

# **Autonomie und Assistenz in der Prozessindustrie**

**L. Schegner**, Technische Universität Dresden, PLT/SVT, Dresden;

**M. Krauss**, BASF SE, Ludwigshafen;

**J. Birk**, BASF SE, Ludwigshafen;

**L. Urbas**, Technische Universität Dresden, PLT/SVT, Dresden;

## **Kurzfassung**

Durch die komplexeren Arbeitsabläufe und Strukturen, die durch höhere Vernetzung und Flexibilität entstehen, ist eine differenzielle Betrachtung von Assistenz und Autonomie erforderlich. Denn die zunehmende Digitalisierung und Modularisierung ermöglichen einen höheren Automatisierungsgrad. Die Vernetzung von verschiedenen Systemen, die die Autonomiestufen aus unterschiedlichen Domänen beschreiben, erlaubt es ein Autonomiestufenmodell für die Prozessindustrie aufzustellen. Ordnet man aktuelle Anlagen in dieses System ein, erkennt man das bereits heute einzelne Aspekte in der Lebensphase einer Anlage sehr hoch automatisiert sind während andere noch voll manuell und ohne jegliche Assistenz durchgeführt werden müssen.

## **1. Einleitung**

Die zunehmende Digitalisierung und Modularisierung in der Prozessindustrie erlauben einen deutlich höheren Automatisierungsgrad bis hin zur Vollautomatisierung. Die dadurch höhere Vernetzung und Flexibilität führt an anderer Stelle jedoch zu komplexeren Arbeitsabläufen und Strukturen [1-3]. Dieses Phänomen erfordert eine differenzierte Betrachtung von Autonomie und Assistenz, um das ganze Potential einer durchgängigen Digitalisierung in integrierten Logistikketten, flexibler Produktion oder vorausschauender Prozessführungskonzepte auszuschöpfen. Autonomie bietet viele Vorteile für das menschliche Leben. Ein Framework, wie das ALFUS Framework [10] oder die Autonomiestufen in der Automobilindustrie, helfen bei der Charakterisierung der Autonomie. Der Charakterisierungsprozess unterstützt wiederum das Design und die Evaluierung von autonomen Systemen [10].

## 2. Vorarbeiten

In Vorarbeiten zur Ableitung einer generischen Architektur für Assistenzsysteme wurde die Assistenzfunktion in vier Grundfunktionsbereiche Informieren, Analysieren, Optimieren und Validieren aufgeteilt [4], siehe

Abbildung 1. Die Grundfunktion Informieren stellt relevante Betriebsdaten in zentralen Darstellungen dar, wie wichtige Durchsätze, Energieverbräuche oder abgeleitete Key Performance Indicators (KPIs). Dabei können die Darstellungen einfache Zahlen, Diagramme oder zeitliche Darstellungen sein, die dem Operator eine leichtere Bewertung gegenüber von Referenzwerten ermöglichen. Beim Analysieren werden Ergebnisse von Analyseverfahren, wie Simulationen, Massenbilanzierungen oder Trendkurven zur Verfügung gestellt. Dabei kann auch das zukünftige Prozessverhalten vorhergesagt werden. Diese Informationen helfen dem Operator seine Entscheidungen abzusichern. Bei der Grundfunktion Optimieren werden optimale Betriebsweisen berechnet und vorgeschlagen. Betriebsvorgaben können manuell, teilautomatisiert oder vollautomatisiert übernommen werden. Die Optimierung ist dabei gewissen Unsicherheiten unterworfen, da Einflüsse auf das System nur approximativ oder als Prognosen in die Berechnung eingehen. Daher sind (zyklische) Wiederholung und damit entsprechende Aktualisierung der Bewertungen und Berechnung von Betriebsvorgaben erforderlich. Bei der Validierung werden der prognostizierte und der tatsächlichen Betrieb gegenüber gestellt. Dabei werden Simulationen eingesetzt, die eine detaillierte Nachbildung des Anlageverhaltens erlauben. Der Vergleich vergangener Betriebsvorgaben und dem tatsächlichen Anlagenverhalten erlaubt dem Anwender für zukünftige Entscheidungen zu lernen und Vorgaben an das Assistenzsystem spezifischer anzupassen.

