

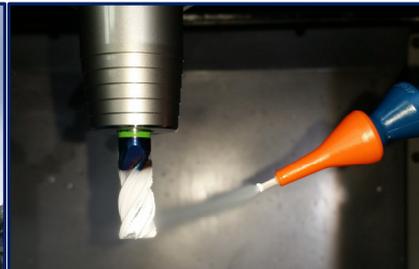


FRIEDRICH-ALEXANDER  
UNIVERSITÄT  
ERLANGEN-NÜRNBERG



Lehrstuhl für Ressourcen- und  
Energieeffiziente Produktionsmaschinen

# Jahresbericht 2017



FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG  
Department Maschinenbau  
Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

---

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Vorwort .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Lehre .....</b>	<b>3</b>
2.1	Lehrveranstaltungen im Wintersemester 2016/17 .....	3
2.2	Lehrveranstaltungen im Sommersemester 2017 .....	3
2.3	Abgeschlossene wissenschaftliche Arbeiten .....	4
2.4	Exkursion.....	6
<b>3</b>	<b>Forschungsprojekte .....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Veröffentlichungen .....</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Mitarbeiter.....</b>	<b>12</b>

# 1 Vorwort

Mit dem vorliegenden Tätigkeitsbericht blicken wir auf ein erfolgreiches Jahr 2017 zurück. Einen wesentlichen Meilenstein stellt dabei der Einzug in unsere neuen Räumlichkeiten in der Fürther Uferstadt dar. Kurze Wege zwischen Technikum und individuellen Arbeitsplätzen erlauben es uns in diesem Umfeld, im Team zusammenzuarbeiten, innovative Fragestellungen zielorientiert weiter zu entwickeln und praxisorientiert Lehrveranstaltungen durchzuführen.

Darüber hinaus freuen wir uns, dass wir aus eigenen Ideen erfolgreich erste drittmittelgeförderte Projekte beginnen können. Das Projekt „Machine Learning@Operations“, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, stellt hier den Anfang dar in der Arbeitsgruppe Ressourceneffiziente Produktionssysteme. Im Bereich der mechanischen Bearbeitung und Entgratung sind zahlreiche Vorarbeiten geleistet worden, die in 2017 zu neuen Projektanträgen geführt haben. Basierend auf der Expertise aus abgeschlossenen Projekten steht hier die Weiterentwicklung kryogener Technologien zur Prozessunterstützung im Mittelpunkt, weitere Themenschwerpunkte sind in Planung.

Im Bereich der Lehre sind die Vorlesungen des Lehrstuhls fest in das Curriculum der Studierenden integriert. Das Interesse an den vermittelten Inhalten zeigt sich in einer konstant hohen Hörerzahl. Ein besonderer Dank gebührt den Unternehmen Eugen Wexler GmbH & Co. KG und Robert Bosch GmbH Bamberg, die praxisorientierte Übungsveranstaltungen intensiv unterstützt haben.

Als neue Mitarbeiter konnten wir zu Beginn des Jahres Frau Shu Ju und Herrn Mario Stange begrüßen, die uns in der Arbeitsgruppe Produktionssysteme und im Technikum unterstützen und für 2018 sind bereits die ersten Neueinstellungen geplant. Natürlich gebührt auch den studentischen Hilfskräften Dank für die geleistete Arbeit.

Für 2018 sind bereits zahlreiche Aktivitäten zu neuen Projekten, zur Lehre und Weiterentwicklung unseres Technikums geplant. Wir freuen uns bereits jetzt darauf, Ihnen zu Beginn des nächsten Jahres davon zu berichten. Natürlich gebührt unseren Freunden und Unterstützern ebenfalls besonderer Dank, besonders möchte ich hier Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein für die Unterstützung im Rahmen des NCT hervorheben.

An dieser Stelle möchte ich mich besonders noch einmal für die erfolgreiche geleistete Arbeit bei allen REP Mitarbeitern bedanken, ohne die diese Erfolge nicht möglich gewesen wären. Weiter so!

