

## **Impressum**

Herausgeberin: Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW,  
Hochschule für Technik, Institut für Automation  
Projektleitung und Redaktion: Rolf Isler, Jadwiga Gabrys, Sandro Nydegger  
Layout: Ben Newton, digitworks.ch  
Erscheinungsweise: jährlich  
Druck: Abächerli Media AG  
Auflage: 600 Exemplare

# Inhalt

---

## 3 Editorial

---

### Moderne Methoden der Regelungstechnik

---

#### 4 Kompakte und effiziente Antriebseinheiten mit Vektor-Regelung

Sebastian Elber

#### 8 Modellierung, Identifikation und Regleroptimierung für Kabelextrusionsmaschinen

Jürg Peter Keller

#### 12 Regelung eines Labor-Rührkessels für Scale-up

Jérôme Blum

---

### Mechatronische Systeme

---

#### 16 Dynamische Drehgestell-Prüfstandstechnik

Claudio Birrer

#### 20 Mikrogenerator zur Energiegewinnung aus beliebig langsamen Rotationen für smarte Drehwinkelsensoren

Hans Gysin

#### 22 Energieeffizientes Design von Strassenwalzen

Dominik Wiss

#### 26 Entwicklung eines innovativen Online-Diagnosesystems für die zustandsbasierte Wartung von Produktionsanlagen

David Zogg

---

### Weitere Fachgebiete

---

#### 30 Vollautomatische, robotergestützte Schleifzelle

Max Edelmann

#### 32 Hochdruckwasserstrahlschneiden

Lukas Kurmann

#### 38 Regelstrategien zur Optimierung des Eigenverbrauchs von Gebäuden

James Trayler

---

### Nachwuchsförderung, Aus- und Weiterbildung

---

#### 42 Optimierte Automationsengineering für die BLS Netz AG

Markus Balmer

#### 44 Automation an den Projektwochen von «Schweizer Jugend forscht»

Jürg Peter Keller

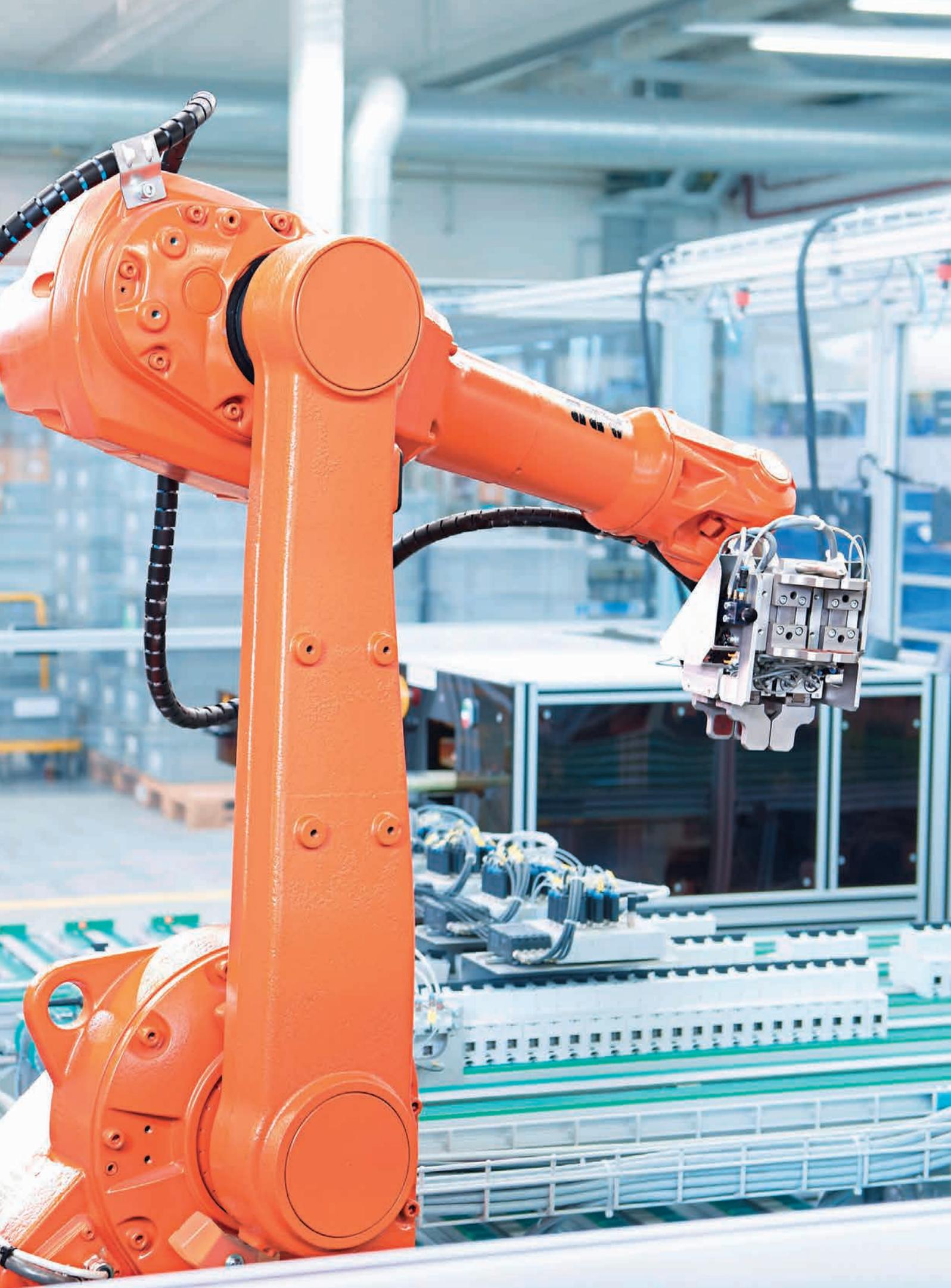
#### 46 FIRST LEGO League: Herausforderungen der Nachwuchsförderung

Jürg Peter Keller

#### 47 Konferenzbeiträge und Preise

#### 48 Studierendenprojekte im Bachelor- und Master-Studium

---



# Editorial

## Geschätzte Leserin, geschätzter Leser

Energie-Effizienz und intelligente Maschinen sind die Themenbereiche der aktuellen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben. Wir freuen uns, Ihnen im vorliegenden Tätigkeitsbericht des vergangenen Jahres darüber berichten zu können. Die dokumentierten Projekte veranschaulichen, wie die Zusammenarbeit von Dozierenden mit Master-Studierenden zur effektiven Durchführung von hochwertigen Forschungsarbeiten führt und unsere Master-Studierenden praxisorientiert zu hervorragenden Fachleuten ausgebildet werden.

Die meisten Produkte sind heutzutage bereits sehr ausgeklügelt. Innovationen im Bereich hoch entwickelter Produkte erfordern darum sehr gute praktische und theoretische Kenntnisse der Optimierung, Regelung und intelligenten Steuerung von Maschinen, insbesondere im Bereich der mathematischen Systemtheorie. Dazu gehören sowohl die Modellierung, Analyse, Beurteilung und Regelung komplexer dynamischer Systeme als auch Methoden für die praktische Umsetzung. Die Beherrschung dieser Methoden ist Grundlage der erfolgreichen Zusammenarbeit des Instituts für Automation mit der Industrie.

Im Rahmen der Ausbildung durfte unser Institut den Unterricht in den Studiengängen Systemtechnik, Wirtschaftsingenieurwesen, Elektro- und Informationstechnik und Energie- und Umwelttechnik wahrnehmen. Wiederum beendeten im vergangenen Jahr 13 Studierende das bewährte Weiterbildungsangebot MAS Automation Management. Stellvertretend zeigt ein Bericht das Resultat einer erfolgreichen Master-Arbeit.