Konkrete Assistenzfunktionen reichen von situationsangepasster Informationsaufarbeitung über Handlungsempfehlungen bis hin zu vollständiger Autonomie des technischen Systems durch einen koordinierten, vollautomatisierten Betrieb, abhängig von Aufgabe und Anwendungsbereich. Das Modell wurde mit relevanten Nutzergruppen diskutiert, um Aufwände, Nutzen, Grenzen und Zukunftserwartungen zu konkretisieren. [15]



Abbildung 1: Vier Grundfunktionen einer Assistenzfunktion [4]

### 3. Autonomiestufen aus unterschiedlichen Domänen

Autonomiestufen gibt es bereits in unterschiedlichen Branchen und Domänen.

Martin und Barber [13, 14] teilen das Autonomiespektrum in vier diskrete Autonomielevel, siehe Abbildung 2, auf. Die erste Stufe ist **befehlsorientiert**, das heißt der Agent führt gegebene Befehle (von anderen Agenten) aus. Die nächste Stufe ist **Konsens**, der Agent arbeitet als Teammitglied und hilft Pläne zu entwerfen. In der dritten Stufe **lokal autonom** arbeitet der Agent allein und unbeschränkt von anderen Agenten. In der vierten Stufe **Master** entwirft der Agent Pläne für sich selber und untergeordnete Agenten, die befehlsgesteuert sind.

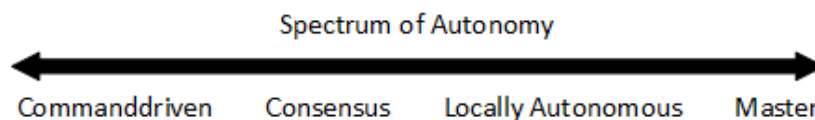


Abbildung 2: Spektrum der Autonomie für agentenbasierte Systeme [11]

Ein generisches und auf viele unbemannte Systeme anwendbareres Framework ist das ALFUS (Autonomy Levels for Unmanned Systems) Framework. Die Schlüsselkomponenten des Frameworks sind die Metriken, die in der Abbildung 3 auf den drei Achsen festgelegt sind. Diese sind zum einen die menschliche Unabhängigkeit, die Komplexität der Mission und die Umweltkomplexität. [10]

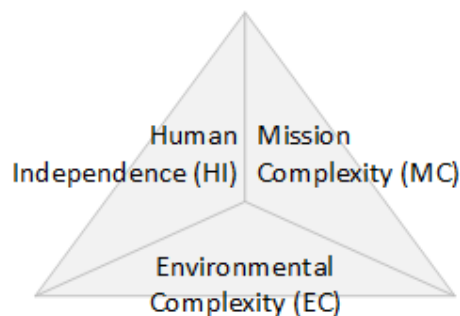


Abbildung 3: Die drei Aspekte für ALFUS [10]

Das PACT System (pilot authorisation and control of tasks), Tabelle 1, nutzt militärische Fachsprache, um realistische operative Beziehungen für fünf Hilfsebenen zu unterscheiden. Dabei ist auf der untersten Ebene der Pilot für alles selbst verantwortlich und es gibt noch keine Autonomie. In den nächsten vier Stufen wird der Pilot von einem System unterstützt. Dabei muss auf dem Level 1 der Pilot das System auffordern zu unterstützen, bei Level 2 gibt das System den Piloten Empfehlungen die dieser dann Annehmen kann. Auf dem Level 3 kann das System nach einer Autorisierung durch den Piloten Handlungen alleine durchführen. Auf Level 4 führt das System die Handlungen selber aus, es sei denn es gibt einen Wiederruf

vom Piloten. Auf der obersten Ebene handelt das System vollkommen autonom und der Pilot hat nur die Möglichkeit das System zu Unterbrechen. [1,12]

Tabelle 1: Das PACT System [11]

