

## **Petri-Netz-Architekturen zur Modellierung von menschlichen Fehlern und Fehlerkonsequenzen in Arbeitsprozessen**

Dennis KOBELT, Jan-Phillip HERRMANN, Sven TACKENBERG, Thilo GAMBER

*Labor für Industrial Engineering,  
Technische Hochschule OWL  
Campusallee 12, D-32657 Lemgo*

**Kurzfassung:** Petri-Netze ermöglichen die Abbildung von menschlichen Fehlern innerhalb von Handlungen. Handlungen bilden die Ereignisse der zugrundeliegenden Arbeitssysteme und können auch durch entsprechende digitale Zwillinge beschrieben werden. Im Beitrag werden Module eines Petri-Netzes vorgestellt, mit denen sich fehlerfreie und fehlerhafte Handlungen sowie die daraus resultierenden Fehlerkonsequenzen beschreiben lassen. Die Module sowie deren Funktionsweise werden anhand eines Beispiels erläutert und diskutiert.

**Schlüsselwörter:** Menschliche Fehler, Fehlerkonsequenzen, Modellierung, Petri-Netze

### **1. Einleitung**

Empirische Untersuchungen haben gezeigt, dass das Verursachen von Fehlern und das Erleben von Fehlerkonsequenzen eine effektive Lerngelegenheit darstellen (Bauer & Harteis 2012, Kapur 2015). Im Rahmen des Forschungsprojektes „Fehler didaktisch nutzbar machen mit AR“ (FeDiNAR) wird ein Lernsystem entwickelt, welches auf der Simulation von bestehenden Arbeitsprozessen basiert und um die Möglichkeit der Repräsentation aus menschlicher Handlung resultierender Fehlerzustände ergänzt wurde. Die Konsequenzen gemachter Fehler werden durch die Integration einer AR-Anwendung dem Anwender visualisiert. Zur Überführung von realen Arbeitsprozessen in eine AR-Anwendung wird dieser mit Hilfe der erweiterten ereignisgesteuerten Prozesskette (eEPK) dokumentiert. Da eine eEPK als statische Prozessmodellierungssprache nicht zur Überführung eines Arbeitsprozesses in die Simulationsumgebung des digitalen Zwillings ausreicht, verwendet das Lernsystem Petri-Netze zur dynamischen Abbildung der betrachteten Arbeitssysteme und als Grundlage für die AR-Modellierung (Rossmann et al. 2012). In diesem Beitrag wird daher eine Architektur von gefärbten Petri-Netzen zur Darstellung von Fehlern und Fehlerkonsequenzen innerhalb von Arbeitsprozessen vorgestellt.

### **2. Handlungsmodellierung durch Petri-Netz Architekturen**

Petri-Netze werden von mehreren Autoren zur Darstellung von Handlungsabläufen verwendet (Adam et al. 1998, Salimifard & Wright 2001, Van der Aalst 1998). Van der Aalst (1998) begründet dies durch drei zentrale Eigenschaften von Petri-Netzen: (1) Ein Petri-Netz ist eine grafische Modellierungssprache, die auf einer formalen Semantik basiert. Mit dieser lässt sich die Dynamik der Zustände verschiedener Arbeitssysteme beschreiben und analysieren. (2) Die zustandsbasierte Beschreibung

von Handlungsabläufen ermöglicht hierbei eine differenzierte Unterscheidung der Zustände einer Handlung und (3) es existieren verschiedene Techniken zur Analyse der Struktur und des Verhaltens von Petri-Netzen (Murata 1989, Jensen 1992). In Adam et al. (1998) werden einfache Petri-Netze zur Modellierung und Analyse von Abhängigkeiten innerhalb von oder zwischen Handlungsabläufen verwendet. Die Autoren unterscheiden stark-kausale, schwach-kausale und Vorrang-Abhängigkeiten zwischen Aufgaben. Eine stark-kausale Abhängigkeit wird sprachlich mit „genau dann, wenn...“, eine schwach-kausale Abhängigkeit mit „wenn, dann“ und eine Vorrang-Abhängigkeit mit „soll“ oder „muss“, ausgedrückt (Adam et al. 1998, Elmagarmid 1992, Attie et al. 1993). Zu den Erweiterungen eines Petri-Netzes zur Darstellung komplexer Handlungsabläufe gehören gefärbte, zeitbehaftete sowie hierarchische Petri-Netze (Van der Aalst 1998). Kontogiannis (2003) verwendet ein gefärbtes Petri-Netz zur Speicherung menschlicher Fehler innerhalb der Ausführung einer Arbeitsaufgabe. Ein menschlicher Fehler wird durch das Feuern einer Transition als Attribut eines globalen Referenzarrays auf das alle Stellen und Transitionen Zugriff haben, gespeichert. Es werden sechs Fehlerkonsequenzen in dem Verhalten der Transitionen abgebildet. Eine Fehlerkonsequenz ist beispielsweise die Verzögerung des Abschlusses einer Aufgabe durch eine längere Bearbeitungszeit, welche als Parameteränderung einer zeitbehafteten Transition umgesetzt wird.