Damit wünschen wir Ihnen eine spannende Lektüre und freuen uns auf Ihre Kontaktaufnahme bei Automationsaufgaben aller Art. Gerne lösen wir mit Ihnen gemeinsam Ihre Problemstellungen und bilden dabei unsere Studierenden praxisnah aus!

Freundlichst



Roland Anderegg  
Institutsleiter

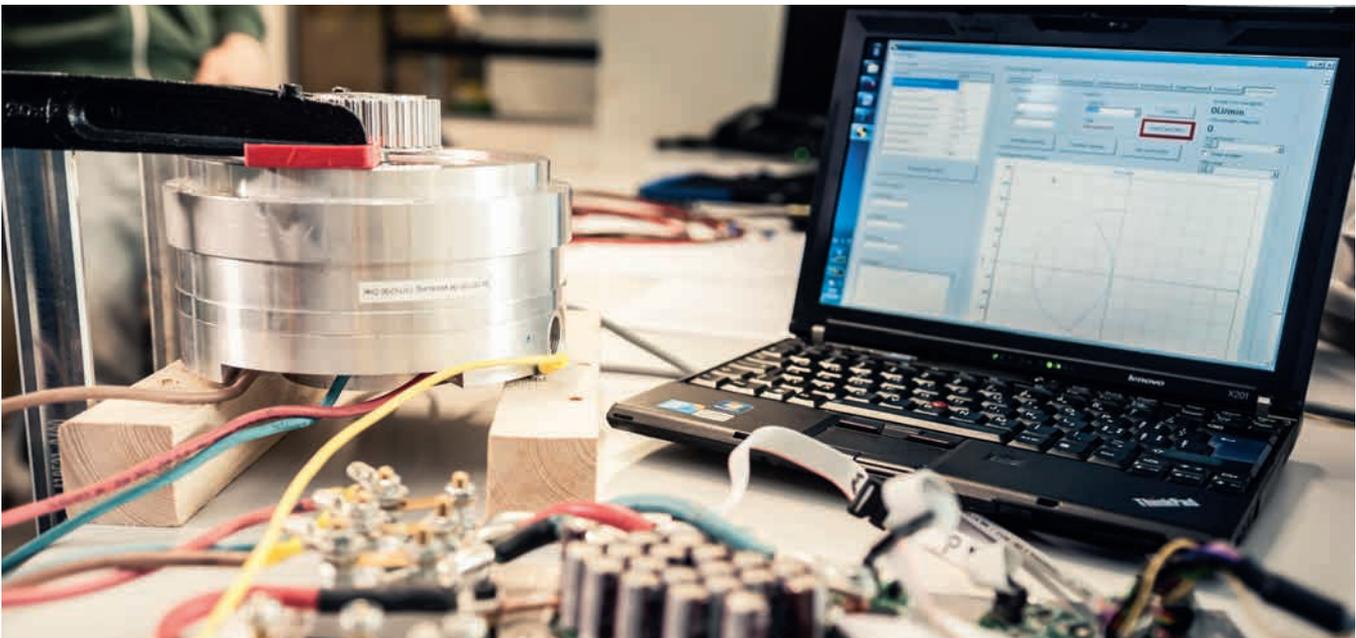


Jürg Peter Keller  
Stellvertretender Institutsleiter

# Kompakte und effiziente Antriebseinheiten mit Vektor-Regelung

Leistungsstarke und kompakte Antriebe, die dynamisch und präzise in Drehmoment, Drehzahl und Position geregelt werden können, sind heutzutage Synchronmotoren, deren Rotoren mit Permanentmagneten bestückt sind (sogenannte PMSM [engl. PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor]). Basis für die Regelung bildet die genaue Kontrolle des Drehfelds relativ zum Rotor. Die Einstellung des optimalen Feldvektors in allen Betriebspunkten und Betriebsbereichen stellt eine besondere Herausforderung dar.

**Sebastian Elber**



## Die Vektor- bzw. Feldorientierte-Regelung des Antriebs

Das Prinzip der Vektor-Regelung, auch feldorientierte Regelung genannt (engl. FOC: field oriented control), ist an sich einfach: Ausgehend von der Messung der Rotorposition wird das Magnetfeld des Stators durch eine entsprechende Unterstromsetzung einer Dreiphasenwicklung so eingestellt, dass jederzeit ein maximales Drehmoment entsteht, dessen Sollwert vom Regler vorgegeben wird. Das bekannte Bild des Hundes drängt sich auf, dem die Wurst vor die Nase gebunden wird.

Die drei Phasenströme  $i_a$ ,  $i_b$  und  $i_c$  variieren zeitlich, bei hochwertigen Antrieben sinusförmig, und sind andererseits durch die Wicklung räumlich angeordnet. Es kann gezeigt werden, dass die vektorielle Summe der Ströme einen Zeiger konstanter Länge ergibt, den *Raumzeiger*  $i_s$ , der mit

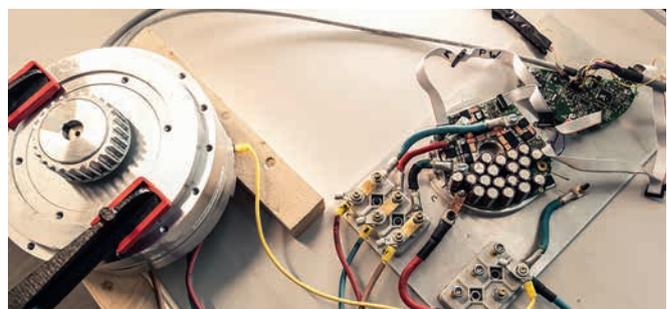


Abbildung 1 - Versuchsaufbau: 24 V / 3,5 kW Motor mit Elektronik

konstanter Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  dreht. So entsteht das «Drehfeld» des Motors.

$$\underline{i}_s = \frac{2}{3} [i_a(t) + i_b(t) \cdot e^{j120^\circ} + i_c(t) \cdot e^{-j120^\circ}] = \hat{i} \cdot e^{j\omega t}$$