Primary Modes	Levels	Operational Relationship	Computer Autonomy	Pilot Authority	Adaptation	Information on performance
AUTOMATIC		Automatic	Full	Interrupt	Computer monitored by pilot	On/off Failure warnings Performance only if required.
ASSISTED	4	Direct Support	Advised action unless revoked	Revoking action	Computer backed up by pilot	Feedback on action. Alerts and warnings on Failure of action.
	3	In Support	Advice, and if authorised, action	Acceptance of advice and authorising action	Pilot backed up by the computer	Feed-forward advice and feedback on action. Alerts and warnings on failure of authorised action.
	2	Advisory	Advice	Acceptance of advice	Pilot assisted by computer	Feed-forward advice
	1	At Call	Advice only if requested	Full	Pilot, assisted by computer only when requested	Feed-forward advice, only on request
COMMANDED		Under Command	None	Full	Pilot	None performance is transparent

In der Automobilindustrie ist ein Autonomiestufenmodell mit einen 6-stufigen Aufbau, siehe Abbildung 4, gängig. Bei der Stufe 0 *Driver only* existiert noch kein eingreifendes Fahrzeugsystem und der Fahrer ist dauerhaft für die Längs- und Querführung des Fahrzeuges verantwortlich. In der Stufe 1 *assistiert* wird eine dieser beiden Funktionen von einem System übernommen. Bei der Stufe 2 *teilautomatisiert* übernimmt das System die Führung des Fahrzeuges in einem spezifischen Anwendungsfall, wie zum Beispiel ein Stauassistent. Der Fahrer muss dabei das System dauerhaft überwachen. In der Stufe 3 *hochautomatisiert* muss der Fahrer das System nicht mehr dauerhaft überwachen, er muss aber jederzeit in der Lage sein das Fahrzeug wieder zu übernehmen, dafür muss das System in der Lage sein, den Fahrer rechtzeitig zu informieren. Denkbare Systeme sind hierfür in der Automobilindustrie „Fahren auf der Autobahn“ oder „Fahren im Stau“, allerdings sind dafür noch nicht alle

rechtlichen Rahmenbedingungen geklärt. Die Stufe 4 *vollautomatisiert* ist das vollautomatisierte Fahren im spezifischen Anwendungsfall, in dem das System alle Situationen automatisch bewältigen kann. Ein denkbareres System in dieser Stufe ist das „Fahrerlose Parken“. In der höchsten Stufe *fahrerlos* ist vom Start bin zum Ziel kein Fahrer mehr erforderlich und das System kann alle Straßentypen, Geschwindigkeitsbereiche und Umfeldbedingungen handhaben. [7]

Technisch ist in der Automobilindustrie aktuell die Stufe 3 (Audi A8 [9]) erreicht, denn es müssen noch die rechtlichen Rahmenbedingungen geklärt werden, bevor das Auto in dieser Stufe fahren darf.

