

Sozio-technisches Assistenzsystem für eine energieeffiziente und nachhaltige Nutzung von Reinraumfertigungsanlagen im diskontinuierlichen Betrieb

Janina MÖHLE, Leon POTTHOFF¹, Daniel KLAAS¹

¹ *Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover,
An der Universität 2, D-30823 Garbsen*

² *Institut für Fabrikanlagen und Logistik, Leibniz Universität Hannover,
An der Universität 2, D-30823 Garbsen*

Kurzfassung: Im Rahmen dieses Papers wird ein sozio-technisches Assistenzsystem vorgestellt, das Nutzende befähigt, Energiesparmaßnahmen an typischen in Reinräumen befindlichen technisch komplexen Fertigungsanlagen durchzuführen. Neben dem Konzept des Assistenzsystems wird eine methodische Vorgehensweise zur Umsetzung erläutert. Ein Fokus liegt dabei auf der Berücksichtigung und dem Ausbau der Mitarbeitendenkompetenz.

Schlüsselwörter: Assistenzsystem, Reinraum, Energieeffizienz, Kompetenzentwicklung, Fertigungsanlage, sozio-technisch

1. Einleitung

In Zeiten von Klima- und Energiekrise wird es immer relevanter, Energieeinsparpotentiale innerhalb der Produktionstechnik zu identifizieren und nachhaltige Arbeitssysteme zu etablieren. Ein hohes Energieeinsparpotential bieten die in Reinräumen befindlichen Anlagen und Geräte, da sie häufig diskontinuierlich genutzt werden. Ein Reinraum ermöglicht die Fertigung und Handhabung mikrotechnischer Komponenten, indem die Konzentration luftgetragener Partikel, die Temperatur, die Helligkeit und die Luftfeuchtigkeit innerhalb eines definierten Toleranzbereiches gehalten werden (Menz & Mohr 2005; ISO 14664 2015). Die mikrotechnischen Komponenten durchlaufen vielseitige Fertigungsschritte in unterschiedlichen Anlagen (Globisch et al. 2011). Ein kontinuierlicher Betrieb garantiert eine hohe, reproduzierbare Prozessstabilität, die für mikrotechnische Forschungs- und Produktionsumgebungen erforderlich ist, bedingt zugleich aber auch einen kontinuierlichen Energieverbrauch. Durch einen diskontinuierlichen Betrieb der Anlagen, das heißt durch regelmäßiges vollständiges oder partielles Abschalten und Wiederanfahren, ist Energie einsparbar. Hierbei besteht ein Zielkonflikt zwischen einer Reduktion des Energieverbrauchs, einer hohen Prozessstabilität bzw. Reproduzierbarkeit und der Vermeidung einer Dauerfestigkeitsreduktion der komplexen und teuren Anlagen. In Kooperation zwischen dem Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA) sowie dem Institut für Mikroproduktionstechnik (IMPT) wird an der Leibniz Universität Hannover ein digitales Assistenzsystem entwickelt, das die Mitarbeitenden im Reinraum gezielt unterstützt und befähigt, Energiesparmaßnahmen (ESM) durchzuführen. Der Fokus dieses Papers liegt auf der Entwicklung eines Konzeptes zur kompetenzorientierten Unterstützung der Reinraumnutzenden bei der Umsetzung von ESM an den vielseitigen im Reinraum befindlichen Anlagen und Geräten.