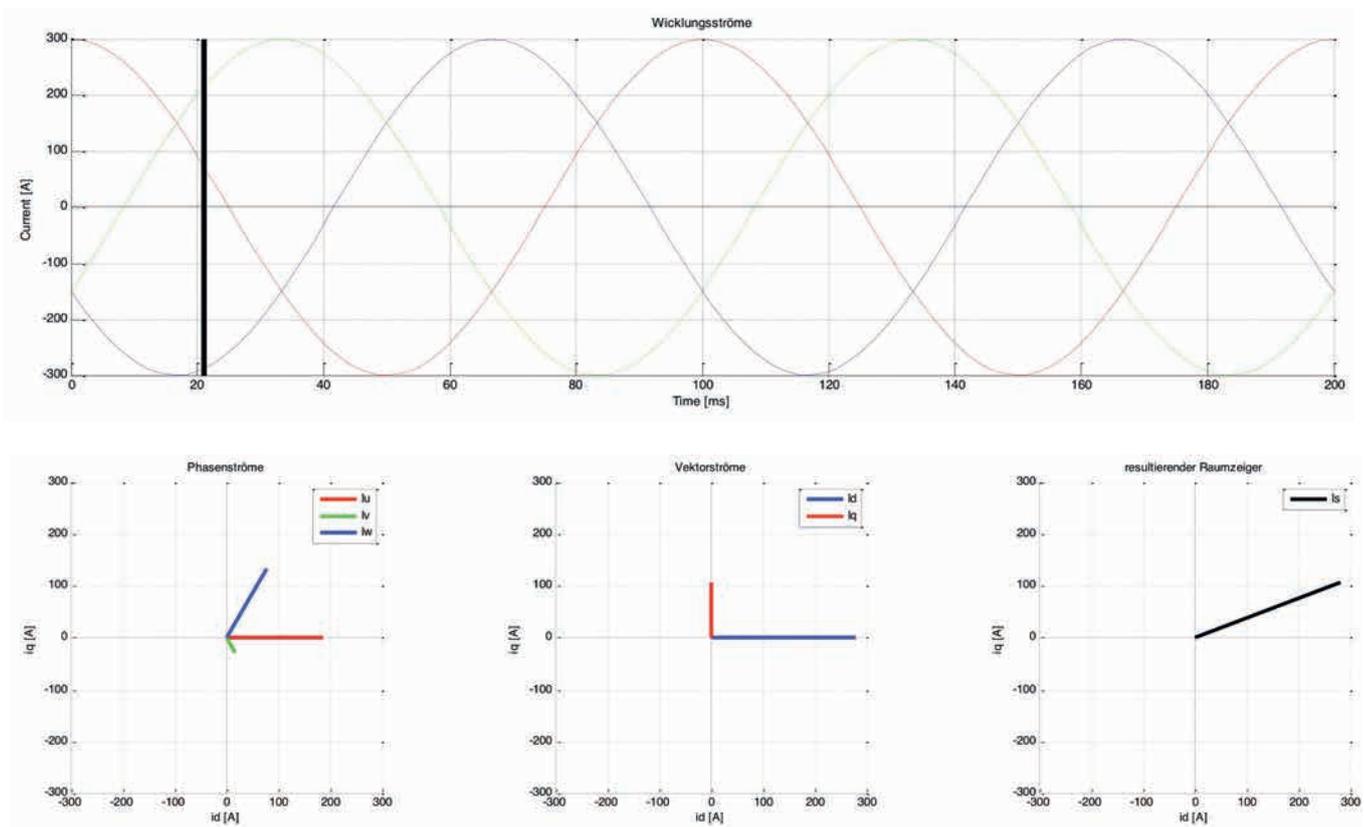


Abbildung 2 – Ausbildung des Raumzeigers aus den drei Wicklungsströmen

Die Ausbildung des Drehfelds zeigt Abbildung 2. Oben links: Zeitlicher Verlauf der 3 Phasenströme. Unten links sind die drei Momentanwerte räumlich dargestellt und auf die beiden Achsen abgebildet (Mitte), den resultierenden Zeiger zeigt die Abbildung rechts unten.

Der Raumzeiger  $i_s$  läuft nun stets synchron mit dem Rotor. Seine relative Lage wird von der Regelung festgelegt.

In der weiteren Theorie werden die Strom-, Spannungs- und Flussgrößen aus Sicht des drehenden Rotors betrachtet, die Drehung wird durch eine Koordinatentransformation eliminiert. Die Wechselstromgrößen des Stators werden somit in DC-Gleichstromgrößen abgebildet.

Die Koordinaten-Drehung erfolgt mit Hilfe der *Clarke-* und der *Park-Transformation* und deren inversen Transformationen (siehe auch Blockschaltbild des Regelkreises unten).

Im mitlaufenden Koordinatensystem zerfällt der Raumzeiger  $i_s$  in die orthogonalen Anteile  $i_d$  und  $i_q$ :

$$i_s = i_d + j i_q$$

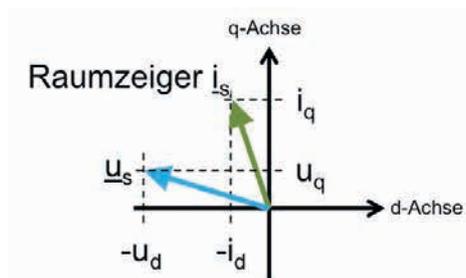
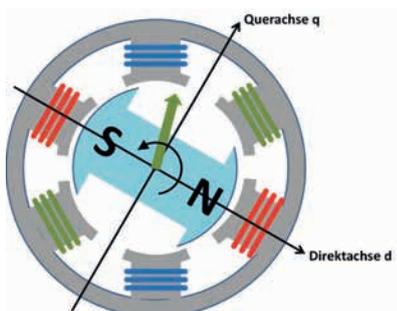


Abbildung 3 - Prinzipschaltung Motor und zugehörige Raumzeiger  $i_s$  und  $u_s$

In analoger Weise kann der Spannungszeiger  $u_s$  mit seinen Komponenten  $u_d$  und  $u_q$  berechnet werden. Der Spannungszeiger kann so mit Hilfe der Stromkomponenten und den elektrischen Ersatzgrößen der Wicklung,  $R$ ,  $L_d$  und  $L_q$ , berechnet werden:

$$u_d = R \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega \cdot L_q \cdot i_q$$

$$u_q = R \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega \cdot L_d \cdot i_d + \underbrace{\omega \cdot \Psi_F}_{EMK: U_p}$$

Die Spannung  $u_d$  enthält den Anteil der EMK (Elektromotorische Kraft), d.h. der durch die Permanentmagnete generatorisch erzeugte Spannungsanteil, die sogenannte Polradspannung  $U_p$ . Sie ist proportional zum magnetischen Fluss  $\Psi_F$  der Permanentmagnete und zur Winkelgeschwindigkeit des Rotors.

Entscheidend für die Wirkung des Motors sind nun die drehmomentbildenden Komponenten:

$$M = \frac{3}{2} \cdot P \cdot [\Psi_F \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q]$$

Mit der Ausrichtung des Stromzeigers wird somit das Drehmoment festgelegt. Weiter wird dadurch gemäß obigen Gleichungen auch der Spannungszeiger  $u_s$  bestimmt. Dies ist zugleich die Stellgröße des Regelkreises: Die 3-Phasen H-Brücke erzeugt die Wicklungsspannungen durch eine entsprechende Pulsweitenmodulation (PWM).

### Regelungsstrategien für den Antrieb

Abbildung 4 zeigt die Strom-Ebene  $i_d$  versus  $i_q$  mit den Ortskurven für konstantes Drehmoment und für konstante Spannung  $|u_s|$ . Das Bild ist typisch für den Rotor-Typ mit «vergrabenen» Magneten, d.h. die Ersatzinduktivitäten über die Direkt- und Querachse des Rotors,  $L_d$  und  $L_q$ , weisen unterschiedlich Grössen auf.

Die Regelungsstrategie hat nun das Ziel, in jedem Betriebspunkt ein möglichst grosses Drehmoment mit einem möglichst kleinen Stromzeiger zu erzielen. Dies wird erreicht, indem jeweils der Punkt auf der Drehmoment-Isokline mit der kürzesten Distanz zum Nullpunkt gesucht wird. Dadurch erhält man die sogenannte MTPA-Kennlinie (engl. *maximum torque per ampère*), die in Abbildung 4 blau eingezeichnet ist.