Nico 

## 2 Lehre

### 2.1 Lehrveranstaltungen im Wintersemester 2016/17

Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt. Ing. Nico Hanenkamp  
Bearbeitungssystem Werkzeugmaschine (WZM)  
Effizienz im Fabrikbetrieb und operative Exzellenz (OPEX)  
Production Technology (PT2)

M. Eng. Sven Amon  
Advanced Seminar on International & Sustainable Production (ASISP)

M. Sc. Daniel Gross  
Production Technology 2 Exercises

M. Sc. Matthias Mühlbauer  
Effizienz im Fabrikbetrieb und operative Exzellenz – Übung

### 2.2 Lehrveranstaltungen im Sommersemester 2017

Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt. Ing. Nico Hanenkamp  
Effizienz im Fabrikbetrieb und operative Exzellenz (OPEX)  
Produktionsprozesse der Zerspanung (ProdZ)  
Produktionstechnik II  
Ressourceneffiziente Produktionssysteme (REPs)

M. Eng. Sven Amon  
Advanced Seminar on International & Sustainable Production (ASISP)

M. Sc. Daniel Gross  
Produktionsprozesse der Zerspanung (ProdZ) – Übung  
Produktionstechnik II – Tutorium

M. Sc. Shu Ju  
Effizienz im Fabrikbetrieb und operative Exzellenz (OPEX) – Übung

M. Sc. Matthias Mühlbauer  
Ressourceneffiziente Produktionssysteme (REPs) – Übung

## 2.3 Abgeschlossene wissenschaftliche Arbeiten

### Bachelorarbeiten

Name	Thema
Ferguson, Nikolas	Theoretical investigation of the influence of different chamber geometries on the agglomeration capacity of carbon dioxide
Meier, Trixi	Grundlegende Untersuchung zum Einsatz kryogener Medien für die Innenbearbeitung und Entgratung von Vergütungsstahl

### Projektarbeiten

Name	Thema
Baumann, Marc	Entwicklung eines Leitfadens zur statistischen Versuchsplanung und -auswertung spanender Fertigungsprozesse
Bigelmaier, Matthias	Theoretische und praktische Untersuchung zur Verfahrenshybridisierung der Entgratung und Reinigung metallischer Werkstoffe mit CO <sub>2</sub> -Technologie
Blauhöfer, Markus	Machbarkeitsuntersuchung für die Verwendung amorpher Kohlenstoffschichten in der Stahlzerspanung unter Einsatz kryogener Medien
Bozkurt, Ali	Entwicklung einer Systematik zur Bestimmung minimaler Kühlleistungen
Cöster, Tamara	Analyse von Qualifizierungsmethoden und des Qualifizierungsangebots zum Thema Ressourceneffizienz zur Definition der Anforderungen bei der Qualifizierung junger Erwachsener
Deuerlein, Nina	Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes zur Durchführung einer kryogenen Minimalmengenschmierung durch eine Werkzeugmaschinenspindel
Foltis, Florian	Entwicklung und Validierung eines Energiemanagementkonzepts für die Energieplanung ressourceneffizienter Produktionsanlagen
Graner, Melina	Potentialanalyse zum Einsatz von intelligenten Diagnosesystemen für das Energiemonitoring in der Fertigung
H., T.	Entwicklung, Aufbau und Erprobung eines Versuchsstandes zur Drehbearbeitung auf einem Fräsbearbeitungszentrum