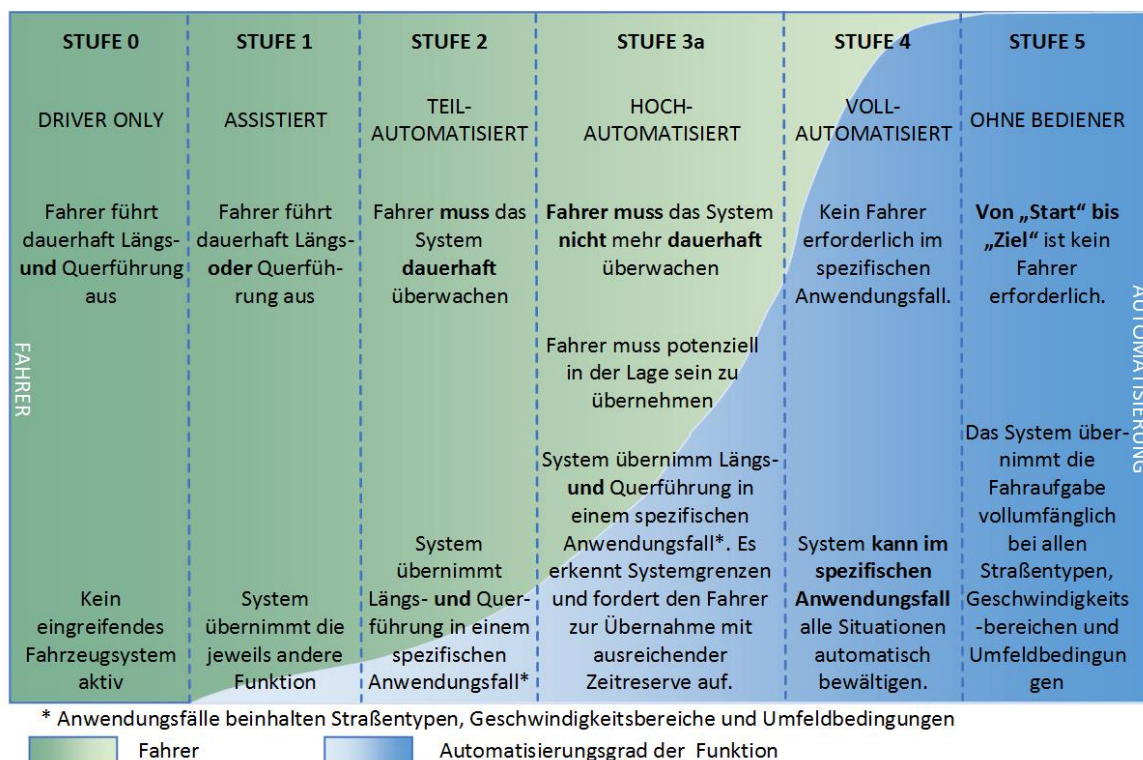


Abbildung 4: Autonomiestufen in der Automobilindustrie [7]

#### 4. Autonomiestufen in der Prozessindustrie

Bei der Entwicklung des Autonomiestufenmodells für die Prozessindustrie hat sich die Vernetzung der Purdue Enterprise Referenz Architektur (PERA, ISA 95), der IEC 61511 (SIS, BPCS) und des Autonomiestufenmodells der Automobilindustrie [5] als besonders hilfreich erwiesen. Entstanden ist ein Modell mit 6 Autonomiestufen der Prozessindustrie, Abbildung 5, das im Folgenden näher beschrieben wird.

Allgemein lassen sich die Aufgaben in der Prozessindustrie nach drei übergeordneten Zielen - Sicherheit, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit – zusammenfassen, die je nach

Autonomiestufe vom Operator oder dem System übernommen werden. Dabei umfasst die Sicherheit den Schutz der Arbeitenden, der Umwelt und der Anlage vor Schäden und Katastrophen. Der Verfügbarkeit dienen Aufgaben, die gewährleisten, dass genügend materielle und immaterielle Ressourcen für den Betrieb der Anlage vorhanden sind. Wirtschaftlichkeit befasst sich schließlich mit Ressourcen wie Zeit, Energie und Geld.

