

Leistungsoptimierte Trocknung und Sauberkeit

Projekt LoTuS: Ansätze zur energetischen Optimierung von Reinigungsanlagen mit integrierter Trocknung

Ghada Elserafi, Adrian von Hayn und Matthias Weigold, Technische Universität Darmstadt

Project LoTuS – Energetic Optimization of Parts Drying

Due to rising quality requirements in the metalworking industry, parts drying has been gaining significance, leading to the increasing importance of reducing the energy consumption of drying processes. Therefore, the LoTuS project investigates different approaches to increase drying efficiency. Along with alternative drying technologies, process digitization is employed to provide sufficient transparency for part-specific drying. Using sensor data, artificial intelligence is utilized for process monitoring. Peak demand is further reduced by implementing load management techniques.

Keywords:

waste heat utilization, process monitoring, low-cost sensors, load management, simulation

Die Bedeutung der Bauteiltrocknung wächst mit steigenden Qualitätsanforderungen im metallverarbeitenden Gewerbe. Damit wächst das Erfordernis, den Energiebedarf von Trocknungsprozessen zu reduzieren. Im Forschungsprojekt LoTuS wird mit verschiedenen Ansätzen die Gestaltung einer Durchlaufreinigungsanlage mit energieeffizientem Trocknungsprozess angestrebt. Neben dem Einsatz alternativer Trocknungstechnologien soll eine Prozessdigitalisierung für einen bauteilspezifischen Prozess Transparenz bieten. Hier kommen, neben umfassender Sensorik, auch Methoden der künstlichen Intelligenz zum Einsatz, um eine praxistaugliche Prozessüberwachung zu entwickeln. Mithilfe eines intelligenten Lastmanagements sollen Lastspitzen der gesamten Anlage weiter gesenkt werden.

Im Dezember 2019 startete das Verbundprojekt LoTuS – Leistungsoptimierte Trocknung und Sauberkeit. Mit einem vielfältigen Projektkon-

sortium aus Forschung und Industrie wird das Projekt bis Dezember 2022 unter der Leitung des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt bearbeitet.

Vor dem Hintergrund des zunehmenden Einsatzes der Bauteiltrocknung in der metallverarbeitenden Industrie ist das übergeordnete Projektziel, die Energieeffizienz des Trocknungsprozesses zu steigern. Hierzu werden verschiedene Ansätze verfolgt, u. a. der Einsatz alternativer Trocknungstechnologien und die Umsetzung einer Abwärmenutzung durch thermische Ver- netzung der Anlagentechnik.

Wozu Trocknen?

Im Rahmen des LoTuS-Projekts wird die Bauteiltrocknung als Folgeschritt der Bauteilreinigung untersucht, welche in jüngster Vergangenheit vor dem Hintergrund der Qualitätssicherung an Bedeutung gewonnen hat. Dabei hat jedoch nicht nur die Bauteilreinigung einen signifikanten Einfluss auf die Bauteilqualität und -lebensdauer, sondern auch die anschließende Trocknung. Insbesondere bei der wässrigen Reinigung, die aufgrund von Richtlinien zur Begrenzung der

Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) am häufigsten zum Einsatz kommt, ist eine anschließende Trocknung oft unerlässlich [1].

Die Bauteiltrocknung bietet an erster Stelle einen erhöhten Schutz vor Korrosion in der Lagerung bzw. in der Folgebearbeitung der Bauteile. Je nach Prozesskette, ist eine Trocknung auch vor bestimmten Prozessschritten (wie z. B. Fügen oder Oberflächenbehandlungen) zwingend erforderlich [2].

Zusätzlich werden Bauteile mithilfe der Trocknung optisch aufgewertet, indem Flecken durch Bestandteile des Reinigungsmediums, Verschmutzungen oder Salzurückstände von hartem Wasser vermieden werden [3].

Ausgangszustand industrieller Trocknung

Obwohl in Deutschland ein Großteil der Trocknungsprozesse nicht dem Maschinenbau zuzuordnen ist, beeinflussen diese aufgrund des signifikanten Anteils der Prozesswärme bis 200 °C den Energiebedarf von Maschinenbauunternehmen [4, 5]. Laut Expertenmeinungen stellen Trocknungsprozesse 10-30 % des Energiebedarfs einer Prozesskette in der Automobil- und Zuliefererbranche dar [6]. Einer im Jahr 2013 durchgeführten Umfrage zufolge sind unter Herstellern und Anwendern von Reinigungs- und Trocknungs-



Ghada Elserafi, M. Sc., M. Sc. ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) an der Technischen Universität Darmstadt.