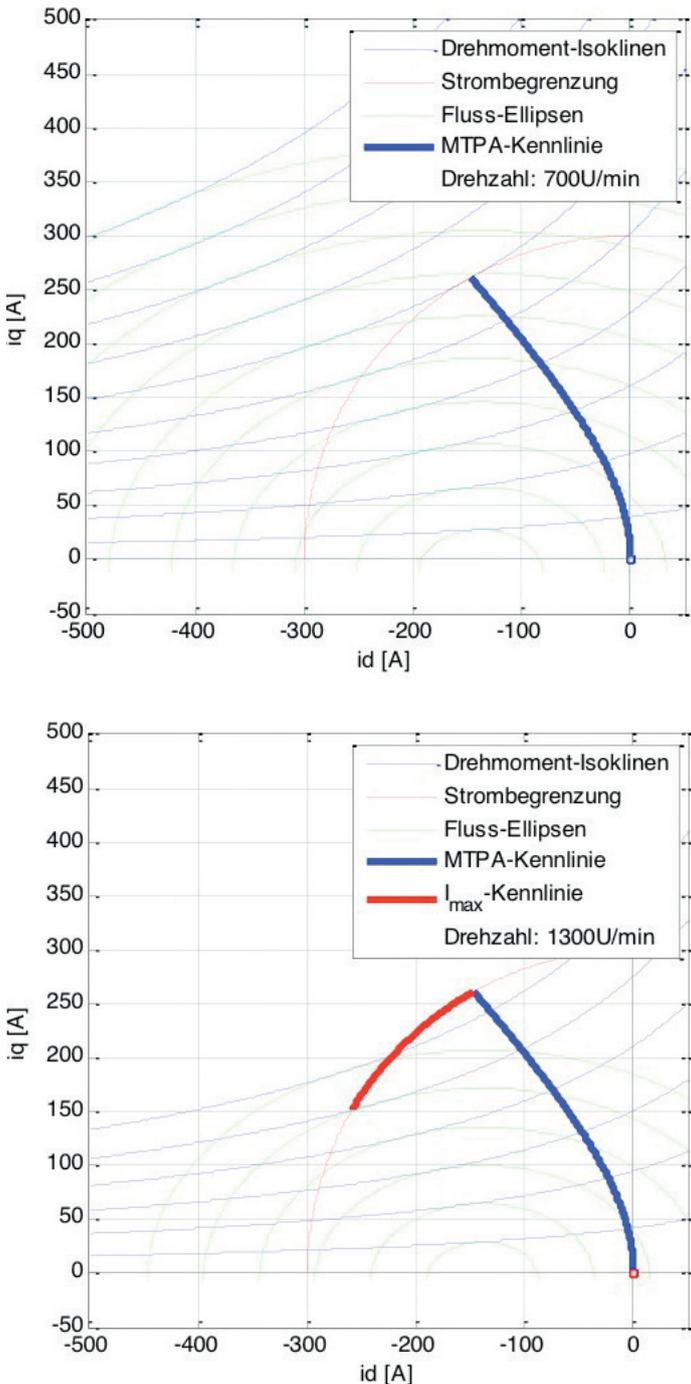


Abbildung 4 - Kurven konstanten Drehmoments sowie konstanter Spannung (Fluss-Ellipsen) in der Strom-Ebene bei unterschiedlichen Drehzahlen

Die Länge des Stromzeigers wird limitiert durch den maximal zulässigen Strom (Halbleiter und die thermische Belastungsgrenze durch Verluste). Diese Begrenzung ist durch den Kreisbogen um den Ursprung markiert.

Eine weitere Begrenzung ergibt sich durch die maximale Wicklungsspannung. Im vorliegenden Versuchsaufbau wird der Motor über einen 24 Volt Akkumulator betrieben. Die Dreiphasen-Brücke kann damit maximal eine Sinusspannung Phase zu Phase von 24 Volt Amplitude erzeugen. Die Spannungsgrenze wird primär bei hohen Drehzahlen wegen der ansteigenden EMK erreicht, wie die Gleichung für  $u_q$  zeigt.

Die Kennlinien in Abbildung 4 sind ergänzt mit den Ortskurven für konstante Spannung. Die Analyse zeigt, dass es sich hierbei um Ellipsen handelt. Der Endpunkt des Stromzeigers muss also innerhalb der Ellipse liegen, die die maximal verfügbare Spannung markiert. Gleichzeitig darf der maximale Strom nicht überschritten werden.

Die Situation wird weiter erschwert durch die Tatsache, dass die Grösse der Ellipsen drehzahlabhängig ist: Je höher die Drehzahl, desto mehr schrumpfen die Ellipsen und ziehen sich schliesslich in einen Punkt auf der negativen  $i_d$ -Achse zusammen. Abbildung 4 rechts zeigt die Situation bei Erhöhung der Drehzahl auf 1300 U/min. Der Stromzeiger muss bei höheren Drehzahlen nach links gedreht werden und weicht zwangsläufig von der idealen MTPA-Kennlinie ab, um innerhalb der Spannungslimite zu liegen.

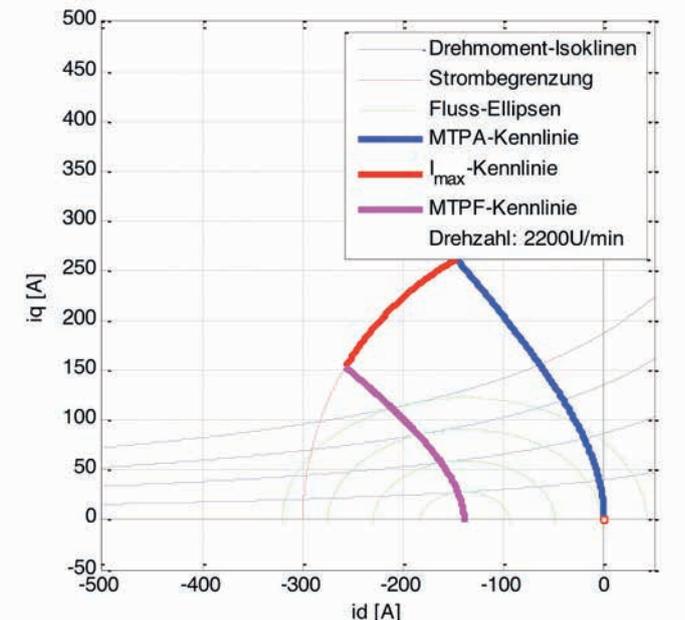


Abbildung 5 - Ausrichtung des Stromzeigers bei Erhöhung der Drehzahl über die Leerlaufdrehzahl hinaus entlang der MTPF-Kennlinie

Mit Spannungsbegrenzung wird das maximale Drehmoment noch bei den Berührungspunkten der Ellipsen mit den Drehmoment-Linien erreicht. Bei der Leerlaufdrehzahl des Motors geht die Ellipse der maximal verfügbaren Spannung durch den Nullpunkt. Oberhalb dieser Drehzahl liegen die Ellipsen nur noch in der linken Halbebene. In diesem Betriebsbereich muss der Stromzeiger also immer weiter nach links in den Bereich der «Feldschwächung» verschoben werden. Mit