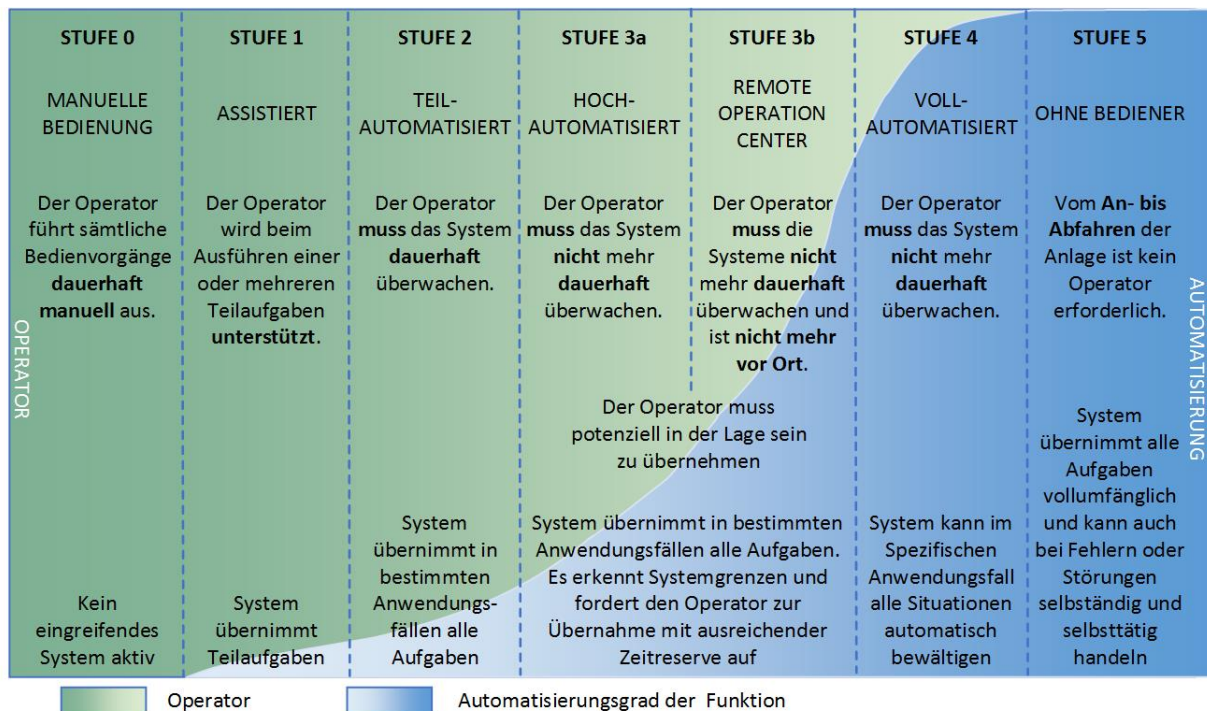


Abbildung 5: Autonomiestufen in der Prozessindustrie

In der Stufe 0 *manuelle Bedienung* wird sämtliche Bedienung vom Operator übernommen. Der Operator hat die Aufgabe sich um die Sicherheit, die Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit dauerhaft zu kümmern. In dieser Stufe gibt es noch kein unterstützendes System. In der Stufe 1 *assistiert* wird der Operator beim Ausführen einer oder mehrere Teilaufgaben für die Sicherheit, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit von dem System unterstützt. In der nächsten Stufe 2 *teilautomatisiert* muss der Operator das System dauerhaft überwachen. Das System kann in dieser Stufe in bestimmten Anwendungsfällen alle Aufgaben der Anlage übernehmen. Die Stufe 3 wurde zweigeteilt, da es in der Prozessindustrie Praxis ist, dass der Operator mehrere Anlagen überwachen muss. Es gibt die Stufe 3a *hochautomatisiert*, in welcher der Operator das System nicht mehr dauerhaft überwachen muss, aber noch jederzeit in der Lage ist, die Anlage zu übernehmen. Das heißt, die Anlage wird von dem System in bestimmten Anwendungsfällen vollständig übernommen. Die Systemgrenzen werden erkannt und der

Operator wird mit ausreichend Zeitreserve aufgefordert die Anlage wieder zu übernehmen. In der Stufe 3b *Remote Operation Center* ist der Operator nicht nur für eine Anlage sondern für mehrere Anlagen verantwortlich, dabei müssen diese Anlagen nicht dauerhaft überwacht werden. Der Operator muss aber potenziell in der Lage sein jede Anlage zu übernehmen. In der nächsten Stufe 4 *vollautomatisiert* muss der Operator das System nicht mehr dauerhaft überwachen. Das System kann im spezifischen Anwendungsfall alle auftretenden Situationen in der Anlage vollkommen automatische bewältigen. Die höchste Stufe 5 *ohne Bediener* benötigt vom An- bis zum Abfahren der Anlage keinen Operator mehr. Das System kann alle Aufgaben vollumfänglich übernehmen und auch bei Fehlern oder Störungen selbstständig und selbsttätig handeln.

## 5. Anwendung

Aufgrund der hohen Komplexität von verfahrenstechnische Anlagen wird im Folgenden das Level-Modell der Purdue Enterprise Referenzarchitektur (ISA95) für die Analysebereiche herangezogen. Zudem wird der Betriebszyklus der betrachteten Einheiten in eine Folge von Prozessphasen in Anlehnung an die Definition nach ISA106 unterteilt, im Rahmen der Analyse sind das die Phasen Inbetriebnahme, Operation (bestehend aus Startup/Shutdown, Lastwechsel und Produktionsbetrieb) sowie Wartung.