2. Stand der Wissenschaft und Technik

Bisherige Ansätze zum Energiesparen im Bereich der Reinraumtechnik beschränken sich fast ausschließlich auf den Reinraum als infrastrukturelle Einrichtung (Loomans et al. 2019). Somit werden darin befindliche komplexe Anlagen und Geräte nicht ganzheitlich betrachtet. Da es sich beim Anfahren und Abschalten der Systeme im Reinraum um komplexe Vorgänge handelt, bedarf es zudem einer entsprechenden Qualifikation des Personals. Zum Einsatz im industriellen Bereich gibt es eine Auswahl bereits existierender kommerzieller digitaler Assistenzsysteme (Krüger 2017). Diese tragen der Komplexität des Reinraums, der Anlagen sowie der notwendigen Mitarbeitendenqualifikation nicht ausreichend Rechnung. Aktuell in der Erforschung befindliche Maßnahmen scheinen in Bezug auf die persönliche Kompetenzentwicklung von Arbeitenden Abhilfe schaffen zu können (iTizzimo AG 2018; Pinto 2018). Üblich zur Beschreibung der Qualifikation ist die Verwendung von Kompetenzmatrizen. Diese dokumentieren die Anlagenbedienungsfähigkeit einer Person durch Zuordnung zu einer Personengruppe (VDI 5600 2016). Ein Abgleich dieser mit der für die zu bedienenden Anlage notwendigen Kompetenz gibt Aufschluss darüber, ob Kompetenzentwicklungsmaßnahmen notwendig sind. Eine Unterteilung erfolgt bspw. durch Problemlösungsfähigkeiten und dem Status von Sicherheitsunterweisungen. Zur Weiterbildung ist die adaptive, lernzielabhängige Bereitstellung von Schulungsunterlagen unabdingbar. Für diese Adaption wird das aufgabenspezifische Kompetenzlevel gemäß der Kompetenzmatrix verwendet (Bullinger-Hoffmann 2019). Der Stand der Technik zeigt auf, dass einzelne technische Lösungsansätze losgelöst von Ansätzen zur Mitarbeitendenqualifikation vorhanden sind. Diese gilt es jedoch unter Beachtung der Anlagenkomplexität, der notwendigen Prozessstabilität sowie der individuellen Bedienschritte zu fusionieren. Die Eignung ist kritisch zu bewerten.

3. Assistenzsystem zum Energiesparen in Reinraumumgebung

Zur Realisierung der ESM ist ein Assistenzsystem entwickelt worden. Dieses vereint die Ansätze bestehender Systeme zum Energieeinsparen und zur Kompetenzentwicklung im Kontext der komplexen technischen Infrastruktur eines Reinraums. Es befähigt zur strukturierten Aufnahme und Weitergabe von vorhandenem Expertenwissen.

3.1 Konzept des Assistenzsystems

Das Assistenzsystem besteht aus vier Teilsystemen. Das Anlagenbuchungssystem (I) ist mit einem System zur Bewertung des Energieeinsparpotentials in nicht genutzten Zeiten (II) verknüpft. Es gibt den Mitarbeitenden Empfehlungen für zu treffende ESM (III) und stellt abhängig vom Kompetenzlevel Schulungsunterlagen (IV) für eine erfolgreiche Umsetzung bereit. Die Umsetzung hat sich wie folgt dargestellt: Zur Koordination der Bedarfe im Reinraum des IMPT ist bereits ein Anlagenbuchungstool über Microsoft Access® etabliert. Dieses wird, wie im Folgenden beschrieben ergänzt, um die Teilsysteme II - IV zu einem übergeordneten Assistenzsystem zu erweitern. Der Kern der Entwicklung ist ein Schedulingalgorithmus, der energieoptimierte Empfeh-

lungen zu Nutzungszeiten von Anlagen erstellt. Dazu werden neben den Nutzungszeiträumen erforderliche Soll-Kompetenzen zum Umsetzen von ESM ermittelt und mit den Ist-Kompetenzen der Mitarbeitenden verglichen. Auf Grundlage dessen erfolgen ESM-Vorschläge und eine Zuteilung von Schulungsunterlagen bzw. Arbeitsanweisungen, falls Defizite zwischen Soll- und Ist-Kompetenzen vorliegen.

Das Assistenzsystem besteht hierbei aus dem *Planungstool* und dem *sozio-technischen Energiesparbefähiger (STEB)* (vgl. Abbildung 1). Das *Planungstool* basiert auf dem Anlagenbuchungstool und ergänzt dieses. Neben dem ursprünglichen Buchen von Nutzungszeiträumen erfolgt unter Berücksichtigung von zeitlichen Restriktionen der Mitarbeitenden eine energieoptimierte Empfehlung zu den Betriebszeiten, sofern Mitarbeitende einen Zeitraum angeben, in dem sie zeitlich flexibel sind. Ein *Schedulingalgorithmus* ermittelt auf Basis von anlagenspezifischen Parametern wie bspw. Abschalt- und Wiederanfahrzeiten einen energieoptimierten Nutzungszeitraum. Die anlagenspezifischen ESM werden in einem Maßnahmenkatalog festgehalten. Die jeweilige Ist-Kompetenz wird mit der notwendigen Soll-Kompetenz der Mitarbeitenden verglichen und daraus ein Vorschlag für ESM und die notwendigen Weiterbildungsmaßnahmen wie Arbeitsanweisungen an die Mitarbeitenden übermittelt.