Adrian von Hayn, M. Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) an der Technischen Universität Darmstadt.



Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold leitet das Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) an der Technischen Universität Darmstadt.

g.elserafi@ptw.tu-darmstadt.de
www.ptw.tu-darmstadt.de

anlagen die Trocknungsverfahren Abblasen, Vakuum- und Heißlufttrocknung am weitesten verbreitet [1].

Im LoTuS-Projekt liegt der Fokus auf der Optimierung von Durchlaufreinigungsanlagen (DLRA), die eine besonders gute Automatisierbarkeit und hohen Durchsatz ermöglichen. Daher gewinnen DLRA in der industriellen Landschaft zunehmend an Bedeutung [1]. Durch die offene Bauweise wird bei DLRA jedoch in Kauf genommen, dass Wärmeverluste in Form von austretenden Schwaden anfallen. Hinzu kommt, dass Trocknungsprozesse größtenteils erfahrungsbasiert ausgelegt werden und meist keine gezielte Regelung der Komponenten umgesetzt wird, was zu einer Über- oder Untertrocknung der Bauteile führt. Zudem sind Anforderungen bezüglich der Zieltrockenheit schwer zu definieren und anhand der Bauteile zu kontrollieren [7, 8].

Ein weiterer wichtiger Stellhebel ist die Wahl der richtigen Technologie. Insbesondere die Heißlufttrocknung und das Abblasen werden nicht zuletzt aufgrund ihrer einfachen Umsetzung häufig eingesetzt, jedoch bestehen hier, unter anderem aufgrund der geringen Energiedichte von Luft, signifikante Energieoptimierungspotenziale [8]. Eigene Messungen an DLRA bestätigen ebenso, dass der hohe elektrische Energiebedarf einer konvektiven Trocknung die theoretisch benötigte Energie zur Verdampfung des Wassers erheblich übersteigt. Für eine höhere Energieeffizienz sollen ferner Faktoren wie Bauteilgeometrie und -werkstoff – insbesondere in Bezug auf Fragestellungen wie Zugänglichkeit oder Kontaktwinkel des Reinigungsmediums – bei der Auslegung des Trocknungsprozesses berücksichtigt werden.

Projektziele

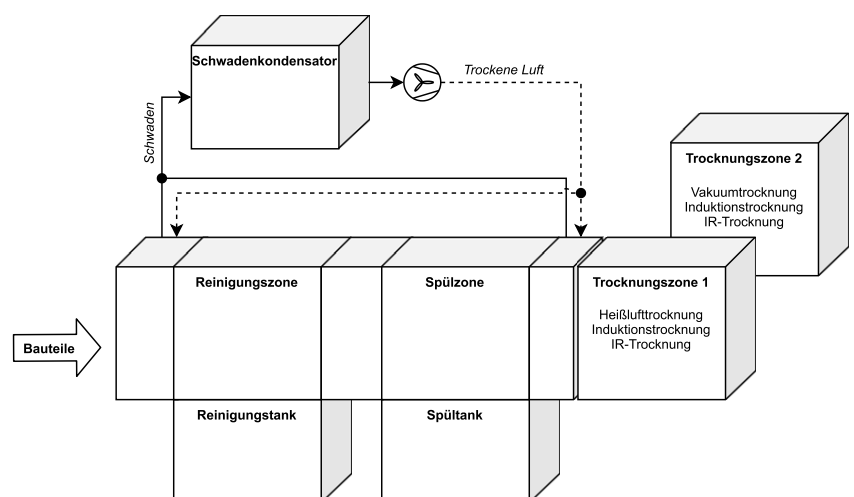
Für eine energieeffiziente Bauteiltrocknung soll im ersten Schritt Transparenz in Bezug auf den Verdampfungsprozess geschaffen werden. Hierzu soll der Verdampfungsprozess zunächst auf Tropfenebene auf Basis thermodynamischer Simulationen untersucht werden. Zudem sollen weitere Simulationen, die den Wärmeübergang und Transportvorgänge betrachten, mehr Einblicke in die Wechselwirkungen der nassen Bauteile mit der Umgebung bieten. Zusätzlich werden alternative Trocknungstechnologien (Infrarot-Trocknung (IR-Trocknung) und Induktionstrocknung) in einer von der BvL Oberflächentechnik GmbH hergestellten Forschungsanlage experimentell untersucht. Diese werden mit den konventionellen Technologien (Heißluft- und Vakuumtrocknung) verglichen und in verschiedenen Kombinationen hinsichtlich ihres Energiebedarfs bewertet. Um die Energieeffizienz auch