### **3. Menschliche Fehler und Fehlerkonsequenzen**

Nach Rasmussen (1982) ist ein menschlicher Fehler eine Fehlanpassung zwischen Mensch und Maschine oder Mensch und Aufgabe. Die Detektierbarkeit menschlicher Fehler ist am ehesten in Situationen gegeben, in denen eine unangemessene Leistung beobachtbar ist. Reason (1990) beschreibt das Vorkommen von menschlichen Fehlern mit Hilfe eines „cognitive balance sheet“, einer Art kognitiven Bilanz, auf der sich korrekte und inkorrekte Handlungen gegenüberstehen. Algedri und Frieling (2015) verwenden im Zusammenhang mit ihrer Human-FMEA den Begriff des menschlichen Handlungsfehlers. Die Erfassung von Fehlern basiert auf der Beobachtung der Auswirkungen einer Handlung auf das angestrebte Arbeitsziel. In der Handlungsfehlerklassifikation werden dabei verschiedene Fehlertypen (Vorbereitungsfehler, Ausführungsfehler und Kontrollfehler) erläutert. Im weiteren Verlauf wird die Betrachtung auf Ausführungsfehler eingegrenzt und eine Handlung als fehlerhaft definiert, sofern eine Diskrepanz zwischen dem Menschen und seinem Arbeitsziel, also der Auswirkung einer Handlung auf ein angestrebtes Ergebnis besteht. Es werden folgende Ausführungsfehler betrachtet (Algedri & Frieling 2015): Auslassungsfehler, Hinzufügungsfehler, Positionierungsfehler, Reihenfolgefehler, Mengenfehler, Zeitfehler und Vertauschungsfehler. Mögliche Ursachen für Fehler können zum Beispiel die Aufgabe selbst, gegebene Umwelteinflüsse oder Ausprägungen des handelnden Individuums sein (Reason 1990). Darüber hinaus ist ein Informationsmangel als Ursache für das Entstehen von Fehlern denkbar. Rasmussen (1982) bewertet die Auswirkungen von Fehlern daran, wie zufriedenstellend eine Handlung ausgeführt wird und wie erfolgreich das Ergebnis einer Aktivität für eine gegebene Aufgabe ist. In der Fehlerdefinition von Hollnagel (1993) werden die Konsequenzen aus Fehlern als nicht erwartungskonforme Ergebnisse menschlicher Handlungen definiert. Nach Algedri und Frieling (2015) lässt sich die Fehlerkonsequenz als Auswirkung einer Handlung auf ein angestrebtes Arbeitsziel oder ein daraus resultierendes Produktresultat auffassen. Eine fehlerhafte Handlung führt somit nicht zum Erreichen eines

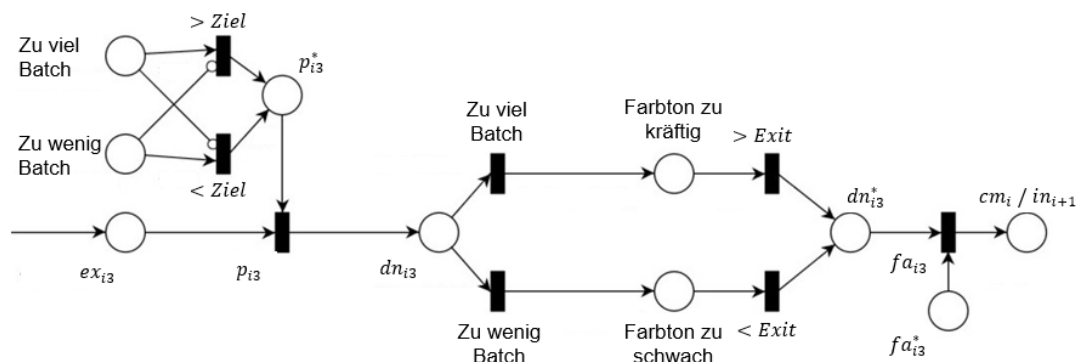
gewünschten Ziels oder einem mangelhaften Produkt. Als Konsequenz eines Fehlers wird im weiteren Verlauf der Arbeit die Nichterfüllung impliziter oder expliziter Standards betrachtet (Senders & Moray 1991). Ein solcher Standard kann beispielsweise ein gewünschtes Ziel oder eine bestimmte Erwartung sein. Als Ursachen für menschliche Fehler werden folgende Faktoren definiert: mangelnde Qualifikation des Individuums, fehlende Informationen, Ausprägungen der Umwelt oder der Aufgabe selbst.