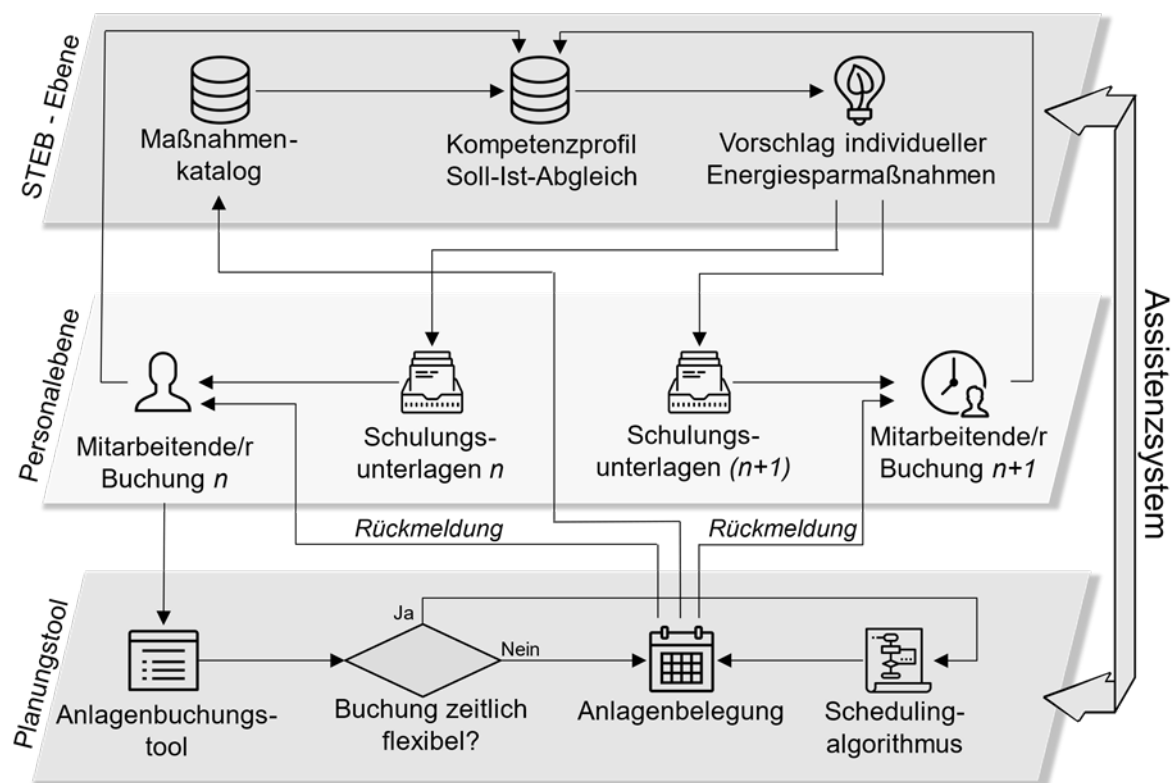


Abbildung 1: Konzept zur energieeffizienten und nachhaltigen Nutzung von Reinräumen

3.2 Auswahllogik zur Maßnahmenbestimmung

Die *Auswahllogik* zur Bestimmung der ESM ist in Abbildung 2 dargestellt. Die *erste Filterebene* ist die *Anlagenbelegung*. Mögliche ESM sind vielseitig und anlagenspezifisch bspw. das Ein-, Ausschalten oder Drosseln von Anlagen und Teilsystemen. Exemplarisch kann das daraus resultierende Wiederherstellen eines Vakuums,

abhängig von äußeren Bedingungen, teils mehrere Stunden andauern, während es sich beim Einschalten von Computern nur um wenige Minuten handelt. Daher ist es notwendig, die ESM den Nutzungsfrequenzen der Anlagen anzupassen. Diese kann bei unterschiedlichen Anlagen oder Kalenderwochen stark variieren. Das Hauptkriterium zum Filtern des Maßnahmenkatalogs sind die Zeiten, in denen die jeweilige Anlage nicht genutzt wird, also der Zeitraum zwischen zwei Buchungen. Je größer der Zeitraum, desto größer die erwartete Einsparung an der Anlage.