**ISA 95 Level 1** (Sensoren und Aktoren): Die (intelligenten) Feldgeräte und zunehmend auch die Prozessanalysegeräte arbeiten in der Phase Operation auf der höchsten Autonomiestufe *ohne Bediener*. In den Phasen Inbetriebnahme und Wartung ist die Interaktion mit den Geräten jedoch überwiegend der Autonomiestufe *manuelle Bedienung* zuzuordnen, auch wenn bereits einzelne Handlungen wie Ersteinrichtung oder Kalibrierung bei komplexeren Geräten durch Assistenzfunktionen unterstützt werden.

**ISA 95 Level 2** (Überwachung und Steuerung des physikalischen Prozesses): Die Funktionen dieses Levels zeichnen sich durch eine starke Heterogenität aus. Der ungestörte (und in einem durch gezielte Redundanzmaßnahmen auch gestörte) Produktionsbetrieb ist überwiegend auf den Autonomiestufen *teilautomatisiert* oder *hochautomatisiert* implementiert. Dabei ist auch eine Umsetzung auf der Ebene *Remote Operation Center*, vor allem bei kontinuierlicher Fahrweise aufgrund der Flottencharakteristik eines (modularen) Anlagenverbunds bereits heute möglich. Batchfahrweisen führen üblicherweise zu einer geringeren Autonomiestufe, da dort die Phasen Startup/Shutdown und Lastwechsel zeitlich dominierend sind und die Systeme in diesen Phasen nach wie vor überwiegend den Autonomiestufen *manuelle Bedienung* oder *assistiert* zuzuordnen sind. Für Startup/Shutdown müssen teilweise sogar ausgewählte Sicherheitsfunktionen durch Operatorhandlungen deaktiviert werden, damit die



Anlage in den gewünschten Betriebsbereich kommt, in diesen Phasen wäre also auch das Safety Instrumented System (SIS) nicht den Autonomiestufen *vollautomatisiert* oder *ohne Bediener* zuzuordnen. In allen anderen Phasen wird das SIS auf der Autonomiestufe *ohne Bediener* ausgeführt.

Für die Phase Wartung, die wir mit dem Eintreten eines erkennbaren technischen Fehlers in einer der Komponenten auf Level 0-2 der ISA 95 verbinden, zeigt sich ein extrem heterogenes Bild. Das Monitoring des Prozesses und der Komponenten erfolgt auf den Autonomiestufen *manuelle Bedienung* bis *teilautomatisiert*. Diagnose- und Stabilisierungshandlungen erfolgen meist auf den Autonomiestufen 1 oder 2. Eine übergeordnete Überwachung ist den höheren Automatisierungsstufen 3 und 4 zuzuordnen.

**ISA 95 Level 3** (Produktions- und Betriebsmanagement): In der Phase Operation werden die Rezeptsteuerungen zur Herstellung der gewünschten Endprodukte meisten auf den Autonomiestufen 2 oder 3 realisiert. Das notwendige Führen von Aufzeichnungen ist meistens schon voll automatisiert und erfolgt *ohne Bediener*, auch wenn immer mal wieder händische Aufzeichnungen notwendig sind, also Stufe *manuelle Bedienung*. Das Planen und Durchführen von Wartungsphasen und Instandhaltungen in den Anlagen und Geräten erfolgt eher auf der Stufe *manuelle Bedienung* oder *assistiert*.

**ISA 95 Level 4** (Geschäftsplanung und Logistik): Die Erstellung des grundlegenden Zeitplans für eine Anlagen, wann welches Produkt in welcher Menge gefahren werden soll, wird heute von *manuelle Bedienung* bis *teilautomatisiert* durchgeführt. In die gleichen Automatisierungsstufen lassen sich das Ermitteln von benötigten Ressourcen, sowie Planung von Logistik einordnen.

Die aufgeführten beispielhaften Tätigkeiten auf den unterschiedlichen Leveln der Purdue Enterprise Referenz Architektur zeigen, dass eine Einordnung in die Autonomiestufen der Prozessindustrie auf allen Ebenen möglich ist. Dabei hängt die genaue Einordnung von der spezifischen Umsetzung in dem jeweiligen Unternehmen und der jeweiligen Anlage ab.