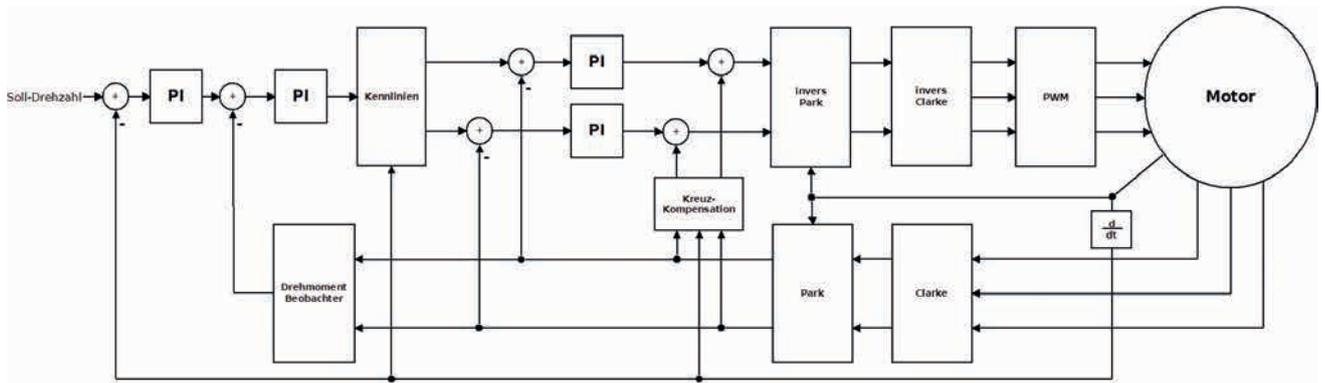


Abbildung 6 - Blockschaema Vektorregelung: Kaskadierte Drehzahl-/Drehmoment-Regelung

diesem Begriff wird der Umstand angesprochen, dass eine negative Stromkomponente  $i_d$  dem Fluss  $\Psi_F$  der Permanentmagnete entgegenwirkt. Dadurch wird der Fluss geschwächt, die EMK und der resultierende Spannungszeiger  $u_s$  werden vermindert. Bei Erhöhung der Drehzahl verschieben sich die Berührungspunkte der Ellipsen sukzessiv auf die negative  $i_d$ -Achse in den Punkt mit hundertprozentiger Feldschwächung. Die drei Begrenzungslinien in Abbildung 5 umfassen somit den gesamten Betriebsbereich eines bürstenlosen Synchronmotors mit vergrabenen Magneten (mit spiegelbildlicher Ergänzung für negative Drehmomente).

### Blockschaema Drehmoment- und Drehzahlregelung

Das Blockschaema (siehe Abbildung 6) zeigt im rechten Teil den Motor mit der 3-Phasen-Brücke (*PWM-Unit*), die Rotorpositionsmessung und die Strommessung. Mittels der Koordinatentransformationen erfolgt der Übergang von den Wechselstromgrößen in die statischen Zeigergrößen und umgekehrt.

Die zu regelnde Grösse ist der Stromzeiger bzw. das damit verbundene Drehmoment. Diese Grössen werden im inneren Regelkreis eingestellt. Die Stellgrösse ist demgegenüber der Spannungszeiger, der in der PWM-Unit mittels der Raumzeigermodulation in die 3 Phasenspannungen übersetzt wird.

Dem Strom-/Drehmoment-Regler überlagert ist der Drehzahlregler. Es handelt sich somit um eine Kaskadenregelung. Eine Abweichung von der Soll-Drehzahl fordert vom inneren Regelkreis ein entsprechendes Drehmoment, um die Abweichung zu korrigieren.

Die spezielle Herausforderung liegt nun darin, für das geforderte Drehmoment bei der jeweiligen Drehzahl den optimalen Stromzeiger zu ermitteln und die Stellwerte für die Spannung zu generieren. Dazu ist eine relativ komplizierte Fallunterscheidung notwendig, um den Betriebspunkt im Kennlinienfeld einzuordnen (vergleiche Abbildung 5). Weiter muss der Stromzeiger natürlich, je nach gefordertem Drehmoment, auf- und abgeregelt werden können. Er bewegt sich also innerhalb des farbig markierten Bereichs (Abbildung 5), sowohl im Motor- als auch im Bremsbetrieb, unter der Nebenbedingung des maximalen Drehmomentes für den jeweiligen Stromwert.

### Kennlinien- und Parametrierungs-Tool

Die mathematischen Berechnungen und entwickelten Verfahren sollen möglichst nachhaltig und nutzbringend für verschiedene Antriebe eingesetzt werden können. Zu diesem Zweck wird ein multifunktionales Entwicklungs- und Para-

metrierungs-Tool mit interaktiver, grafischer Oberfläche entwickelt. Es weist folgende Funktionalitäten auf:

- Berechnung und Darstellung der Motor-Kennlinien und -Parameter
- Darstellung des optimalen Betriebsbereichs in der Stromebene
- Berechnung des Bode-Diagramms der offenen Regelkreise und Bestimmung der optimalen Regler-Parameter
- Generierung von Header-Files mit Motor- und Reglerparametern für die direkte Einbindung in den Software-Code
- Ausgabe eines Motor-Datenblatts
- Verwalten verschiedener Motor-Datensätze

Aktuell wird das Tool erweitert mit einer Echtzeit-Schnittstelle zur Motor-Elektronik, so dass beispielsweise die Zeigergrößen in Echtzeit im Kennlinienfeld dargestellt werden können.

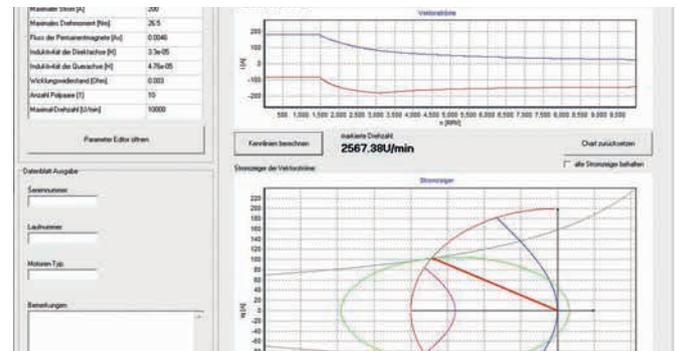


Abbildung 7 - Interaktives Tool: Kennlinien und Stromebene mit optimalem Stromzeiger

### Das Projekt

Die Entwicklungsarbeiten erfolgen im Rahmen eines von der KTI geförderten Projekts mit der Firma Micro-Motor AG in Therwil. Das Ziel besteht in der Entwicklung kompakter Antriebseinheiten mit vollständig integrierter Elektronik für bestimmte Anwendungsbereiche.

### Projektteam

Sebastian Elber, Bachelor of Science FHNW in Systemtechnik, Studierender Master of Science in Engineering MSE und wissenschaftlicher Assistent, sebastian.elber@fhnw.ch  
 Prof. Bruno Stuber, Institut für Automation FHNW, bruno.stuber@fhnw.ch  
 Firma Micro-Motor AG, Therwil, mit dem Team Oliver Borngräber, Christoph Riehl und George Waltzer

# Modellierung, Identifikation und Regleroptimierung für Kabelextrusionsmaschinen

Im Forschungsprojekt wurde ein echtzeitfähiges HIL-Simulationsmodell für Kabelextrusionsmaschinen erstellt. Es dient der Firma Zumbach Electronic AG in Orpund als System zum Test ihrer Geräte und ermöglicht die Entwicklung von Algorithmen zur Regelung der Anlagen. Im Projekt wurden zudem Algorithmen zur on-line-Identifikation von Anlageneigenschaften entwickelt, die erlauben, Messgrößen zu schätzen, die im realen System erst nach einer beachtlichen Totzeit direkt gemessen werden können.