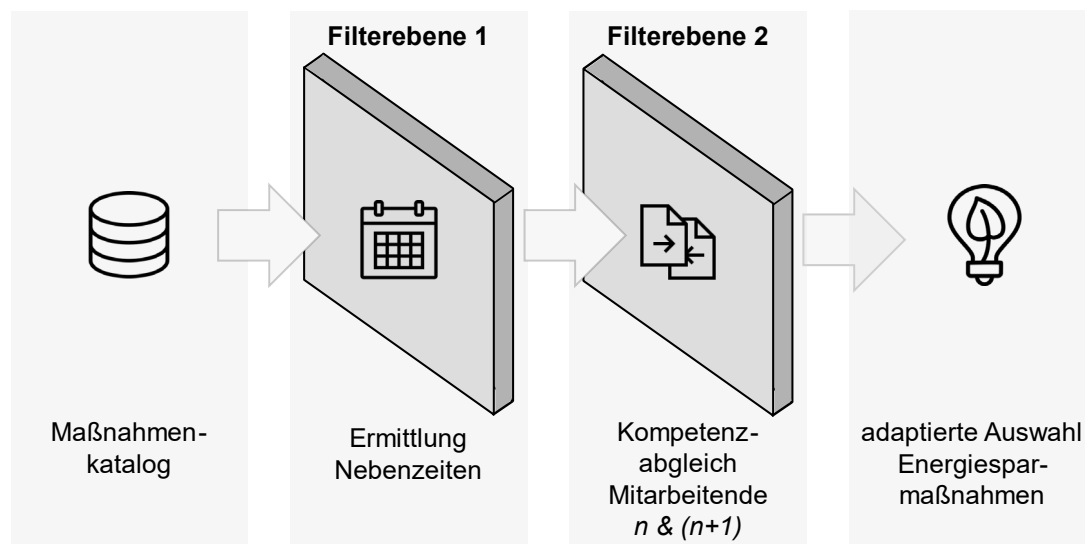


Abbildung 2: Auswahllogik der Energiesparmaßnahmen

In der *zweiten Filterebene* findet ein *Soll-Ist-Abgleich* der Kompetenz der Mitarbeitenden statt. Jeder Maßnahme im Maßnahmenkatalog sind erforderliche Soll-Kompetenzen für den Abschalt- sowie Anfahrvorgang zugeordnet. So kann sichergestellt werden, dass sowohl Mitarbeitende/er n befähigt ist, die ESM an der Anlage umzusetzen, als auch Mitarbeitende/er $(n+1)$ in der Lage ist, die Anlage beim nächsten Benutzen wieder in ihren Ausgangszustand zurückzusetzen. So entsteht für jeden Buchungsvorgang eine adaptierte Auswahl an ESM, die sowohl die Nutzungszeiträume der Anlagen als auch die erforderlichen und aufgabenspezifischen Kompetenzen der Mitarbeitenden berücksichtigt.

Initial werden den Personengruppen pauschal Kompetenzlevel zugewiesen, von denen aus eine Weiterbildung erfolgt. Beispielsweise gelten Studierende und unerfahrene Promovierende als Junior Operator, erfahrene Promovierende und Mikrotechnologen/innen als Senior Operator und die erfahrenen, prozessaffinen Reinraumtechniker/innen oder der/die Laborleiter/in als Expert.

Entsprechend der Kompetenzlevel werden individuelle *Schulungsunterlagen* infolge der Terminbuchung bereitgestellt, um die Defizite zwischen Soll- und Ist-Kompetenz nahezu zu eliminieren. Der individuelle Charakter der Schulungsunterlagen besteht darin, dass, je nach Komplexität der ESM und Kenntnisstand des Mitarbeitenden, die Form der Unterlagen sowie die Lernziele der Mitarbeitenden variieren. Mögliche Darstellungsformen reichen von Schritt-für-Schritt-Anleitungen in Text-, Bild- oder Videoform bis hin zu Informationen zum Umgang mit spezifischen Situationen und verständnisförderlichen Hintergrundinformationen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit,

auf die gesamte Datenbank des *Maßnahmenkatalogs* mit allen ESM zuzugreifen. Die ESM sind kategorisiert durch die Art der Anlage, an der sie durchgeführt werden.

3.3. Vorgehensweise zur Ermittlung der Energiesparmaßnahmen

Die besondere Herausforderung beim Erstellen des Maßnahmenkatalogs besteht in der Komplexität der Anlagen. In der Mikroproduktionstechnik führen kleinste Abweichungen von Anlagenparametern und Umgebungsbedingungen zur Schädigung der empfindlichen, abgeschiedenen Dünnschichten. Es ist eine methodische Vorgehensweise gemäß Abbildung 3 ermittelt worden.