## 4. Abbildung menschlicher Fehler durch Petri-Netz Architekturen

### 4.1 Petri-Netz-Modul zur Darstellung fehlerbehafteter Handlungen

Die Modellierung fehlerbehafteter Handlungen mit Hilfe von Petri-Netzen baut auf dem systemtheoretischen Ansatz eines Arbeitssystems auf. Das Wirksystem ist als Teilsystem des Arbeitssystems mit seinen Zuständen und Zustandstransformationen von außen beobachtbar (Schlick et al. 2018). Um fehlerbehaftete Handlungen und deren Auswirkungen beschreiben zu können, wird im Folgenden ein Petri-Netz-Modul  $DZ^{(A)}$  eingeführt, welches die Grundlage für die Entwicklung eines Digitalen Zwillings bildet. Ein solcher Digitaler Zwilling bildet physische und nicht-physische Elemente sowie die funktionalen Wirkbeziehungen des Arbeitssystems digital ab. Das Petri-Netz-Modul  $DZ^{(A)}$  modelliert die aus einer Arbeitsaufgabe folgenden Handlungen und menschlichen Fehler. In Abbildung 1 ist dieses Petri-Netz-Modul am Beispiel einer fehlerfreien Ausführung (1), eines Auslassungsfehlers (2), eines Mengenfehlers (3) und eines Handlungsabbruchs (4) mit vier Pfaden  $j$  dargestellt. Es umfasst die Zustände einer Handlung, welche mit Hilfe von Stellen modelliert werden: Initialzustand  $in_i$ , in Ausführung  $ex_{ij}$ , ausgeführt  $dn_{ij}$  und abgeschlossen  $cm_i$ . Die Ereignisse, die einen Wechsel zwischen diesen Zuständen herbeiführen, werden mit Hilfe von Transitionen modelliert. Sie umfassen Beginn einer Handlung  $b_i$ , Durchführung einer Handlung  $p_{ij}$ , den Handlungsabschluss  $c_{ij}$  und den willkürlichen Handlungsabbruch  $a_{ij}$  sowie das Zwangsunterbrechen einer Handlung  $fa_{ij}$  durch eine fehlerhafte Ausführung (Adam et al. 1998, Attie et al. 1993). Die Zustände Initialzustand  $in_i$  und abgeschlossen  $cm_i$  sowie das Ereignis Beginn einer Handlung  $b_i$  sind unabhängig von der Einteilung in unterschiedliche Pfade  $j$ . In einem weiteren Petri-Netz  $DZ^{(W)}$  werden die von der handelnden Person verursachten Zustandstransformationen des Wirksystems modelliert. Dieses Petri-Netz bildet also alle Elemente des Wirksystems ab, mit Ausnahme der Arbeitsaufgabe. Die Transitionen von  $DZ^{(W)}$  steuern die Transitionen von  $DZ^{(A)}$  durch den Austausch von Token. Der Austausch erfolgt über Hilfsstellen, welche in Abbildung 1 mit „\*“ indexiert sind bzw., mit Ausnahme von  $b_i^*$ , senkrecht über oder unter einer Transition modelliert sind. Ein Pfad  $j$  im Zustand  $ex_{ij}$  wird nur durchlaufen, wenn zwei Token nacheinander vom  $DZ^{(W)}$  bereitgestellt werden. Dies impliziert eine Vorrang-Abhängigkeit zwischen zwei Transitionen von  $DZ^{(W)}$ . Diese Vorrang-Beziehung schließt eine Handlung ab. Unter Einführung von farbigen Token im Petri-Netz, lässt sich die Vorrang-Beziehung von  $p_{ij}$  und  $c_{ij}$  als Handlungsabschluss auf die in diesem Beitrag betrachteten Fehlertypen ausweiten. Kommt es bei einer Handlungsausführung zu einem Hinzufügungs-, Positionierungs-, Mengen- oder Zeitfehler, so wird die Handlung ebenfalls vollständig ausgeführt. D.h. mit Abschluss einer fehlerfreien oder fehlerbehafteten Handlung befindet sich jeweils ein Token in der Stelle  $cm_i$ . Liegt eine fehlerfreie Handlung vor, so wird dem Token ein Attribut zugeordnet, welches die Art des Fehlers spezifiziert.