**Jürg Peter Keller**

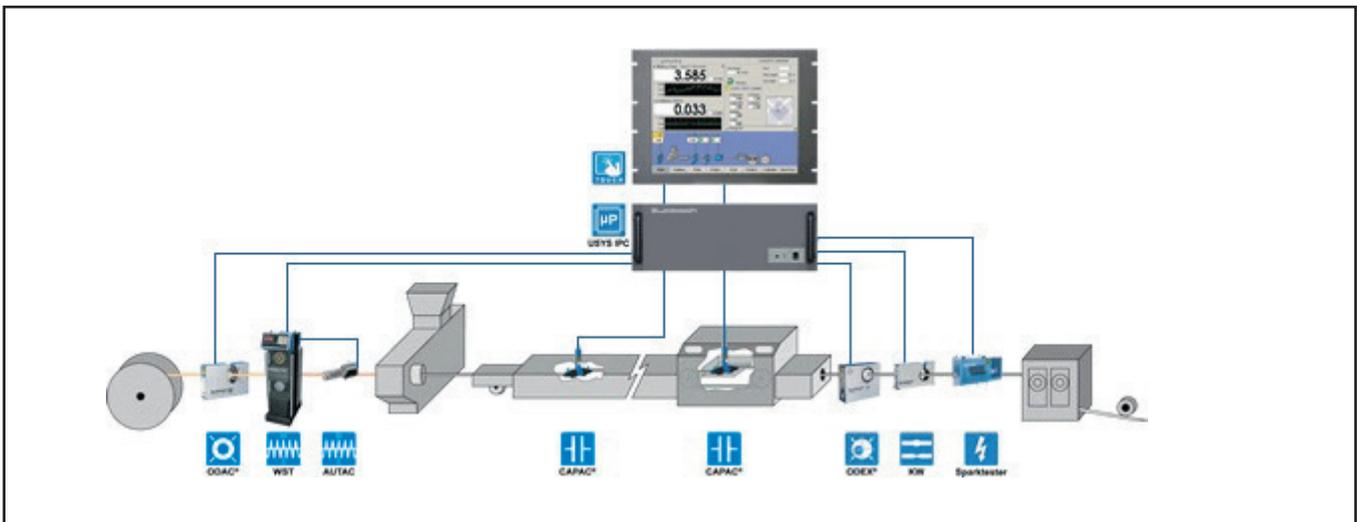


Abbildung 1: Kabelproduktionslinie

Die Produktion eines Kabels für hohe Übertragungsraten erfordert Maschinen mit ausgeklügelter Mess- und Regelungstechnik. Dessen ist man sich beim Kauf eines Kabels kaum bewusst. Die Kabel müssen sehr hohe Anforderungen an die Qualität der Ummantelung des Kupferdrahts erfüllen. Die Firma Zumbach Electronic AG in Orpund erstellt Sensorsysteme, die erlauben, die Manteldicke, die Zentrität und auch die elektrische Kapazität von Kabeln selbst bei hohen Liniengeschwindigkeiten on-line zu messen. Im Rahmen eines KTI-Projekts wurden eine neue Rechnerplattform USYS-NG und ein HIL-Testsystem (Hardware in the Loop) entwickelt. Der Projektlead und die ganze Hardware-Entwicklung wurden von der SUPSI geleistet. Unser Arbeitspaket war die Entwicklung und Implementierung eines Simulationsmodells für unterschiedliche Kabelproduktionsanlagen und die Entwicklung von Algorithmen für die optimale Regelung der Anlagen.

## Simulationsmodell

Kabel für hohe Übertragungsraten bestehen aus einem Kupferleiter, einer Schaumschicht und einem dünnen Mantel. Die Schaumschicht dient zur Reduktion der elektrischen Kapazität des Kabels. In einem Extruder werden die Kunststoffe geschmolzen und als dünne Hüllen um den Kupferdraht gezogen. Die Schäumung erfolgt heutzutage ‚physikalisch‘, d.h. es werden keine gasbildenden Lösungsmittel dem Kunststoff beigemischt, sondern mittels eines Injektors wird mit hohem Druck Gas im Kunststoff gelöst. Verlässt nun das Kabel den Extruderkopf, so fällt der Druck stark ab und es bilden sich feinste Gasblasen. Dabei spielt die Temperatur der Kunststoffe eine zentrale Rolle. Sind die Kunststoffe zu kalt, findet keine oder eine ungenügende Blasenbildung statt. Sind sie aber zu heiss, so ist die Blasenentwicklung zu stark, im Extremfall können die Kabel aufplatzen. Um die Blasenbildung, d.h. den Luftanteil im Kabel schnell beeinflussen zu können, wird das Kabel nach einer bestimmten, veränderbaren Strecke in einem Wassertrog

abgekühlt. In Abbildung 1 ist eine Kabelproduktionslinie zusammen mit den von Zumbach Electronic AG angebotenen Sensoren dargestellt.

Für die Steuerung und Regelung der Anlage stehen verschiedene Grössen zur Verfügung. Über die Bahngeschwindigkeit kann die Schichtdicke sehr schnell beeinflusst werden. Etwas langsamer ist die Wirkung der Förderaggregate für die Kunststoffe und die Verstellung der Trogposition. Die grössten Zeitkonstanten haben die Temperaturregelungen zum Schmelzen der Kunststoffe und zur Heizung des Extruderkopfs. Geregelt werden die Schichtdicken des Schaums und des Mantels sowie die Kapazität des Kabels. Offensichtlich ist dies kein einfach zu regelndes Mehrgrössensystem. Zur Entwicklung von Reglern und Tests von Hardware wurde ein Modell für ein HIL-System entwickelt. Die Anforderungen an das Modell waren, dass das Modell nicht eine spezifische Anlage exakt simulierend soll, sondern dass über geeignete Parametrierungen das typische Verhalten solcher Anlagen simuliert werden kann.

### Modellstruktur

Die Anlage stellt eine besondere Herausforderung an die Modellierung dar. Zwei unterschiedliche Systemeigenschaften mussten miteinander kombiniert werden. Das dynamische Verhalten des Extruders wird kaum durch Transportvorgänge, sondern hauptsächlich durch Speicher von Energie und Materie bestimmt. Hat das Kabel aber den Extruder verlassen, so dominieren die Transportvorgänge den Prozess und die Kabeleigenschaften werden hauptsächlich dadurch bestimmt, was ein Kabelstück beim Transport durch den zweiten Teil der Anlage erlebt, insbesondere wie gross die Verweilzeiten eines Kabelstücks in den verschiedenen Anlagenteilen ist. Es wurde ein Simulationsprinzip

gewählt, wie es in Abbildung 2 dargestellt ist. Das Modell des Extruders stellt ein System von gewöhnlichen Differentialgleichungen dar. Die Werte der Ausgangsvariablen des Extruders werden periodisch abgetastet. Mit jeder Abtastung wird ein neues Modell für ein Kabelstück erzeugt, das während der Simulation durch den Rest der Anlage transportiert wird.

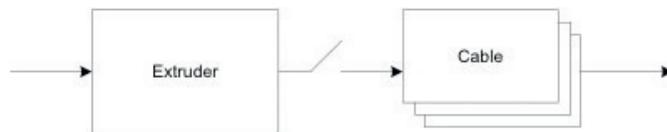


Abbildung 2: Struktur des Simulationsmodells

Die heute zur Verfügung stehenden Simulationstools unterstützen solche Modellstrukturen nicht. Es können keine Simulationsobjekte während der Simulation erzeugt werden und zu gegebener Zeit, d.h. wenn das Kabelstück die Anlage verlassen hat, wieder zerstört werden. Im Projekt konnte eine solche Struktur in LabVIEW nachgebaut werden. Es zeigte sich, dass verschiedene zusätzliche Elemente nötig sind, z.B. für die Erzeugung neuer Objekte oder um einen vernünftigen Verlauf der Variablen des Kabelmodells entlang des Wegs durch die Anlage zu berechnen. Da die Messgeräte an bestimmten Orten in der Anlage montiert sind, müssen deren Werte durch geeignete Interpolation zwischen den Werten der Kabelstücke bestimmt werden.

Die detaillierte Struktur des physikalischen Simulationsmodells ist in Abbildung 3 dargestellt. Das Extrudermodell beginnt mit Teilmodellen für die Materialförderung des Mantel- und Füllermaterials.

Thermische Modelle beschreiben deren Aufheizung.

