalves (Ed.), Modelling and simulation 2017. The European Simulation and Modelling Conference 2017 : ESM'2017: October 25-27, 2017, Lisbon, Portugal (pp. 384–389). Ostend, Belgium: EUROSIS-ETI.

- Dhillon, S. B. & Misra, R. B. (1984). Reliability evaluation of systems with critical human error. *Microelectronix Reliability*, (24), 743–759.
- DIN 55350-31 (1985). Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe der Annahmestichprobenprüfung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- EN ISO 9000:2005 (2005). Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 66271 (1995). Softwarefehler und ihre Beurteilung durch Lieferanten und Kunden: Beuth Verlag GmbH.
- Ellis, S. & Davidi, I. (2005). After-event reviews: drawing lessons from successful and failed experience. *The Journal of Applied Psychology*, 90(5), 857–871. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.90.5.857>
- Fehling, C. D. (2017). Neue Lehr- und Lernformen in der Ausbildung 4.0. Social Augmented Learning in der Druckindustrie. In *Berufsbildung in Wissenschaft und Praxis (BWP)* (S. 30–33).
- Frenz, M., Schlick, C. M. & Heinen, S. (2015). Industrie 4.0 Anforderungen an Fachkräfte in der Produktionstechnik. *Berufsbildung in Wissenschaft und Praxis – BWP*, (6), 12–16.
- Gartner. (2017). Top Trends in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2017. Verfügbar unter <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017/>
- Hacker, W. (1978). Allgemeine Arbeits- und Ingenieurpsychologie. Psychische Struktur und Regulation von Arbeitstätigkeiten (Schriften zur Arbeitspsychologie, Bd. 20, 2., überarb. Aufl.). Bern: Huber.
- Heidegger, G. & Rauner, F. (1990). Berufe 2000. Berufliche Bildung für die industrielle Produktion der Zukunft. Mensch und Technik. Düsseldorf: Ministerium für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen.
- IEEE Computer Society (2010, January 7). IEEE STD 1044-2009. International Organization for Standardization (2005, January 8). ISO/IEC 25000:2005. International Organization for Standardization (2010, December 15). ISO/IEC/IEEE 24765-2010(E).
- International Organization for Standardization (09.2017). ISO/IEC/IEEE 24765:2017.
- Janis, I. L. & Mann, L. (1979). Decision making. A psychological analysis of conflict, choice, and commitment (1. Free Press paperback ed.). New York, NY: Free Press.
- Kapur, M. (2015). Learning from productive failure. *Learning: Research and Practice*, 1(1), 51–65. <https://doi.org/10.1080/23735082.2015.1002195>
- Kapur, M. (2016). Examining Productive Failure, Productive Success, Unproductive Failure, and Unproductive Success in Learning. *Educational Psychologist*, 51(2), 289–299. <https://doi.org/10.1080/00461520.2016.1155457>

