

BEST PRESENTATION AWARD – 1. Platz

Automatisierung der Kontaminationsmessung im Rückbauprozess kerntechnischer Anlagen



Alena Wernke

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rückbauprozess kerntechnischer Anlagen ist die Freimessung von Oberflächen eine zentrale Aufgabe, um einerseits so wenig wie möglich Endlagervolumen zu generieren und andererseits um die Materialien für die Wiederverwertung dem Stoffkreislauf zuführen zu können¹. Der Schutz von Mensch und Umwelt sind dabei zentrale Aspekte seitens der Politik². Die in diesem Prozess manuell durchgeführte Freimessung ist im Bezug auf die zu untersuchende Gebäudestruktur für die Arbeiter vor Ort durch die zu tragende Schutzausrüstung physisch belastend. Ebenso ist der Arbeitsablauf monoton und kommunikationsarm. Diese Belastungsfaktoren führen zu einer Fehleranfälligkeit der Messungen. Durch die Automatisierung der Kontaminationsmessung an ebenen Wandoberflächen besteht das Potenzial, Messfehler zu reduzieren und gleichzeitig die persönliche Strahlenbelastung der Arbeitskräfte zu senken. Mit Hilfe automatisierter Positions- und Messdatenerfassung wird zudem eine nachvollziehbare Dokumentation realisiert.

EINLEITUNG

Eine Möglichkeit um den Nachweis der Einhaltung der Freigabewerte zu erbringen, besteht in der Direktmessung der Oberflächenaktivität mittels Kontaminationsmonitoren. Bei diesem Verfahren wird der zu untersuchende Bereich von einem Mitarbeiter mit einem Kontaminationsmessgerät händisch ausgemessen und geprüft, ob die flächenbezogenen Grenzwerte eingehalten werden³. Diese Art der Messung ist von den Oberflächeneigenschaften des Messgutes und den geometrischen Bedingungen bzw. der Erreichbarkeit des Messbereiches abhängig.

Daher eignet sich diese Methode besonders für die Freimessung von festen Materialien mit zugänglicher Oberfläche wie beispielsweise ebene Betonflächen⁴. Weitere wichtige Aspekte für die Durchführung dieser Messungen sind Informationen aus der Betriebshistorie sowie das Wissen über die Art und Energie der radioaktiven Teilchen. In Bereichen, die im Rahmen des Betriebes beispielsweise renoviert oder gestrichen wurden, besteht die Gefahr, dass radioaktive Kontaminationen überdeckt wurden. Alpha- oder niederenergetische Betateilchen durchdringen die neue Deckschicht

nicht und können mit diesem Messverfahren nicht nachgewiesen werden.⁵

Nach Angaben der Internationalen Atomenergie-Organisation wurden bis 2017 weltweit etwa 600 Reaktoren und 300 Anlagen der Ver- und Entsorgung außer Betrieb genommen. Allein in Deutschland befanden sich 21 Kernkraftwerke und 6 Forschungsreaktoren in verschiedenen Phasen der Stilllegung.⁶ Die Stilllegungs- und Rückbaumaßnahmen werden dabei überwiegend manuell durchgeführt⁷. Die Freimessung von Gebäudestrukturen, die routinemäßig ausgeführt wird, ist für die Mitarbeiter in einem Vollschutzanzug aufgrund der einseitigen Hand-Arm-Schulter-Belastung physisch ermüdend, insbesondere Messungen an schwer zugänglichen Stellen wie beispielsweise Decken und Vorsprünge oder in gebückter Haltung.

Für den Einsatz automatisierter Lösungen im Rückbauprozess wurden bisher komplexe, anlagen-spezifische Robotersysteme entwickelt, die oftmals nicht auf andere Anlagen und Gebäude übertragbar sind. Da die Betriebsdauer dieser technischen Lösungen im Vergleich zu Serienprodukten