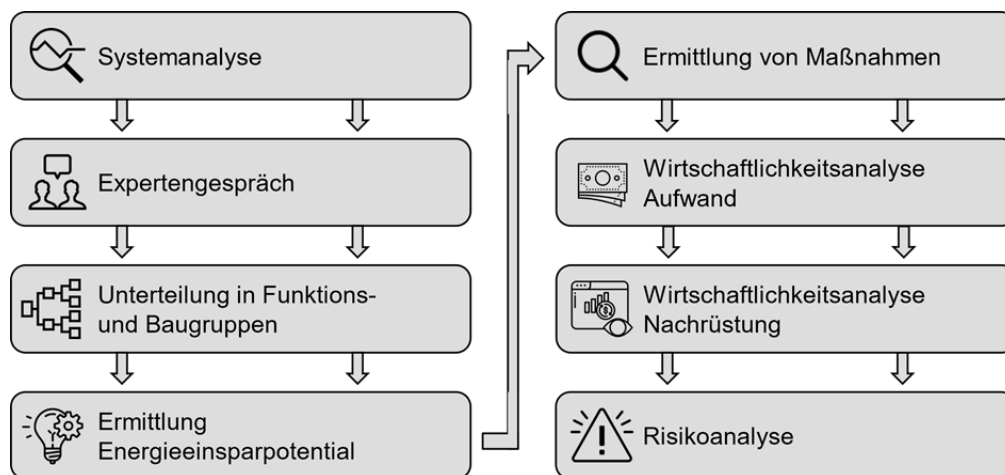


Abbildung 3: Methodische Vorgehensweise zur Ermittlung von Energiesparmaßnahmen

Zunächst erfolgt eine Systemanalyse mit dem Ziel des Verständnissgewinns zur Funktionsweise. Es folgt ein Austausch mit Experten in Bezug auf besondere Anforderungen (bspw. der Prozessstabilität), eine Unterteilung in Funktions- bzw. Baugruppen sowie eine Ermittlung der jeweiligen Einsparpotenziale. Diese Erkenntnisse werden gesammelt und münden in der baugruppenspezifischen Maßnahmenermittlung. Es folgen Wirtschaftlichkeitsanalysen in Bezug auf die Umsetzung der Maßnahme und einer möglichen Nachrüstung. Die Nachrüstung betrifft bspw. den Einbau von Frequenzumrichtern, um die Drehzahl von Pumpen zu reduzieren. Das Vorgehen schließt mit einer abschließenden ganzheitlichen Risikobewertung in Bezug auf Prozessstabilität, Dauerfestigkeit und Arbeitssicherheit.

4. Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen auf, dass unter Anwendung der dargestellten Maßnahmen bestehende Erkenntnisse der Arbeitswissenschaften im Bereich Kompetenzentwicklung auf Reinraumanlagen, mit dem Ziel Energie einzusparen, erfolgreich übertragen werden können. Herausfordernd sind die Systemanalyse und Energieverbrauchsermittlung, da Zuleitungen oftmals nur schwer zugänglich und messbar sind. Auch die Verwendung von aufklappbaren Stromwandlern ist bauraumbedingt nur eingeschränkt möglich. Der Einfluss von Maßnahmen auf die Dauerfestigkeit der Komponenten ist oftmals nur schwer abzuschätzen. Es ist erkennbar, dass bei einigen

Anlagen die Realisierung von ESM aufgrund hoher Nachrüstungs- bzw. Implementierungskosten nur eingeschränkt sinnvoll ist. Automatisierte Sparmaßnahmen sind aufgrund oftmals notwendiger manueller Nutzendentätigkeiten nur eingeschränkt ohne Nachrüstung umsetzbar. Es ist zu prüfen, ob bei diesen Anlagen eine Investition in Maßnahmen zur regenerativen Energieerzeugung (Photovoltaik, Windkraft etc.) ökonomisch sinnvoller ist. Rückwirkungen in Bezug auf reparatur- bzw. nachrüstfreundliche Konstruktionsregularien sind zu berücksichtigen. Verbindliche Vorgaben für per Prozessleittechnik automatisch steuerbare ESM werden empfohlen.