unabhängig von der Trocknungstechnologie zu erhöhen, soll eine Prozessüberwachung dazu dienen, die Bauteilfeuchtigkeit während der Trocknung zu ermitteln, womit eine Prozessregelung umgesetzt werden kann. Für eine übertragbare Lösung mit gängiger Sensorik werden auch hierzu Methoden der künstlichen Intelligenz untersucht. Auch die Anlagentechnik wird verbessert, indem Ansätze zur maschineninternen Abwärmenutzung simuliert und schließlich optimiert werden. Da die Trocknung außerhalb der metallverarbeitenden Industrie ein breites Anwendungsspektrum besitzt, sollen die entwickelten Ansätze zur energetischen Optimierung der Trocknung als Querschnittstechnologie dienen und mit einer guten Übertragbarkeit auch den Energiebedarf der Trocknung in weiteren Branchen senken.

Referenzfall

Die Verwendung von realen Bauteil- und Prozessanforderungen erlaubt eine praxisnahe Forschung im Rahmen des Projekts und erleichtert damit einen anschließenden Transfer in die Industrie. Um die Energieeffizienzpotenziale der entwickelten Forschungsanlage (Bild 1) bewerten zu können, wird ein bestehender Referenzprozess als Ausgangszustand betrachtet. Dabei dient eine Heißlufttrocknung bei 70 °C mit einem Volumenstrom von 29 m³/min zur Trocknung des wässrigen Reinigungsmediums. Als Referenzbauteile dienen zwei Bauteile für einen Automobilantriebsstrang. Diese verfügen über unterschiedlich komplexe Geometrien und verschiedene Werkstoffeigenschaften, sodass eine bauteilspezifische Trocknung untersucht werden kann. Die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Geometrien wird somit ermöglicht, wodurch das Anwendungsspektrum erweitert wird. Die Referenzbauteile werden im Projektverlauf auch in der Forschungsanlage gereinigt und getrocknet. Der hierfür notwendige Energiebe-

Bild 1: Schematische Darstellung der DLRA (Quelle: PTW TU Darmstadt).



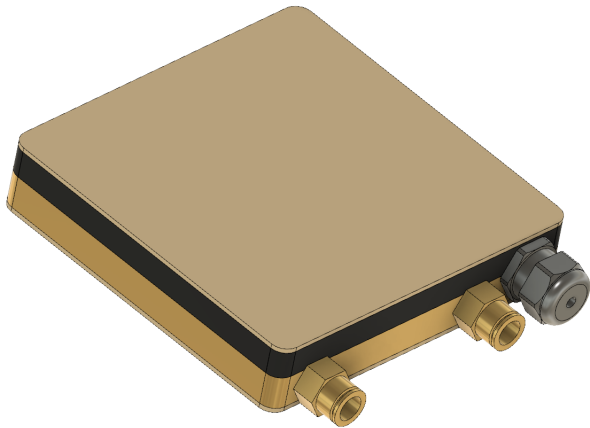


Bild 2: Flachinduktor für die Induktionstrocknung (Quelle: IFF GmbH).

darf wird mit dem des Referenzprozesses verglichen, um effektive Energieeinsparmaßnahmen zu identifizieren. Basierend auf einer detaillierten energetischen Vermessung des Referenzprozesses mit den dazugehörigen Produktionsprozessketten und der Definition des Referenzzustands, wird die Grundlage für die methodische Überführung des Referenzprozesses

in eine Forschungsanlage gelegt. Dazu werden der Einfluss der umgebenden Fertigungskette, der angewandten Fertigungsnormen, der Anforderungen an Bauteil, der Reinigungsschemie und des Trocknungsprozesses sowie sonstige Randbedingungen auf den Reinigungs- und Trocknungsvorgang erfasst. Auf diese Weise sollen eine praxisnahe Forschung und die notwendige Transparenz der Ergebnisse sichergestellt werden.