- 1 Schüler, J.F.: Digitalisierung der Informationskette für Rückbauplanungen von Atom- und Kernkraftwerken unter Berücksichtigung der Building Information Modeling (BIM)-Methodik. Fakultät Bauingenieurwesen Institut für Bauinformatik, Technische Universität Dresden (2019)
- 2 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Forka - Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen. Förderkonzept: Rückbau und Entsorgung (2017)
- 3 Thierfeldt, S., Schartmann, F.: Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen. Erfahrungen und Perspektiven - 4. neu bearbeitete Auflage -, 4th edn., Aachen (2012)
- 4 Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Leitfaden zur Freigabe nach Teil 2 Kapitel 3 der Strahlenschutzverordnung (2020)
- 5 National Physical Laboratory: Measurement Good Practice Guide No. 30. Practical Radiation Monitoring, ISSN 1368-6550
- 6 Brendebach, B., Bruhn, G., Dewald, M., May, H., Schneider, S., Stahl, T.: Stilllegung kerntechnischer Anlagen, ISBN 978-3-946607-62-5 (2017)
- 7 McGrath, R., Reid, R., Tran, P.: EPRI Report: Guidance in the Use of Robotics and Automation for Decommissioning Nuclear Power Plants - 17440. WM 2017 Conference, Phoenix, Arizona, USA. http://archive.wmsym.org/2017/pdfs/FinalPaper_17440_0131034630.pdf (2017)

deutlich geringer ist, ist ein Einsatz roboterbasierter Lösungen mit hohen Kosten verbunden, die der manuellen Messung gegenüber stehen. Weiterhin müssen die technischen Lösungen sicher und effizient arbeiten, um in der anspruchsvollen Umgebung einer sich im Rückbau befindlichen Anlage zu funktionieren.^{7,8}

Am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb des Karlsruher Institutes für Technologie (KIT-TMB) wird in dem Projekt ROBDEKON an der Entwicklung automatisierter Lösungen für die Umgebungsexploration und Raumaufnahme kerntechnischer Anlagen sowie die Dekontamination und Freimessung geforscht. Die bisher manuell ausgeführten Arbeitsfolgen „Raumaufnahme – Voruntersuchung – Dekontamination – Freimessung“ werden in einer automatisierten Kette abgebildet und maschinell durchgeführt, ohne Personaleinsatz vor Ort. Innerhalb dieser Kette wird ein universelles System zur Automatisierung der Kontaminationsmessung entwickelt („Kontaminationsarray“). Das Ziel der Forschung ist es, ein modulares, automatisiertes System zu entwickeln, das flexibel an veränderte Umgebungsbedingungen, wie die Gebäudestruktur, angepasst werden kann. Durch den Einsatz dieses automatisierten Systems für die Freimessung wird die Qualität und Zuverlässigkeit der Messergebnisse gesteigert und das Expositionspotenzial der Mitarbeiter reduziert. Der Zeitplan für Rückbauprojekte kann verkürzt werden.⁷ Das entwickelte Konzept sowie die

sensorische Umsetzung des automatisierten Systems sind in⁹ beschrieben. In **Abbildung 1** ist der aktuelle Aufbau des Kontaminationsarrays an einem Ausleger einer modifizierten Hubarbeitsbühne (links) und auf einer mobilen, modularen Plattform (rechts) dargestellt. Im Folgenden werden die Einflussfaktoren auf den Entwicklungsprozess sowie der Prozessablauf zur Automatisierung der Messungen beschrieben.

ENTWICKLUNGSPROZESS

„Es ist das Ziel der Automatisierungstechnik, Systeme so zu steuern, dass die automatisierten Systeme selbstständig ihre Funktion erfüllen“.¹⁰

Nach **Abbildung 2** besteht ein automatisiertes System aus einem zu automatisierenden Prozess und aus einer Automatisierungseinrichtung bzw. Steuereinheit. Über die Automatisierungseinrichtung werden wichtige Stellgrößen an den entwickelten Prozess vorgegeben, über die das Prozessverhalten aktiv beeinflusst wird („Steuern“). Die Prozess- und Messdaten werden an die Steuereinheit übertragen.¹⁰ Damit ein automatisiertes System wie das Kontaminationsarray sicher und effizient in einer kerntechnischen Anlage arbeitet, muss es robust sein.⁷

Robust „ist ein Produkt, dessen Eigenschaften möglichst wenig von bestimmten Störgrößen (bestimmten Fertigungs- oder Einsatzbedingungen) abhängen“.¹¹



Abb. 1

Aufbau des Kontaminationsarrays an einem Ausleger (l.) und auf mobiler Plattform (r.).