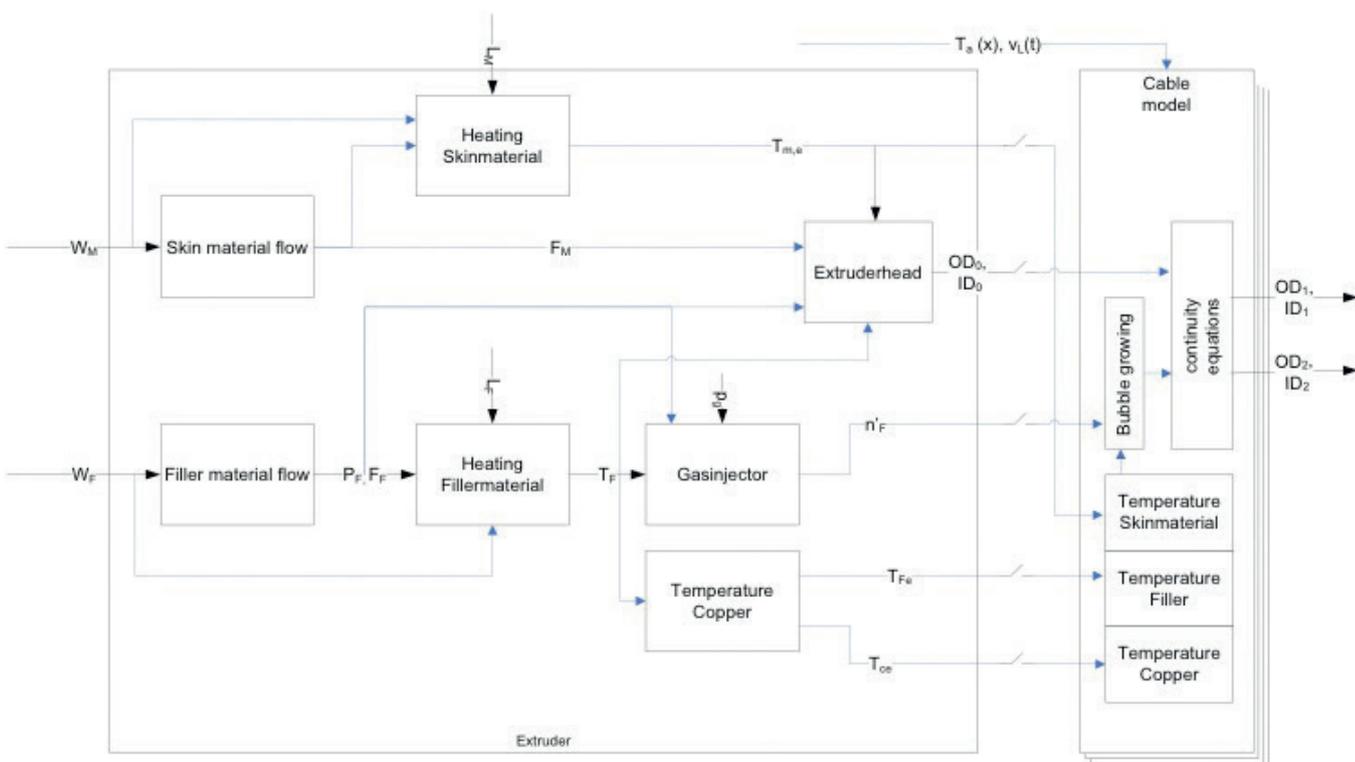


Abbildung 3: Simulationsmodell

Im Modellteil ‚Extruderhead‘ werden die Dicken der verschiedenen Schichten bestimmt und im ‚Gasinjector‘ wird das Lösen des Treibgases im Füllmaterial berechnet. Die zahlreichen Modelle für die durch die Anlage wandernden Kabelabschnitte, bestehen aus Modellteilen, die die Temperaturen simulieren, das Wachsen der Gasblasen berechnen, damit danach mittels Kontinuitätsgleichungen die Durchmesser berechnet werden können. Eine besondere Herausforderung ist die Modellierung der Gasblasenbildung. Nach einer Gasblasenkeimbildung wirkt dem freien Gasblasenwachstum der Widerstand des Mantels entgegen. Dieser wurde als eine Kombination eines St. Venants-Körpers und eines Maxwell-Körpers modelliert (Abbildung 4). Der Maxwell-Körper besteht aus einer Serieschaltung einer elastischen Feder und einem

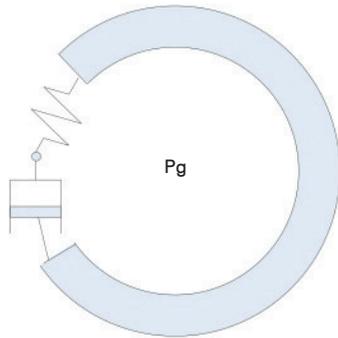


Abbildung 4: Kabelmodell

viskosen Dämpfer. Da die Temperaturen im Bereich liegen, in dem das Material zu fließen beginnt, wurde das Fließverhalten als St. Venants-Körper modelliert, d.h. das Mantelmaterial beginnt zu fließen, sobald die Federkraft einen temperaturabhängigen Grenzwert erreicht.

Leider entsteht aufgrund der Kopplungen ein DAE-System, d.h. ein System mit nicht explizit auflösbaren algebraischen Gleichungen und Differenzialgleichungen. Es wurden speziell dafür geeignete Lösungsalgorithmen programmiert, aber es war trotzdem nicht möglich, die Echtzeitanforderungen zu erfüllen. Es wurde darum auf eine einfachere, empirische Beschreibung des Gasblasenwachstums zurückgegriffen. In Abbildung 5 ist das Resultat einer Simulation dargestellt. Deutlich sieht man den Effekt des Wassertrogs, der nach 1m zur schnellen Abkühlung des Kabels und zum Stopp des Blasenwachstums führt.

Das LabVIEW-Simulationsmodell wurde mit Treiberfunktionen erweitert. Es ist somit möglich, die Steuergrößen über ein externes Gerät vorzugeben und die Prozessgrößen entsprechend den Anlagesensoren an die Maschinensteuerung zurück zu senden. Es wurde also ein komplett funktionsfähiges HIL-System entwickelt.

### Regelungstechnische Aspekte

Da die zu regelnden Größen erst am Ende der Anlage gemessen werden können, entstehen grosse Totzeiten. Diese sind variabel, da sie von der Drahtgeschwindigkeit abhängen. Es ergeben sich also für die schnelle Regelung insgesamt sehr schwierige Umstände. Es wurde darum nach Lösungen gesucht, wie die Regelgrößen aufgrund von Messungen möglichst nahe am Extruder abgeschätzt werden können. Es wurde erfolgreich eine Methode entwickelt, mit welcher der Zusammenhang zwischen der frühen Messung und der Endmessung online geschätzt werden kann. Der Test der Methode an der realen Anlage steht noch aus, kann aber nun als erstes anhand des vorangehend beschriebenen Simulationsmodell erfolgen.