Alternative Trocknungstechnologien

Bei der Effizienzsteigerung des Trocknungsprozesses spielt die Wahl der Technologie für das vorliegende Bauteil eine signifikante Rolle [8]. In der entwickelten Forschungsanlage werden Heißluft-, Vakuum-, Induktions- und IR-Trocknungsmodul verbaut und mit variierenden Prozessparametern allein und in Kombination untersucht.

Zur Trocknung mittels Induktion wurde von der IFF GmbH für den Anwendungsfall ein Trocknungsmodul, bestehend aus Induktor (Bild 2) und Generator, entwickelt. Die Trocknung basiert hierbei auf dem Prinzip des induktiven Erwärmens, wodurch die zur Wasserverdunstung benötigte Wärme im Inneren des Bauteils generiert wird. Durch die erhebliche Energieausbeute können mit der induktiven Erwärmung hohe Wirkungsgrade erreicht werden [9]. Hierbei muss nur für wenige Sekunden Wärme induktiv im Werkstück erzeugt werden, da aufgrund der hohen erzielten Temperaturen, die Wärmeverteilung innerhalb des metallischen Werkstücks zügig vonstattengeht. Erste Versuche außerhalb der Forschungsanlage haben gegenüber der Heißlufttrocknung bereits Energieeinsparungen von über 60 % unter Laborbedingungen gezeigt. Auch im Hinblick auf die Trocknungszeit weist die Induktionstrocknung Einsparungen von über 15 % auf. Beim Betrieb in der Forschungsanlage müssen jedoch Einflussfaktoren, wie Kopplungs-

abstände und Werkstückpositionierung auf dem Induktor, berücksichtigt werden.

Neben der Induktionstrocknung wird auch die IR-Trocknung hinsichtlich ihrer Energieeffizienz untersucht. Hierbei wurde basierend auf simulativen und experimentellen Untersuchungen der IR-Strahlertyp „Kurzwelle“ der Heraeus Noblelight GmbH (Bild 3) final ausgewählt. Hierbei werden die emittierten Wellenlängenmaxima der IR-Strahler mit dem Ziel einer maximalen Absorption durch die metallischen Bauteile ausgelegt. Insbesondere durch die direkte Erwärmung des Werkstücks ohne Erwärmung der umgebenden Luft ist mit Energieeinsparungen zu rechnen [10]. Bei einer kombinierten Trocknung mit IR-Strahlung und Konvektion besteht ein Energieeinsparpotenzial von über 50 % gegenüber einer rein konvektiven Trocknung. Für den Einsatz der IR-Trocknung müssen jedoch in der weiteren Entwicklung Aspekte, wie maximale Bauteiltemperaturen, optische Zugänglichkeit und Trocknungszeiten, berücksichtigt werden.

Parallel zur Entwicklung und Optimierung alternativer Trocknungstechnologien sollen die Heißluft- und Vakuumtrocknung ebenfalls energetisch verbessert werden. Simulativ und experimentell werden Einflussgrößen auf die Trocknungseffizienz untersucht und Betriebsparameter für den Anwendungsfall optimiert. Dabei werden zusätzlich wichtige Prozessrandbedingungen, wie Reinigungstemperatur und -chemie, ebenfalls analysiert und unter Berücksichtigung von Sauberkeits- und Zeitvorgaben möglichst trockenungsfördernd ausgelegt. Zur Maximierung der Energieeffizienz werden Kombinationen verschiedener Trocknungstechnologien untersucht, um Synergien zu nutzen.

Abwärmennutzung

Zur energetischen Optimierung der Forschungsanlage soll die anfallende Abwärme verschiedener Nebenaggregate fluidgebunden gesammelt und anderen Prozessen mit Wärmebedarf zugeführt werden.