## **6. Zusammenfassung**

Die Analyse vorhandener Autonomiestufenmodelle aus unterschiedlichen Domänen ermöglicht es mit der Vernetzung der Purdue Enterprise Referenz Architektur (ISA 95) und der IEC 61511, ein Autonomiestufenmodell für die Prozessindustrie zu erstellen. Dabei ist es anders als zum Beispiel bei einem Auto, welches man sehr leicht einer Autonomiestufe zuordnen kann, sinnvoll die einzelnen Phasen einer Anlage getrennt einzuordnen. Die aufgeführten Beispiele zeigen, dass bereits heute in der Prozessindustrie sämtliche Stufen



von *manueller Bedienung* bis *ohne Bedienung* vertreten sind, weshalb eine getrennte Betrachtung der einzelnen Tätigkeiten auf den unterschiedlichen Leveln der ISA 95 anzuraten ist. Diese detaillierte Betrachtung zeigt das mögliche Potenzial auf, um einen weiteren Schritt zur vollständigen Autonomie einer Anlage machen zu können.

## 7. Quellen

- [1] Hartmann, E.: Arbeitsgestaltung für Industrie 4.0: Alte Wahrheiten, neue Herausforderungen. In A. Botthof, E.A. Hartmann (Hrsg.). Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0, S. 9-22. Springer, 2015
- [2] Müller, R., Narciss, S., Urbas, L.: Interfacing Cyber-Physical Systems with Human Decision Makers. In H. Song, D. B. Rawat, S. Jeschke & C. Brecher (Hrsg.), Cyber-Physical Systems: Foundations, Principles and Applications, S. 145-160. Elsevier, 2017
- [3] Müller, R., Urbas, L.: Cognitive challenges of changeability: Multi-level flexibility for operating a modular chemical plant. Chemie-Ingenieur-Technik, 89(11), 1409-1420, 2017
- [4] Schegner, L., Hensel, S., Wehrstedt, J. C., Rosen, R., Urbas, L.: Architekturentwurf für simulationsbasierte Assistenzsysteme in prozesstechnischen Anlagen. AUTOMATION 2017. VDI Wissensforum, 2017
- [5] SAE J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems
- [6] Birk, J., Krauss, M.: Remote Operations in der Prozessautomatisierung. atp edition, 57(1-2), 60-67, 2015
- [7] ed. by VDA: Automatisierung - Von Fahrerassistenzsystemen Zum Automatisierten Fahren, VDA Verband der Automobilindustrie, 2015.
- [8] NIST: Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework, Version 1.1. 2004. [http://ws680.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=823](http://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=823)
- [9] Floemer, A.: Audi A8 soll „erstes Serienautomobil der Welt“ mit Level-3-Automation sein, <https://t3n.de/news/audi-a8-level-3-autonomes-fahren-837581/> (03.04.18)
- [10] Huang, H.-M.: Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework: Safety and Application Issues', in Proceedings of the 2007 Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems (ACM, 2007), pp. 48–53;
- [11] Taylor, R. M.: Capability, Cognition and Autonomy. QINETIQ LTD FARNBOROUGH (United Kingdom) Center for Human sciences, 2003;
- [12] Taylor, R. M., Brown, L., Dickson, B.: From Safety Net to Augmented Cognition: Using Flexible Autonomy Levels for on-Line Cognitive Assistance and Automation. Royal Air Force Center of Aviation Medicine Bedfordshire (United Kingdom), 2003

- [13] Martin, C. E., Barber, K. S.: Multiple, Simultaneous Autonomy Levels for Agent-Based Systems, in Proceedings of the Fourth International Conference on Control, Automation, Robotics, and Vision (Citeseer, 1996), pp. 1318–1322;
- [14] Martin, C. E., Macfadzean, R. H., Barber, K. S.: Supporting Dynamic Adaptive Autonomy for Agent-Based Systems. Proceedings of the AI and Manufacturing Research Planning Workshop, AAAI, 1996
- [15] Schegner, L., Wehrstedt, J. C., Rosen, R., Urbas, L: Anwendung von Assistenzsystemen in der Prozessindustrie, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaft "Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik" (PAAT), 2017.