Neben dem Nutzen von ESM ist neben dem Können auch das Dürfen ein relevanter Faktor. Es erscheint erforderlich, arbeitsrechtliche Rahmenbedingungen und berufs-genossenschaftliche Anforderungen an Fachkräfte neu zu durchdenken und wandlungsfähiger zu gestalten. Ferner ist es sinnvoll, neuartige und akkreditierte Ausbildungs- bzw. Weiterbildungsmöglichkeiten in Form anwendungsspezifischer und zeitlich kompakter Formate zu schaffen. Es gilt zu prüfen, wie lange die Gültigkeit des jeweiligen Kompetenzlevels zeitlich sinnvoll ist. Entsprechend geeignete Formen der Nachschulung sind zu ermitteln. Zukünftige Tätigkeiten fokussieren darauf, die Algorithmenfähigkeit der verwendeten Skriptsprache „Visual Basic for Applications“ (VBA) für die Anwendung eines Schedulingalgorithmus zu optimieren. Ein Aspekt ist hierbei die Laufzeitreduktion des Algorithmus, um die Benutzerfreundlichkeit nicht negativ zu beeinträchtigen. Als bisher vielversprechend hat sich ein Genetischer Algorithmus erwiesen. Aufbauend auf den Erkenntnissen gilt es einen sozio-technischen digitalen Energiezwilling von Anlagen zu implementieren.

5. Literatur

- Bullinger-Hoffmann AC: Zukunftstechnologien und Kompetenzbedarfe. In: Kompetenzmanagement in Organisationen; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 2019
- Globisch S, Deus S, Eckardt G, Herber M, Kalisch, C, Knebusch O, Krehbiel M, Reißer M, Sander U, Sandrock G, Schwarz N (Herausgeber): Lehrbuch Mikrotechnologie für Ausbildung, Studium und Weiterbildung; Carl Hanser Verlag, München, 2011
- ISO 14644, Norm, DIN-EN-ISO 14644-1:2015: Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche, Beuth Verlag, 2015; online verfügbar: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-14644-1/238330395> (letzter Abruf: 09.01.2023)
- iTiZZimo AG, Case Study: Bühler AG, 2018, online verfügbar: <https://www.itizzimo.com/case-study-buehler/> (letzter Abruf: 13.12.2022)
- Krüger J, Wang L, Verl A, Bauernhansl T: Innovative control of assembly systems and lines, CIRP Annals, Jg. 66, Nr. 2, S. 707–730, 2017
- Loomans MGLC, Molenaar PCA, Kort HSM, Joosten PHJ: Energy demand reduction in pharmaceutical cleanrooms through optimization of ventilation; Energy & Buildings, Jahrgang 202, 2019; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109346>; S. 1–11
- Menz W, Mohr J: Mikrosystemtechnik für Ingenieure; 3. Auflage; WILEY-VCH Verlag, Weinheim, Germany, 2005
- Pinto J: Daimler-Werk auf neuen Pfaden: Mercedes-Benz-Beschäftigte lernen mit smarten Brillen, 2018, online verfügbar: <https://www.hna.de/kassel/mercedes-benz-beschaeftigte-lernen-mit-smarten-brillen-7379965.html> (letzter Abruf: 13.12.2022)
- VDI 5600, Richtlinie, Fertigungsmanagementsystem, Verein Deutscher Ingenieure, 2016; online verfügbar: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-5600> (letzter Abruf: 17.12.2022)

Danksagung: Besonderer Dank gilt dem Dekanat der Fakultät für Maschinenbau der Leibniz Universität Hannover für die Förderung von Energiesparmaßnahmen und Untersuchungen im Rahmen der Förderrichtlinie „Campus Innovationen 2022“.



Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Nachhaltig Arbeiten und Lernen

**Analyse und Gestaltung lernförderlicher
und nachhaltiger Arbeitssysteme
und Arbeits- und Lernprozesse**

69. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

01. – 03. März 2023

GfA-Press

Bericht zum 69. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 01. – 03. März 2023

**Fakultät Maschinenbau, Institut für Berufswissenschaften der Metalltechnik (IBM) und
Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA), Leibniz Universität Hannover**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Sankt Augustin: GfA-Press, 2023
ISBN 978-3-936804-32-4

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle (s. u.) erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© GfA-Press, Sankt Augustin

Schriftleitung: Prof. Dr. Rolf Ellegast

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.

Geschäftsstelle der GfA

Simone John, Tel.: +49 (0)30 1300-13003

Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin

info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de · www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de

Screen design und Umsetzung

© 2023 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de