Dazu werden zunächst die Wärmesenken und -quellen der DLRA identifiziert. Daraus werden, unter Berücksichtigung von Randbedingungen, verschiedene Abwärmennutzungstopologien erarbeitet und simulativ hinsichtlich ihrer Energieeinsparungen bewertet. Auf Basis der Ergebnisse wird ein energieeffizientes Abwärmennutzungskonzept in der DLRA umgesetzt und validiert. Eine wesentliche Rolle spielt hierbei ein Schwadenkondensator mit internem Kälteaggregat. Zusätzlich versorgt das Kälteaggregat weitere maschineninterne Komponenten (wie z. B. Vaku-

Literatur

- [1] Bilz, M.: Markt- und Trendanalyse in der Industriellen Teilereinigung 2012. Fraunhofer-Allianz Reinigungstechnik. Berlin 2013.
- [2] Potenzial für kosten- und qualitätsoptimierte Prozesse. In: JOT Journal für Oberflächentechnik 50 (2010) 5, S. 50-53.
- [3] Bürkle, G.: Reinigung und Reiniger in der Metallindustrie. In: Technische Akademie Esslingen (TAE). URL: www.tae.de/uploads/media/Reinigung_und_Reiniger_in_der_Metallindustrie_-_TAE.pdf, Abrufdatum 22.02.2021.
- [4] Seefeldt, F.; Wünsch, M.; Matthes, U.; Baumgartner, W.: Potenziale für Energieeinsparung und Energieeffizienz im Lichte aktueller Preisentwicklungen. Endbericht 18/06. Basel Berlin 2007.
- [5] Nast, M.; Frisch, S.; Pehnt, M.; Otter, P.: Prozesswärme im Marktanreizprogramm: Zwischenbericht zu Perspektivische Weiterentwicklung des Marktanreizprogramms (2010). URL: https://elib.dlr.de/82173/1/Prozesswaerme_im_MAP.pdf, Abrufdatum 22.02.2021.
- [6] Daimler AG; Henkel AG; PTW TU Darmstadt; TTD TU Darmstadt; MAFAC GmbH: Workshop Energieeffiziente Bauteilreinigung. Sitzungssprotokoll. Darmstadt 2017.
- [7] Durkee, J. B.: Management of industrial cleaning technology and processes. 1st Edition. Amsterdam 2006.

umpumpe und Induktionstrocknung) mit der nötigen Kälte und dient so als Wärmepumpe zur Erhöhung der Abwärmtemperatur. Die rekuperierte Wärme auf hohem Temperaturniveau soll anschließend innerhalb der Anlage wieder genutzt werden. Hier bietet vor allem die Tankbeheizung aufgrund des hohen Leistungsbedarfs ein hohes Potenzial zur Abwärmenutzung. Neben der Tankbeheizung werden weitere Wärmesenken innerhalb der DLRA simulativ und experimentell untersucht. Hier sind auf Basis erster Simulationen Energieeinsparungen von mindestens 15 % zu erwarten. Zusätzlich können 13 kW der nicht maschineninternen nutzbaren Abwärme fluidgebunden an das Gebäudenetz abgeführt und genutzt werden.



Prozessüberwachung

Für einen bauteilspezifischen und effizienten Trocknungsprozess sind zum einen Einflüsse verschiedener Prozessparameter und -randbedingungen von Bedeutung, zum anderen bedarf es an Informationen über die aktuelle Bauteilfeuchtigkeit während des Prozesses [10]. Übergeordnetes Ziel ist dabei die Umsetzung einer Prozessregelung hinsichtlich der Bauteilfeuchtigkeit.

Zur Messung der Materialfeuchtigkeit von Feststoffen haben sich in vielen Branchen verschiedene Methoden etabliert. Direkte Methoden, wie z. B. die Thermogravimetrie, sind aufgrund ihres zeitlichen Aufwands für eine Prozessregelung meist nicht zweckmäßig. In diesem Fall sind indirekte Methoden, die schnelle Ergebnisse liefern, besser geeignet. Dazu gehören insbesondere Methoden, bei denen aus elektrischen Größen, wie Leitfähigkeit und Kapazität des Materials, Aussagen über die Feuchtigkeit ermöglicht werden. Ein weiterer Ansatz zur Feuchtigkeitsmessung liegt in der Überwachung von Größen, wie Materialtemperatur oder Abluftfeuchte, die erfahrungsgemäß mit der Materialfeuchtigkeit korrelieren [10].

Für den vorliegenden Anwendungsfall werden verschiedene Ansätze zur Ermittlung der Bauteilfeuchtigkeit in Echtzeit erprobt. Zunächst werden indirekte Methoden, die mit metallischen, beweglichen Bauteilen und einem kontinuierlichen Trocknungsprozess vereinbar sind, entwickelt. Hierzu werden u. a. Prinzipien der Spektroskopie und der Pyrometrie untersucht. Für eine Übertragbarkeit in die Industrie werden aber auch mithilfe von Low-Cost-Sensorik (z. B. Temperatur-, Druck-, Luftfeuchtigkeitssensoren) sowie Machine Learning (ML)-Algorithmen Ansätze entwickelt, mit denen die Bauteilfeuchtigkeit in Echtzeit geschätzt werden soll.