---

Heublein, Marcel	Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes zur Durchführung einer kryogenen Minimalmengenschmierung durch eine Werkzeugmaschinen­spindel
Jung, Timo	Entwicklung Prozessbibliothek zur ganzheitlichen Optimierung spanender Prozesse
Kriegel, Thomas	Analogien HD Entgraten und CO2 Entgratung
Memic, Meric	Erstellung eines Mobilitätskonzepts für ein kryogenes Versorgungssystem zur "Plug-and-Play-Anwendung" in der spanenden Industrie
Miereisz, Maximilian	Analyse von Ressourcenmonitoringinstrumenten und Ableitung von Handlungsempfehlungen über deren Einsatz zur systematischen Steigerung der Transparenz des Ressourcen­verbrauchs im Produktionsprozess
Ostrowicki, Nicolai	Einsatz kryogener Prozesskühlung in Kombination mit Minimalmengenschmierung bei der Fräsbearbeitung von Ti-6Al-4V
Preinl, Konstantin	Entwicklung und Validierung eines Energiemanagementkonzepts für die Energieplanung ressourceneffizienter Produktionsanlagen
Reuss, Christopher	Energieanalyse einer Entgratungs- und Reinigungszelle zur Prognose der Lastaufnahme
Scheer, Marcus	Energiewertstromanalyse Entgratung und Reinigung bei Getrag Bad Windsheim
Schwager, Maximilian	Optimierung des Lötprofils einer Überdruck-Lötofenanlage durch Fehleranalyse der Leiterplatten
Strätz, Nicole	Energetische Untersuchung des Zerspanvorgangs von Werkzeugmaschinen zur Steigerung der Prognosegenauigkeit des Energiebedarfs
Vogel, Alexander	Identifikation von Schlüsselkriterien innerhalb des Planungsprozesses von Produktionssystemen und Produktionsmaschinen hinsichtlich deren Energieverbrauch
Zialkowska, Zuzanna	Ganzheitliche ressourcenbasierte Bilanzierung von Kühlschmierstoffen für industrielle Bearbeitungsprozesse

## Masterarbeiten

Name	Thema
Antlitz, Viktor	Entwicklung eines Konzepts zur energetischen Optimierung der bestehenden raumluftechnischen Anlagen eines sensiblen Produktionsbereichs
Buch, Arvid	Standardisierung und Optimierung von Projektabläufen innerhalb der Einzelteil- und Kleinserienfertigung eines Prototypenlabors
Cöster, Tamara	Entwicklung und Durchführung eines Konzepts für den Einsatz von Maschinellen Lernen zur Vorhersage der Produktqualität
Gessner, Philipp	Realisierung eines digitalen Energieausweises für Lagerkomponenten
Gleich, Dominik	Entwicklung eines Standardverfahrens zur Prüfung der Energieeffizienz einer Spritzgießanwendung
Haberhauer, Tobias	Optimierung eines Versuchsstandes zur kombinierten Zuführung von CO <sub>2</sub> und Minimalmengenschmierung
Ostrowicki, Nicolai	Randzonenbeeinflussung bei Drehprozessen
Strobl, Philipp	Ermittlung des Marktvolumens und Ableitung eines Businessplans zur kryogenen Zerspanung aus Sicht der deutschen Werkzeugmaschinenhersteller
Wolfrum, Sandra	Systematic Segmentation Process of Value Streams for Tool Manufacturing

### 2.4 Exkursion

Im Rahmen der Vorlesung „Bearbeitungssystem Werkzeugmaschine“ fand zum Ende der Vorlesungszeit im Wintersemester 2017/2018 eine Exkursion zur Firma WEILER Werkzeugmaschinen GmbH in Emskirchen statt. Das Unternehmen ist mit bislang über 150.000 verkauften Einheiten Marktführer im deutschsprachigen Raum für konventionelle und zyklengesteuerte Präzisions-Drehmaschinen. Am Standort sind ca. 250 Mitarbeiter für nationale und internationale Kunden tätig.

Ziel der Veranstaltung war es, den Studierenden die Herausforderungen bei Auswahl und Konstruktion von Werkzeugmaschinen an praktischen Problemstellungen zu verdeutlichen. Darüber hinaus wurden die Fertigungs- und Montageprozesse in der Fabrik präsentiert und so der gesamte Material- und Informationsfluss transparent. Die Geschäftsführung von WEILER und Mitarbeiter verschiedener Abteilungen haben sich in außerordentlicher Weise für diese Veranstaltung engagiert, wofür wir an dieser Stelle noch einmal unseren herzlichen Dank aussprechen möchten.