**Abbildung 2:** Petri-Netz-Modul zur Modellierung von einem Mengenfehler.

getroffen, dass die Arbeitsperson eine zu hohe Menge des Farbbatch-Granulates in den Vorratsbehälter einer Kunststoffspritzgussmaschine einfüllt. Dies wird durch einen Sensor der Maschine erfasst und führt zum Erzeugen eines Tokens in der Stelle *Zu viel Batch*. Durch das Schalten der Transition *> Ziel* wird ein Token in der Stelle  $p_{i3}^*$  mit einem Attribut  $\{114\}$  erzeugt. Analog dazu wäre es denkbar für eine zu geringe Menge z.B. das Attribut  $\{115\}$  zu vergeben. Durch dieses Attribut ist eine Differenzierung des Handlungsergebnisses gegeben und dies bildet die Grundlage für die Bestimmung der Charakteristik der weiteren Handlungen. Die nachfolgenden Transitionen *Zu viel Batch* und *Zu wenig Batch* schalten entsprechend der Charakteristik des Tokens. In dem genannten Beispiel schaltet die Transition *Zu viel Batch* und der Token wandert in die Stelle *Farbton zu kräftig*. Hier wird die Fehlerkonsequenz der Handlung für eine anschließende Visualisierung mittels einer entsprechenden Software simuliert. Anschließend wird der Token durch Schalten der Transition *> Exit* in der Stelle  $Exit_{Sim}$  platziert. Durch die Simulation des Digitalen Zwillings mit der Software *VeroSim* wird ein benötigter Handlungsabbruch durch das *FeDiNAR*-System festgestellt und in der Stelle  $fa_{i3}^*$  ein Token platziert. Die Transition  $fa_{i3}$  ist aktiviert und schaltet. Hierdurch wird der Token aus der Stelle  $Exit_{Sim}$  entfernt und in der Stelle  $cm_i / in_{i+1}$  erzeugt. Die Existenz eines Tokens in der Stelle  $cm_i / in_{i+1}$  repräsentiert den Abschluss einer Handlungssequenz. Aufbauend auf den Informationen des Petri-Netz-Moduls und der Darstellung der Fehlerkonsequenzen wird eine parallele Simulation eines Digitalen Zwillings durchgeführt. Diese Simulation kann der handelnden Person nach Abbruch der Handlung in einer AR-Brille gezeigt werden, um die Auswirkungen eines Fehlers abzubilden und so einen Lernerfolg daraus produzieren. In Bezug auf das Beispiel könnte eine Darstellung eines zu stark eingefärbten Spritzgussteils im Sichtfeld gezeigt werden.

## 5. Diskussion, Zusammenfassung und Ausblick

Das entwickelte Petri-Netz-Modul ermöglicht die Abbildung menschlicher Fehler einer Handlungssequenz. Das zeitgleiche Entstehen von mehreren menschlichen Fehlern innerhalb einer Handlung, kann durch das bestehende Petri-Netz nicht abgebildet werden und bietet einen Ansatz für die Weiterentwicklung. Der Beginn und Abschluss einer Handlung durch eine handelnde Person lassen sich durch definierte Zustände und Grundfunktionen im Petri-Netz abbilden und in Form eines digitalen Zwillings simulieren. Es ist zu klären, in wie weit die Ausgestaltung des Petri-Netz-Moduls von den verfügbaren Zuständen, deren Erfassbarkeit und der Überführung in einen digitalen Zwilling abhängig ist. Innerhalb eines Pfades des Petri-Netz-Moduls

werden die Konsequenzen eines menschlichen Fehlers beschrieben. Für die Anwendung dieses Konzeptes im Projekt FeDiNAR bietet sich die Verwendung von gefärbten Petri-Netzen an, da eine Möglichkeit zur Dokumentation des Fehlertyps, der -ausprägung und der daraus entstehenden -konsequenz für die Simulation eines digitalen Zwillings benötigt wird. Es ist eine geeignete Datenstruktur zu entwickeln, welche diese Informationen innerhalb des Petri-Netzes speichert. Weiterhin ist das Petri-Netz-Modul im Kontext eines realen Anwendungsfalls und der Simulation umfangreicher Handlungsverläufe zu validieren.