8 Bakari, M. J., Zied, K. M., Seward, D. W.: Development of a Multi-Arm Mobile Robot for Nuclear Decommissioning Tasks, ISSN 1729-8806, pp. 387-406. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.5772/5665> (2007)

9 Wernke, A., Gentes, S.: Development of a novel tool for automation of the contamination measurement. *Saf. Nucl. Waste Disposal*, 1, 29–30, <https://doi.org/10.5194/sand-1-29-2021>, 2021

10 Prof. Dr.-Ing. Jan Lunze: *Automatisierungstechnik. Methoden für die Überwachung und Steuerung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme*, 4th edn. Walter de Gruyter GmbH, Berlin (2016)

11 Prof. Dr. Wilhelm Kleppmann: *Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren. Praxisreihe Qualität*, 10th edn. Carl Hanser Verlag, München (2020)

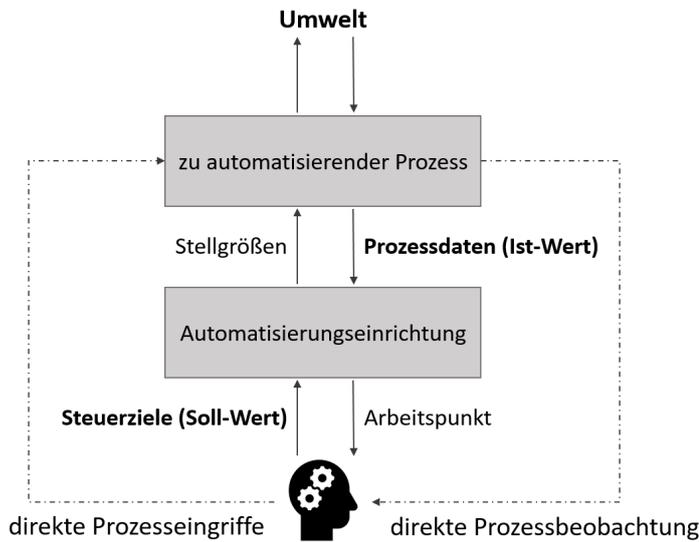


Abb. 2
Grundstruktur automatisierter Systeme nach ¹⁰.

Die Entwicklung einer automatisierten Lösung für die Direktmessung der Oberflächenaktivität in einer kerntechnischen Anlage hängt neben den messtechnischen Anforderungen von den Umwelteinflüssen sowie der konstruktiven Gestaltung des Werkzeuges ab (siehe **Abbildung 3**). Wichtige Anforderungen, die im Rahmen der Entwicklung berücksichtigt und im Labor untersucht werden, sind in **Abbildung 3** hervorgehoben.

Einflussgrößen auf den Messprozess können in Steuer- und Störgrößen unterteilt werden ¹¹. Störgrößen werden in der Automatisierungstechnik als zufällig auftretende Eingangssignale beschrieben,

über die die Umwelt den Prozess beeinflusst. Sie sind messbar, können aber nicht von dem automatisiertem System beeinflusst werden. ¹⁰ Ungenauigkeiten bei der Positionierung des Kontaminationsarrays, Schmutz, Farbe o. ä. auf der Oberfläche sowie die Hintergrundstrahlung oder sonstige Strahlungsquellen sind beispielsweise Störgrößen aus der Umwelt, die den zu automatisierenden Prozess beeinflussen können.

Durch die horizontale bzw. vertikale Bewegung des Kontaminationsarrays und der -monitore (siehe **Abbildung 1**) können zudem Schwingungen entstehen, die die Prozessstabilität ebenfalls beeinflussen. Steuergrößen, die in diesem Entwicklungsprozess fokussiert werden, werden im Folgenden beschrieben:

Definierte Messzeit

Um den Aufbau des automatisierten Systems zu vereinfachen und die Durchführungszeit für einen Messvorgang zu verkürzen, werden vier kommerziell erhältliche Kontaminationsmesssysteme, die für die Messungen parallel geschaltet werden, verwendet („Array“). Mit dem Kontaminationsarray werden stationäre Messungen an rasterförmig eingeteilten Oberflächen durchgeführt. Daher ergibt sich die stationäre Messzeit zunächst durch das verwendete Detektorsystem und dessen