### 3 Forschungsprojekte

## KryoLEAN - Nutzung CO<sub>2</sub>-basierter, kryogener Technologie zur Integration von Zerspanung und Reinigung

Förderung: Green Factory Bavaria

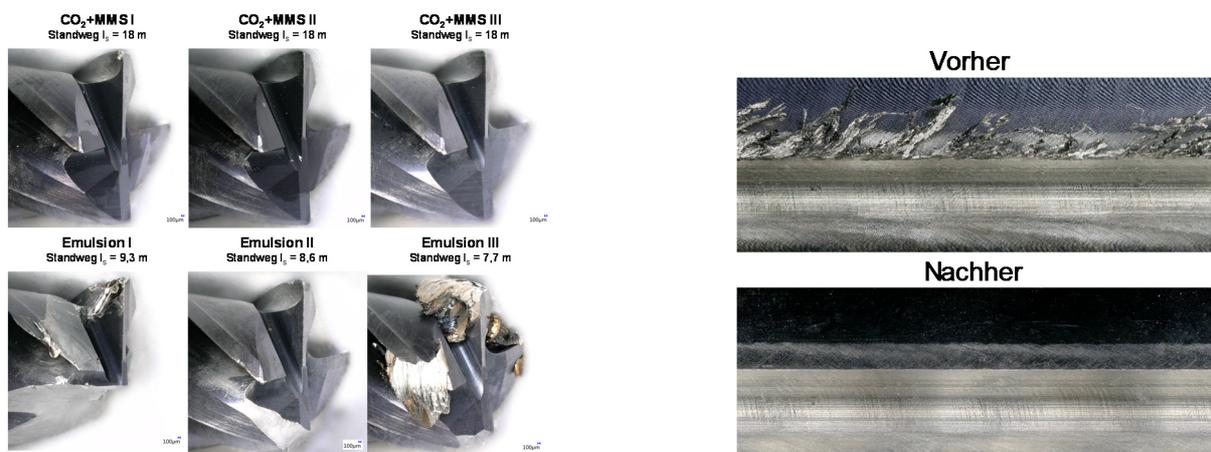
Telefon: +49 (0) 911 / 65078 64814

Ansprechpartner: Daniel Gross, M.Sc.

E-Mail: daniel.gross@fau.de

Das Ziel des Projekts war die Entwicklung eines Demonstrator-Kühlschmierstoffsystems zur Kombination von kryogener Kühlung und Minimalmengenschmierung (MMS) in Form einer 1-Kanal-Versorgung, welche zur Integration in existierende Werkzeugmaschinen genutzt werden kann. Durch dieses System soll die Steigerung der Kühlschmierstoffflexibilität für Werkzeugmaschinen forciert werden, da es sowohl eine konventionelle Kühlschmierstoffzufuhr als auch die Versorgung mit reinem CO<sub>2</sub> und eines CO<sub>2</sub>/MMS-Gemischs. Die Möglichkeit eine Werkzeugmaschine mit diesen Medien auszustatten zielt auf eine erhöhte Produktivität durch die Minimierung des Rüst- und Transportaufwands von Werkstücken ab. CO<sub>2</sub> wird bereits in den einzelnen Prozessschritten der Zerspanungsproduktion eingesetzt. Hierzu zählen neben der eigentlichen wertschöpfenden.

Hierzu zählen neben der eigentlichen wertschöpfenden Formgebung durch Zerspanungswerkzeuge auch nichtwertschöpfende Folgeprozesse wie die Entgratung und Reinigung. Durch die erfolgreiche Umsetzung der 1-Kanal-Zufuhr kann die Werkzeugmaschine zukünftig als hybrides Bearbeitungszentrum eingesetzt werden und in-situ Werkstücke endbearbeiten. Eine höhere Energieeffizienz durch Reduzierung von Kühlschmierstoffen und Reinigungsmedien sowie eine gesteigerte Flächeneffizienz sind die Folge. Hierzu sollte weiterhin der Aufbau einer Wissensdatenbank zur Bewertung des Einsatzes der kryogenen Technologie in Abhängigkeit von Prozesskette und zu bearbeiteten Werkstoffen erfolgen.