## 6. Literatur

- Adam NR, Atluri V, Huang WK (1998) Modeling and analysis of workflows using Petri nets. In: Journal of Intelligent Information Systems, 10(2), 131-158.
- Algedri, J., & Frieling, E. (2015) Human-FMEA: Menschliche Handlungsfehler erkennen und vermeiden (2., erw. Aufl.). München: Hanser Verlag.
- Attie PC, Singh MP, Sheth A, Rusinkiewicz M (1993) Specifying and enforcing intertask dependencies. In: Proceedings 19<sup>th</sup> International Conference on Very Large Data Bases. Dublin, Ireland, 134-145.
- Bauer, J., & Harteis, C. (2012) Professional and Practice-based Learning: Vol. 6. Human Fallibility The Ambiguity of Errors for Work and Learning // Human Fallibility: The Ambiguity of Errors for Work and Learning. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Elmagarmid AK (1992) Database Transaction Models for Advanced Applications. Morgan Kaufmann, San Mateo, California.
- Hollnagel, E. (1993) The phenotype of erroneous actions. International Journal of Man-Machine Studies 39: 1-32.
- Jensen K (1992) Coloured Petri Nets. Basic concepts, analysis methods and practical use. In EATCS monographs on Theoretical Computer Science, Springer-Verlag, Berlin.
- Kapur, M. (2015) Learning from productive failure. Learning: Research and Practice, 1(1), 51–65. <https://doi.org/10.1080/23735082.2015.1002195>.
- Kontogiannis T (2003) A Petri Net-based approach for ergonomic task analysis and modelling with emphasis on adaptation to system changes. In: Safety Science, 41(10), 803-835.
- Murata T (1998) Petri nets: Properties, analysis and applications. In: Proceedings of the IEEE, 77(4), 541-580.
- Rasmussen, J.; Pedersen, O.; Mancini, G.; Carnino, A.; Griffon, M.; Gagnolet, P. (1981) Classificationssystem for reporting events involving human malfunctions. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory. Risø-M, No. 2240.
- Rasmussen, J. (1982) Human Errors: A Taxonomy for Describing Human Malfunction in Industrial Installations. Journal of Occupational Accidents 4:311-333.
- Reason, J. (1990) Human Error. (20. Aufl.). New York: Cambridge University Press.
- Rossmann J., Schluse, M., Waspe R. (2012) Integrating object oriented petri nets into the active graph data base of a real time simulation system. In Proceedings 2012 Winter Simulation Conference, Article No.: 383 Pages 1–2.
- Salimifard K, Wright M (2001) Petri net-based modelling of workflow systems: An overview. In: European journal of operational research, 134(3), 664-676.
- Schlick C, Bruder R, Luczak H (2018) Arbeitswissenschaft. Springer-Verlag.
- Senders, J. W., Morray, N. (1991) Series in applied psychology. Human error: Cause, prediction, and reduction; analysis and –synthesis. Second Conference on the Nature and Source of Human Error. Bellagio, Italy. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Van Der Aalst, W., M. (1998) Three good reasons for using a Petri-net-based workflow management system. In: Information and Process Integration in Enterprises. Springer, Boston MA, 161-182.

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



Gesellschaft für  
Arbeitswissenschaft e.V.

## **Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch?**

66. Kongress der  
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

TU Berlin  
Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme

HU Berlin  
Professur Ingenieurpsychologie

16. – 18. März 2020, Berlin

---

## **GfA-Press**

---

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

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

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

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

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

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

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

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

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

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

**Screen design und Umsetzung**

© 2020 fröse multimedia, Frank Fröse

[office@internetkundenservice.de](mailto:office@internetkundenservice.de) · [www.internetkundenservice.de](http://www.internetkundenservice.de)