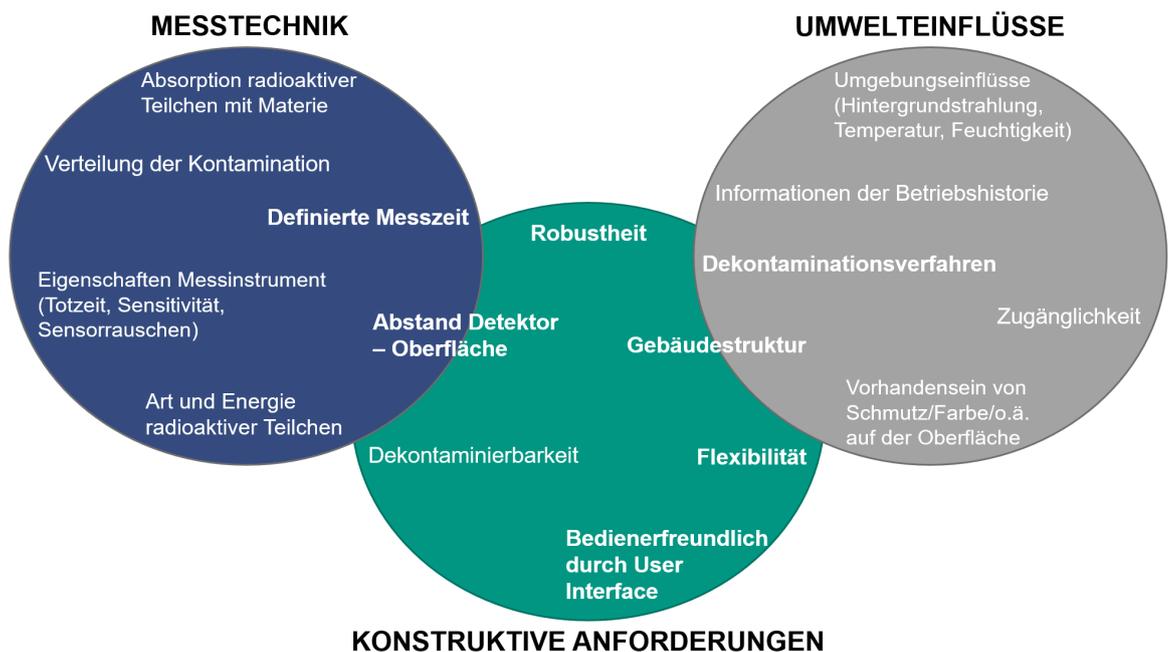


Abb. 3
Anforderungen und Einflussfaktoren zur Automatisierung einer Kontaminationsmessung.

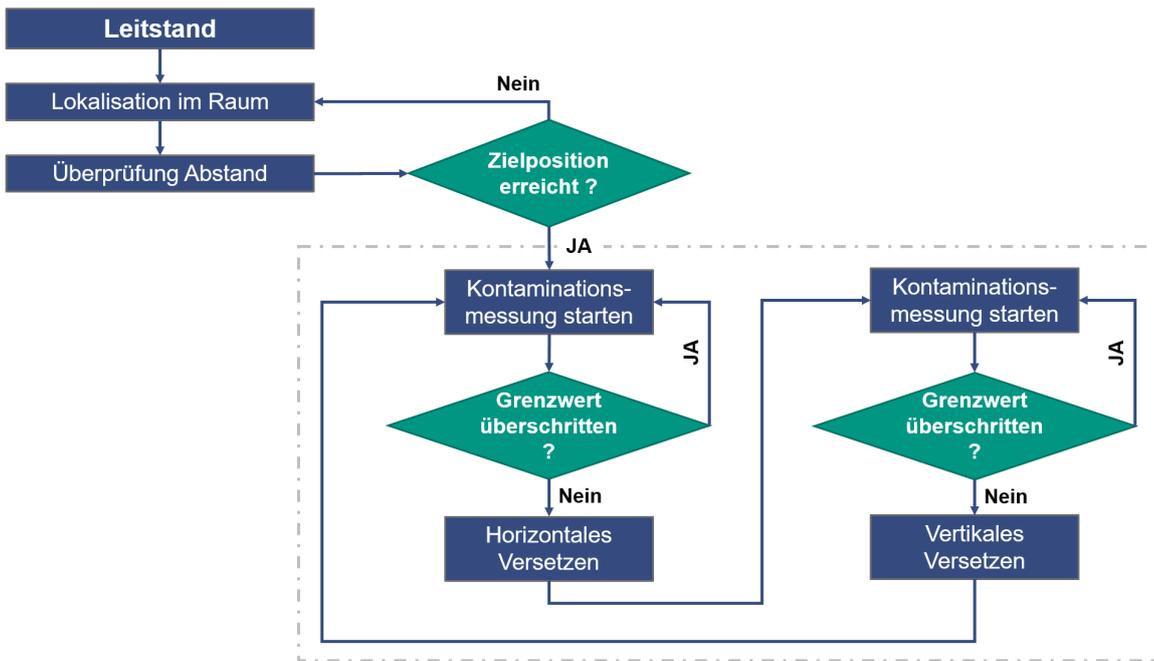


Abb. 4
Prozessablauf Kontaminationsarray.