Standzeitverlängerung durch kryogene Kühlung (links), kryogene Entratung (rechts)

## CryoRem - Kryogene Entgratung und Reinigung von metallischen Werkstoffen

Förderung: Eigenförderung

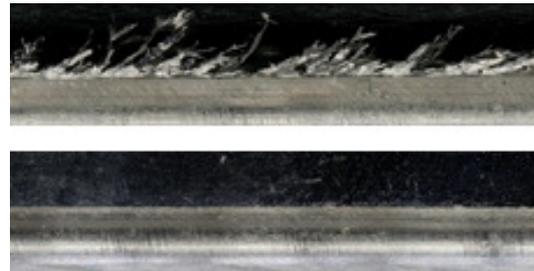
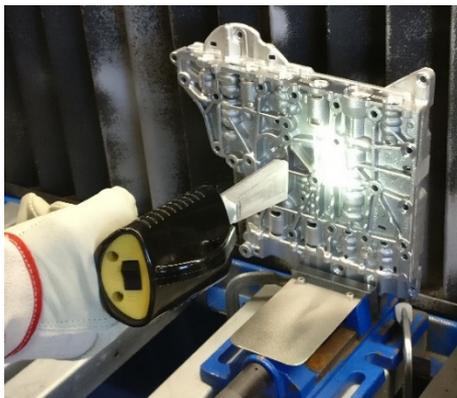
Telefon: +49 (0) 911 / 65078 64817

Ansprechpartner: Sven Amon, M.Eng.

E-Mail: sven.amon@fau.de

Konventionelle Prozessketten der spanenden Bearbeitung erfordern nach der Formgebung nicht wertschöpfende Prozesse zur Entgratung. Der Entgratungsprozess kann die Herstellkosten bis zur Unwirtschaftlichkeit verschlechtern. Für viele Bauteile haben sich vor allem Hochdruck- und thermische Verfahren mit aufwendiger Anlagentechnik etabliert. Zwei vom Lehrstuhl REP durchgeführte Energiewertstromanalysen bei Industriepartnern haben gezeigt, dass zur Entgratung eine vergleichbare Wirkarbeit wie zur spanenden Formgebung notwendig sein kann. Des Weiteren müssen Werkstücke gereinigt und Reststoffe als Sondermüll aufbereitet werden. Diese Faktoren motivieren zur Entwicklung alternativer, ressourceneffizienter Prozessketten.

Bei der CO<sub>2</sub>-basierten, kryogenen Entgratungstechnologie werden feste CO<sub>2</sub>-Partikel aus der flüssigen Phase heraus generiert und auf die Grate beschleunigt (Abb. unten links). Als Kuppelprodukt verfahrenstechnischer Prozesse kann CO<sub>2</sub> treibhausneutral weiterverwertet werden. Die festen Partikel sublimieren, so dass ressourcenintensive Trocknungs- und Reinigungsprozesse eliminiert werden können. Innerhalb der Tätigkeit wird die anwendungsorientierte Entwicklung kryogener, CO<sub>2</sub>-basierter Entgratungsstrategien für metallische Werkstoffe untersucht und vorangetrieben. Dafür wird die Technologie innerhalb eines Prüfstands automatisiert und eine Grat-Wissensdatenbank geschaffen. Teilziele sind dabei die systematische Identifikation von Gratbildern und die Festlegung der Prozessfenster (Strahlparameter und dynamische Gratbeanspruchungen) zur Gratentfernung.



Manuelle Kryogene Entgratung (links), Ergebnis der Entgratung (rechts)

## Green Belt ML@Operations - Maschinelle Lernverfahren für spezifische Anwendungsfälle in Produktion und Qualität

Förderung: Drittmittel, BMBF

Telefon: +49 (0) 911 / 65078 64818

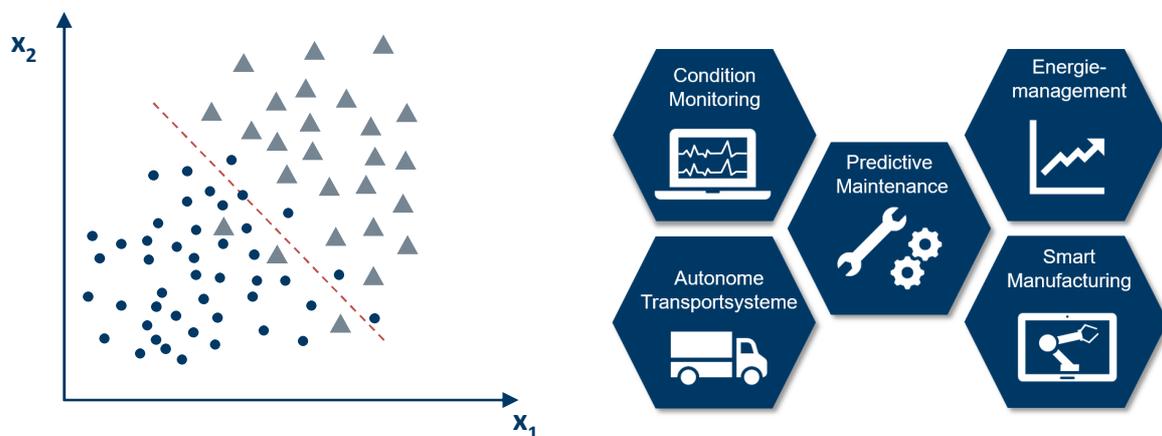
Ansprechpartner: Matthias Mühlbauer, M.Sc.