- Keller, G., Nüttgens, M. & Scheer, A.-W. (1992). Semantische Prozeßmodellierung auf der Grundlage „Ereignisgesteuerter Prozeßketten (EPK). Veröffentlichungen des Instituts für Wirtschaftsinformatik, (89).
- Klafki, W. (1997). Die bildungstheoretische Didaktik im Rahmen kritisch-konstruktiver Erziehungswissenschaft. In H. Gudjons, W. Klafki & R. Winkel (Hrsg.), *Didaktische Theorien* (PB-Bücher, Bd. 1, 9. Aufl., S. 13–34). Hamburg: Bergmann + Helbig.
- Kultusministerkonferenz. (2018). Handreichung für die Erarbeitung von Rahmenlehrplänen der Kultusministerkonferenz für den berufsbezogenen Unterricht in der Berufsschule und ihre Abstimmung mit Ausbildungsordnungen des Bundes für anerkannte Ausbildungsberufe (Sekretariat der Kultusministerkonferenz, Hrsg.). Berlin.
- Lange, J., Iwanitz, F. & Burke, T. J. (2010). *OPC. From Data Access to Unified Architecture* (4., rev. ed.). Berlin: VDE-Verl.
- Langner, P., Schneider, C. & Wehler, J. (1997). Prozeßmodellierung mit ereignisgesteuerten Prozeßketten (EPKs) und Petri-Netzen. *Wirtschaftsinformatik*, (39), 479–489.
- Leitner, S.-H., Matthias & Mahnke, W.. *OPC UA–service-oriented architecture for industrial applications*. ABB Corporate Research Center, (48), 61–66.
- Mehl, K. (1993). Über einen funktionalen Aspekt von Handlungsfehlern – was lernt man wie aus Fehlern (Fortschritte der Psychologie, Bd. 8). Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 1993. Münster: LIT-Verl.
- Oser, F. & Spychiger, M. (2005). Lernen ist schmerzhaft. Zur Theorie des negativen Wissens und zur Praxis der Fehlerkultur (Beltz-Pädagogik). Weinheim: Beltz.
- Petri, C. A. (1962). *Kommunikation mit Automaten*. Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt.
- Rauner, F. (2017). *Methodenhandbuch. Messen und Entwickeln beruflicher Kompetenzen (COMET)*. Bielefeld: wbv.
- Rausch, A. (2012). Errors, emotions, and learning in the workplace – findings from a diary study within VET. In E. Wuttke & J. Seifried (Eds.), *Learning from errors at school and at work* (Research in vocational education, vol. 1, pp. 111–126). Opladen: Budrich.
- Reason, J. T. (1990). *Human error*. Cambridge [England]: Cambridge University Press.
- Reason, J. (1984). Little Slips and, Big Disasters. *Interdisciplinary Science Reviews*, 9(2), 179–189. <https://doi.org/10.1179/isr.1984.9.2.179>
- Reisig, W. (2010). *Petrinetze. Modellierungstechnik, Analysemethoden, Fallstudien*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9708-4>

-
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik*. 3., überarbeitete Auflage: Universitätsverlag Karlsruhe; KIT Scientific Publishing.
- Rossmann, J., Schluse, M., Schlette, C. & Waspe, R. (2013). A New Approach to 3D Simulation Technology as Enabling Technology for eROBOTICS. In 1st International Simulation Tools Conference & EXPO 2013, SIMEX'2013 .
- Schlick, C., Bruder, R. & Luczak, H. (Hrsg.). (2018). *Arbeitswissenschaft* (4. Auflage). Berlin: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56037-2>
- Schluse, M., Priggemeyer, M., Atorf, L. & Rossmann, J. (2018). Experimentable Digital Twins—Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(4), 1722–1731. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2804917>
- Schwarz, G. (1927). *Untersuchungen zur Handlungs- und Affektpsychologie* (Lewin, K., Hrsg.). Berlin: Psychologisches Institut Berlin.
- Senders, J. W. & Morray, N. (Hrsg.). (1991). *Human error. Cause, prediction, and reduction ; analysis and synthesis ; [papers presented at the Second Conference on the Nature and Source of Human Error, held 1983, at Bellagio, Italy (Series in applied psychology)*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Staud, J. L. (2006). *Geschäftsprozessanalyse. Ereignisgesteuerte Prozessketten und objektorientierte Geschäftsprozessmodellierung für Betriebswirtschaftliche Standardsoftware* (German Edition). Dordrecht: Springer.
- Tulis, M., Steuer, G. & Dresel, M. (2017). Positive beliefs about errors as an important element of adaptive individual dealing with errors during academic learning. *Educational Psychology*, 38(2), 139–158. <https://doi.org/10.1080/01443410.2017.1384536>
- Weimer, H. (1929). *Psychologie der Fehler* (Schriften zur Fehlerkunde, Bd. 1, 2., verbesserte Auflage). Leipzig: Klinghardt.
- Weimer, H. (1940). Zur Theorie und Praxis des Fehlerproblems. *Zeitschrift für Psychologie*, (149), 282–305.
- Weingardt, M. (2004). Fehler zeichnen uns aus. *Transdisziplinäre Grundlagen zur Theorie und Produktivität des Fehlers in Schule und Arbeitswelt*. Bad Heilbrunn: Julius Klinkhardt.
- Wiener, N. (2007). *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine* (2. ed., 14. print). Cambridge, Mass.: MIT Press.