Eigenschaften, wie das nuklidspezifische Oberflächenansprechvermögen, sowie durch die Einhaltung der Grenzwerte für die Freigabemessung. Ein weiterer Aspekt ist die derzeitige Gestaltung des Prozessablaufes.

Abstand Detektor – Oberfläche

Die Einhaltung eines vorgegeben Abstandes zwischen dem Detektor und der Oberfläche ist aufgrund der Reichweite der radioaktiven Teilchen ein wichtiges Gütekriterium für die Qualität der Messergebnisse. Dieser Ist-Wert (siehe **Abbildung 2**, „Prozessdaten“) wird durch die Oberflächenbeschaffenheit des Untersuchungsgebietes als auch durch die Genauigkeit der verwendeten Sensorik beeinflusst. Die Oberflächenbeschaffenheit der jeweiligen Gebäudestruktur wiederum hängt von anlagenspezifischen Umwelteinflüssen wie beispielsweise dem angewendeten Dekontaminationsverfahren oder dem Vorhandensein von Schmutz o. ä. auf der Oberfläche ab. Die Genauigkeit der verwendeten Sensorik beeinflusst die Lokalisierung und Positionierung vor dem Untersuchungsgebiet. Beide Faktoren werden zur Bestimmung der Abweichung des Ist-Wertes vom Soll-Wert betrachtet.

Robustheit

Die automatisierte Messung der Oberflächenaktivität mit dem Kontaminationsarray soll robust sein. Robustheit bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das Kontaminationsarray unabhängig von den Störgrößen aus der Umwelt die Messungen zuverlässig durchführt, der Prozess ist stabil. Die

Prozessparameter wie etwa die Oberflächenbeschaffenheit dürfen die Zielgrößen nicht beeinflussen bzw. die Werte der Zielgrößen dürfen trotz des Auftretens von Störgrößen nur wenig streuen¹¹. Das Ziel ist es die Abweichung zwischen den Ist- und Soll-Werten zu minimieren. Robustheit muss aber auch softwareseitig umgesetzt werden. Dafür werden alle verwendeten Sensoren in eine zentrale Software eingebunden. Die Software macht einen wesentlichen Teil der Gesamtkomplexität eines automatisierten Systems und ist in den meisten Entwicklungsprojekten die kritische Komponente⁸. Durch die Ausarbeitung einer bedienerfreundlichen Benutzerschnittstelle kann der Anwender relevante Parameter individuell berücksichtigen und wichtige Informationen werden in Echt-Zeit bereitgestellt.

Ebenso wichtig für den Einsatz des Kontaminationsarrays im kerntechnischen Bereich ist die Dekontaminierbarkeit sowie die Zugänglichkeit zum Untersuchungsgebiet, die durch die Art und den Zeitpunkt der Messung beeinflusst wird. Handelt es sich um eine Vor- oder Entscheidungsmessung und kann das System durch die Anlage barrierefrei transportiert werden? Das sind relevante Untersuchungsaspekte, die im Realeinsatz des Werkzeuges beachtet werden müssen, aber im Rahmen der Laborentwicklung kaum fokussiert werden können.

PROZESSABLAUF

Ausgangsbasis des entwickelten Messprozesses ist die Lokalisation des Kontaminationsarrays im

Parameter	Bezeichnung			
Stationäre Messzeit (s)	t_{MESS}	10,0	5,0	2,5
Zeit horizontaler Vorgang (s)	$t_{HOR,MIN}$	114,9	64,9	39,9
Zeit vertikaler Vorgang (s)	$t_{HOR,MIN}$	140,0	140,0	140,0
Gesamtmesszeit (s)	t_{GES}	254,9	204,9	179,9

Tab. 1.
Darstellung der Gesamtmesszeit je nach stationärer Messzeit.