E-Mail: matthias.muelbauer@fau.de

Durch Technologien im Kontext von Industrie 4.0 können produktionsnahe Daten kurzzyklisch erfasst und aggregiert werden. In Anbetracht der dadurch zunehmenden Datenkomplexität und des Datenvolumens stehen Mitarbeiter jedoch vor der Herausforderung, diese Daten zu analysieren und zu interpretieren sowie die Nachhaltigkeit der eingeleiteten Maßnahmen zu bewerten, wobei die kognitiven Fähigkeiten oft an ihre Grenzen stoßen.

Verfahren des Maschinellen Lernens (ML) können hier neue Formen der Arbeitsteilung zwischen Software als Entscheidungsvorbereiter und Mitarbeitern als Problemlöser ermöglichen. In der industriellen Praxis werden ML-Verfahren meist situativ und von Experten entwickelt eingesetzt, so dass der Aufwand entsprechend hoch ist. Des Weiteren verfügen kleine und mittlere Unternehmen (kmU) häufig nur über wenig Ressourcen und Expertise, um die Potenziale zu nutzen.

Ziel dieses Projektes ist es, ein Qualifizierungskonzept zu entwickeln und durchzuführen, um den Kenntnisstand bzgl. ML-Verfahren von Mitarbeitern im Produktions- und Qualitätsbereich sowie von Studierenden mit diesen Schwerpunkten gezielt zu erweitern. Die Teilnehmer entscheiden sich dabei entweder für die Spezialisierungsrichtung "Produktion" oder "Qualität". Jede Spezialisierungsrichtung besteht aus vier praxisorientierten Anwendungsfällen, in denen die Teilnehmer geeignete ML-Verfahren kennenlernen und in konkreten individuellen Projekten mit ca. 10 Wochen Dauer anwenden. Die Anwendungsfälle orientieren sich an bestehenden Geschäftsprozessen und Problemstellungen in der Industrie zum Qualitätsmanagement und zur Optimierung von Produktionsprozessen, wodurch ein einfacher Transfer und eine hohe Akzeptanz auf industrieller Seite sichergestellt werden sollen.



Klassifikation von Datensätzen (links) und typische Anwendungsbereiche-ML (rechts)

## Steigerung der Energieeffizienz in Werkzeugmaschinen durch Reduzierung von Oberschwingungen

Förderung: Eigenförderung

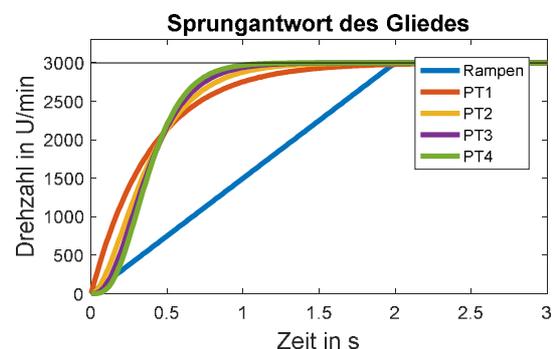
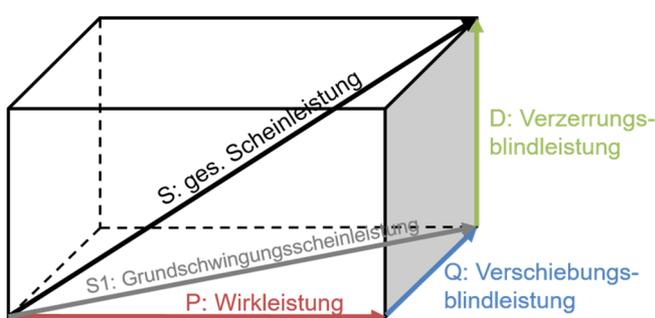
Telefon: +49 (0) 911 / 65078 64816

Ansprechpartner: Shu Ju, M.Sc.