Intelligentes Lastmanagement

Neben der Steigerung der Energieeffizienz ist die Umsetzung eines Lastmanagements in DLRA aus verschiedenen Gründen interessant. Aufgrund der hohen elektrischen Leistungsaufnahme der Tankheizung, Lufterwärmung und Schwadenkondensation muss sichergestellt werden, dass die Lastgänge mit der vorhandenen technischen Infrastruktur kompatibel sind. Im Zuge der Energiewende werden zudem die flexible Anpassung des Energiebedarfs an ein volatiles Leistungsangebot aus erneuerbaren Energien und resultierende Strompreisschwankungen zunehmend relevant [11].

Zur Anpassung des elektrischen Lastgangs von Produktionsmaschinen werden zwei wesentliche Maßnahmen verfolgt: die Reduktion von Lastspitzen und deren zeitliche Verschiebung [11]. In LoTuS liegt der Fokus auf maschinenbezogenen, softwarebasierten Lösungen. Zu diesen gehört bspw. die Definition von Abhängigkeiten auf der Anlagensteuerung, mit denen der Parallelbetrieb bestimmter Verbraucher ausgeschlossen wird [12]. Ein weiterer Ansatz ist die bedarfsgerechte Ansteuerung verschiedener Verbraucher je nach Betriebszustand der Anlage [13]. Um die durch die Medientanks vorhandene thermische Trägheit der DLRA zu nutzen, können Lastspitzen auch in Abhängigkeit von prognostiziertem Energieangebot oder Energiepreissignalen verschoben werden [14].

Diese und weitere Lösungsansätze werden für den Use-Case entwickelt und an der DLRA validiert. Damit soll neben einer energieeffizienten Trocknung auch mit einem energieflexiblen Anlagenbetrieb eine industrietaugliche und zukunftsfähige Anlage ausgelegt werden können.

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts Leistungsoptimierte Trocknung und Sauberkeit (LoTuS) (Förderkennzeichen 03EN2026), das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert und vom Projektträger Jülich (PtJ) betreut wird.

Schlüsselwörter:

Abwärmenutzung, Prozessüberwachung, Low-Cost Sensorik, Lastmanagement, Simulation

Bild 3: Strahlertyp Kurzwelle für die IR-Trocknung (Quelle: Heraeus Noblelight GmbH).

- [8] Bles, M.; Kessler, A.: Energieeffizienz in der Industrie. 2. Auflage. Berlin 2013.
- [9] Paul, S.; Paul, R.: Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 2: Elektromagnetische Felder und ihre Anwendungen. 2. Auflage. Bremen Hamburg 2019.
- [10] Mujumdar, A. S. (Hrsg): Handbook of industrial drying. 4th Edition. Boca Raton, USA 2015.
- [11] Schraml, P.: Methode zur Reduktion maximaler elektrischer Lasten spanender Werkzeugmaschinen. Technische Universität Darmstadt. Dissertation. Aachen 2018.
- [12] Abele, E.: Gemeinsamer Schlussbericht zum Projekt ETA-Fabrik: Energieeffiziente Fabrik für interdisziplinäre Technologie- und Anwendungsforschung. Darmstadt 2019.
- [13] Denkena, B. (Hrsg); Garber, T. (Hrsg): NCplus+ Prozess- und wertschöpfungsorientiert gesteuerte Werkzeugmaschine: Abschlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt (Berichte aus dem IFW). Garbsen 2013.
- [14] Weigold, M.; Hanson, J.; Rinderknecht, S.; Panten, N.; Walther, J.; Grosch, B.: Gemeinsamer Schlussbericht zum Projekt PHI-Factory: Flexible elektrische Fabriknetzführung - zur systemübergreifenden Steigerung der Energieeffizienz unter den Anforderungen zukünftiger Verteilnetze mit regenerativer Energieerzeugung: Förderbereich: Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD): Laufzeit: 01.12.2016-31.03.2020. Darmstadt 2020.