Raum vor dem Untersuchungsbereich (siehe **Abbildung 4**). Dafür werden Daten, wie beispielsweise der Abstand zwischen der Detektorfolie und dem Messgut, aber auch die Ausrichtung im Raum in Echt-Zeit ermittelt und fortlaufend überwacht. Ist die Zielposition erreicht, kann die erste Kontaminationsmessung automatisiert von einem Leitstand aus gestartet werden. Nach Ablauf der Messzeit ist zu überprüfen, ob der Grenzwert überschritten wurde und ggfs. eine Kontrollmessung durchgeführt werden muss. Anschließend wird das System horizontal mit Hilfe einer Lineareinheit um eine definierte Länge versetzt und eine zweite Kontaminationsmessung gestartet. Auch hier muss nach Ablauf der Kontaminationsmessung bei Bedarf eine Kontrollmessung durchgeführt werden. Anschließend wird das System vertikal um eine definierte Länge versetzt. Der oben beschriebene Messvorgang wird wiederholt, bis der Untersuchungsbereich vollständig ausgemessen wurde.

Ist das Kontaminationsarray vor dem Untersuchungsbereich positioniert, hängt die Gesamtmesszeit des Prozessablaufes von der horizontalen und vertikalen Bewegung des Kontaminationsarrays ab. Die minimale Zeit für die vertikale Bewegung basiert auf der Detektorlänge und wird durch die maximale Traglast des Linearantriebes begrenzt. Sie wird für den Versuchsstand einmalig definiert. Die minimale Zeit für einen horizontalen Vorgang setzt sich aus einer Versatzbewegung des Werkzeuges und der stationären Messzeit zusammen. Die Zeit für die horizontale Versatzbewegung wird ebenfalls durch die Leistung des Linearantriebes begrenzt und einmalig definiert. Die stationäre, nuklidspezifische Messzeit wird berechnet und kann individuell an den Untersuchungsprozess angepasst werden.

Für die Gesamtmesszeit gilt:

$$t_{GES} = t_{VERT,MIN} + t_{HOR,MIN} = t_{MOVE,VERT} + t_{MOVE,HOR} + t_{MESS}$$

Die stationäre Messzeit t_{MESS} ist ein wichtiger Einflussparameter auf die Wirtschaftlichkeit des Kontaminationsarrays. **Tabelle 1** zeigt die zu erwartende Gesamtmesszeit für einen

Quadratmeter in Abhängigkeit der stationären Messzeit, die systematisch reduziert wird. Eine Halbierung der Messzeit t_{MESS} von 10s auf 5s reduziert die Gesamtmesszeit t_{GES} um etwa 20 %, beträgt t_{MESS} 2,5s wird t_{GES} um etwa 30 % reduziert.

AUSBLICK

Die Automatisierung der Kontaminationsmessung bietet ein hohes Potenzial um die Fehleranfälligkeit zu reduzieren und die Qualität der Messergebnisse in der Freigabemessung zu steigern. Mit Hilfe des oben vorgestellten Prozessablaufes können einzelne Wandbereiche oder ganze Quadratmeter automatisiert untersucht werden. Ein wichtiger Einflussparameter ist die Gesamtmesszeit, die von dem gestalteten Messprozess und der stationären Messzeit abhängt. Hier zeigt sich, dass die limitierenden Zeitfaktoren bei der Automatisierung dieses Prozesses sich durch die Versatzbewegung der Linearantriebe und die stationäre Messzeit bedingt durch die messtechnischen Anforderungen ergeben. Bei der Definition der minimalen Messzeit muss aber neben den oben beschriebenen Faktoren auch die Stabilität der Kommunikation bei der Übertragung der Messergebnisse beachtet werden. Eine Minimierung der Messzeit unter Zunahme der Streuung bei der Datenübertragung kann die Prozessstabilität verringern und kann sich negativ auf die Robustheit des zu automatisierenden Prozesses auswirken.

Autorin



Aleyna Wernke

Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Karlsruher Institut für Technologie, Institut
für Technologie und Management im Baubetrieb.

alena.wernke@kit.edu

Nach dem Studium des Maschinenbaus am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), absolvierte Frau Wernke ein Fernstudium in Medizinischer Physik und Technik an der Technischen Universität Kaiserslautern und war zwischenzeitlich als Konstrukteurin für die Bereiche Strahlenschutz und Prozesstechnik bei der Berthold Technologies GmbH tätig. Seit Juli 2019 ist sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin zurück am KIT und dort vor allem mit automatisierten Lösungen für den Rückbau kerntechnischer Anlagen beschäftigt