E-Mail: shu.ju@fau.de

Seit einigen Jahren gibt es eine starke weltweite Tendenz zur Energieeffizienz, die durch den zunehmenden Einsatz von Leistungselektronik realisiert wird. Nicht lineare elektrische Baugruppen erzeugen nichtsinusförmige Signale, die sich über das gesamte Netz verbreiten. Nicht linearer Strom enthält Frequenzkomponenten, die Vielfache der Frequenz des Stromversorgungssystems sind. Diese Frequenzkomponenten werden im Allgemeinen als Oberschwingungsströme bezeichnet. Aus allen Produkten wo Spannung und Strom nicht die gleiche Frequenz haben entsteht Oberschwingungsblindleistung, welche im Gegensatz zu Grundschwingungsblindleistung, auch bekannt als Verschiebungsblindleistung (Abb. unten links), nicht mit Energiespeicherung verknüpft und nicht durch Kondensatoren kompensiert werden kann. Oberschwingungsblindleistung verursacht unnötige Netzbelastung, Zerstörung und Überhitze in Motoren, Maschinenausfälle und kürzere Lebenszeiten.

Frequenzumrichter als eine typische nichtlineare Komponente ist u.a. die Hauptursache von der Entstehung der Oberschwingungen in WZM. Generell verfügen Anfahrtsignale in WZM über eine Rampenform oder eine leicht aufgeweichte Rampenform. Mit Hilfe von Zeitverzögerungselementen (PT-Glieder) werden die Anfahrtsignalkurven von Startzeitpunkt bis zum Erreichen der Zieldrehzahl ohne sprunghafte Änderung geglättet (Abb. unten rechts). Infolgedessen entstehen im Frequenzbereich weniger Oberschwingungen des Basissignals des drehenden Motors. Dazu ist es steuerungsseitig notwendig das von der SPS ausgesendete Anfahrtsignal der Motordrehzahl anzupassen. Es ist keine zusätzliche Software oder Hardware nötig. Als Ergebnis konnten wir erreichen, dass die Blindleistung um bis zu 21% und die zur Verfügung gestellte Wirkleistung um bis zu 12% gesteigert werden konnte.



Zeigerdiagramm der Leistungen (links), zeitverzögerte Anregelstrategie (rechts)

## 4 Veröffentlichungen

Hanenkamp, N., Gessner, P., Henkel, R.:

Realisierung eines digitalen Energieausweises für industrielle Erzeugnisse

In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112 (2017), Heft 10, S. 695-698.

Gross D., Hanenkamp N., Heinz A., Ebner M.:

Assessment of Process Improvement Potential of Carbon Dioxide as a Cryogenic for Machining Operations

In: Applied Mechanics and Materials Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production Vol. II (2017), S. 151-158

Gross D., Ferguson N., Amon S., Hanenkamp N.:

Theoretical Investigation of the Influence of Different Chamber Geometries on the Agglomeration Capacity of Carbon Dioxide

In: Applied Mechanics and Materials 871 (2017), S. 169-175

## 5 Mitarbeiter



Sven Amon



Daniel Gross



Nico Hanenkamp



Shu Ju



Martina Konein



Matthias Mühlbauer



Nicolai Ostrowicki



Mario Stange

### **Lehrstuhlinhaber**

Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt. Ing. Nico Hanenkamp

### **Wissenschaftliche Mitarbeiter**

Sven Amon, M. Eng.

Daniel Gross, M. Sc.

Shu Ju, M. Sc.

Matthias Mühlbauer, M. Sc.

Nicolai Ostrowicki, M. Sc.

### **Nichtwissenschaftliche Mitarbeiter**

Martina Konein

Mario Stange