### Auftraggeber

Zumbach Electronic AG, Dr. S. Balemi, Orpund

### Projektteam

Prof. Dr. Jürg P. Keller, juerg.keller1@fhnw.ch (Leitung)  
 Jérôme Blum, Bachelor of Science FHNW in Systemtechnik, Student Master of Science in Engineering MSE  
 Benjamin Meier, Bachelor of Science FHNW in Systemtechnik  
 Marcel Burri, Automatiker

### Projektpartner

R. Bucher, SUPSI, AGNO

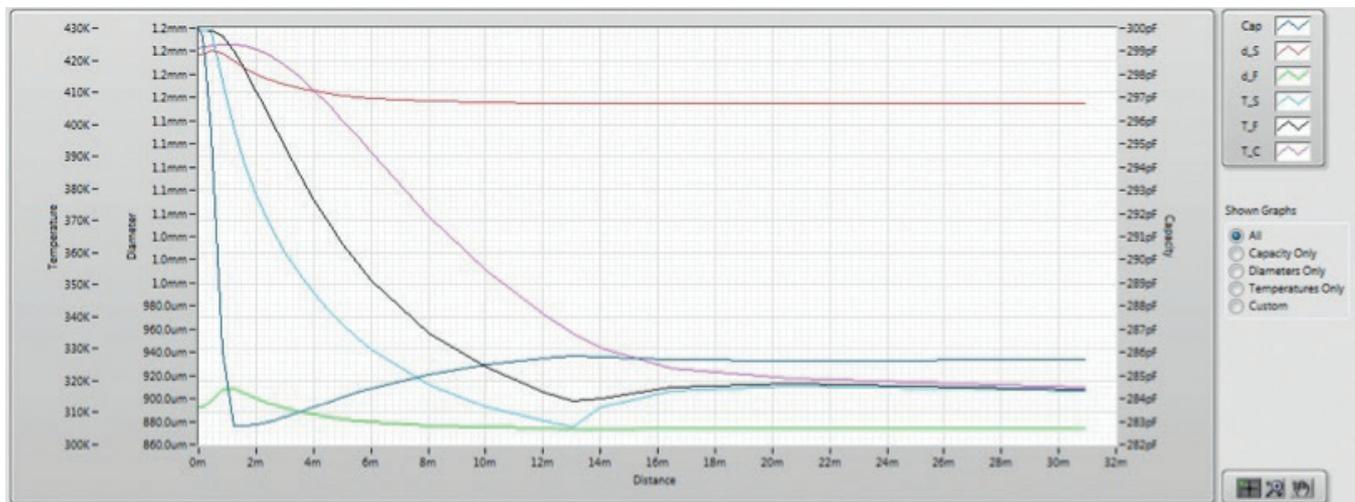


Abbildung 5: Simulationsresultat

# Ihr nächster Karriereschritt: Weiterbildung für Fach- und Führungskräfte

Innovative und erfolgreiche Unternehmen sind auf die Kompetenz und das Engagement ihrer Mitarbeitenden angewiesen, gut ausgebildete Fachleute sind daher äusserst gesucht. Mit einer Weiterbildung erhöhen Sie Ihre Chancen auf dem Arbeitsmarkt ganz entscheidend.

Die berufsbegleitenden Weiterbildungsangebote der Hochschule für Technik FHNW richten sich an Projektleiterinnen und -leiter sowie an Führungskräfte mit einer technischen Grundausbildung.

Die Studiengänge sind modular aufgebaut und vermitteln neuestes Fachwissen und Managementkompetenzen. Sie können mit dem Diplom Master of Advanced Studies abgeschlossen werden und befähigen zur Übernahme von anspruchsvollen Führungs- und Projektaufgaben. Mit einer Weiterbildung an der Fachhochschule Nordwestschweiz sind Sie hervorragend gerüstet für den nächsten Karriereschritt in Ihrem Fachbereich.

## **MAS Automation Management - Für Führungspersonen in der Automationstechnik**

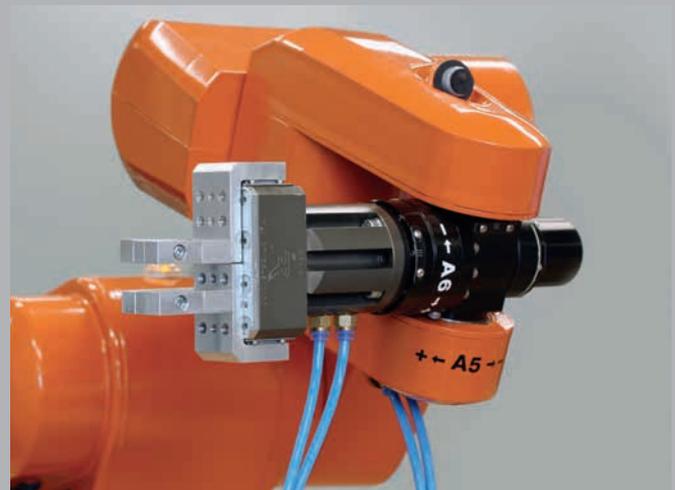
Der Master of Advanced Studies (MAS) Automation Management deckt die Bereiche Automatisierungstechnik, Projektmanagement, Planungsmethodik, Automationsinformatik und Projektierung ab. Nach Abschluss des Studiums sind die Teilnehmenden in der Lage, eine komplexe Anlage zu projektieren und sowohl kostenoptimal als auch termingerecht zu realisieren.

Die Module werden vom Institut für Automation und seinen Netzwerkpartnern angeboten. Sie besuchen die Module dort, wo das entsprechende Know-how und die Laborausrüstungen vorhanden sind. Durch die enge Zusammenarbeit mit der Industrie und anderen Hochschulen fliessen aktuelle Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung in die Weiterbildung mit ein. Administrativ wird der Studiengang von der Hochschule für Technik FHNW geleitet.

Nächster Start: 7. September 2015

## **Weitere Angebote im Fachbereich Automation**

Die Hochschule für Technik FHNW bietet verschiedene Veranstaltungen in Form von Kursen und Workshops an. Sie können bei uns massgeschneiderte Kurse in Auftrag geben. Nehmen Sie mit uns Kontakt auf – wir informieren Sie gerne.



## **Unser Weiterbildungsangebot umfasst die Fachgebiete**

- Automation
- Digitales Bauen
- Elektronik
- Einkauf und Beschaffung
- Giessereitechnik
- Informatik
- Kunststofftechnik
- Logistik
- Management und Führung
- Optometrie
- Ökobilanzierung
- Patentschutz

## **Infoabende**

- 22. Juni und 26. August 2015: Windisch
  - 2. November 2015: Basel
- jeweils um 18.15 Uhr

## **Informationen und Kontakt**

Hochschule für Technik FHNW  
T +41 56 202 99 55  
weiterbildung.technik@fhnw.ch  
www.fhnw.ch/wbt

# Regelung eines Labor-Rührkessels für Scale-up

Die Verfahrensentwicklung zur Herstellung eines Wirkstoffs findet in Labor-Rührkesseln statt, deren thermisches Verhalten sich massgeblich von dem eines Produktionsreaktors unterscheidet. Um im Labor die gleichen Bedingungen wie im Betrieb herzustellen, wurde einerseits eine Regelstrategie für eine aktive Isolation des Labor-Rührkessels entwickelt und andererseits ein Heiz-/Kühlsystem für die Temperierung des Rührkessel-Inhalts ausgearbeitet. Für die Umsetzung der entwickelten Systeme wurde zudem die Hardware definiert, sowie eine LabVIEW Applikation programmiert. Dieses Projekt wurde in enger Zusammenarbeit mit der Firma F. Hoffmann - La Roche AG durchgeführt.

**Jérôme Blum**

## Regelung des Wärmeverlusts eines Laborreaktors

Das Ziel der Wärmeverlustregelung ist ein Abkühlungsverhalten des Laborreaktors, das dem Produktionsreaktor entspricht. Da die Oberfläche eines Laborreaktors im Verhältnis zu seinem Inhaltvolumen sehr gross ist, kühlt ein Laborreaktor viel schneller ab. Im Gegensatz dazu weist ein Produktionsreaktor ein beinahe adiabatisches Verhalten auf - er kühlt also nur sehr langsam ab (siehe Abbildung 1).

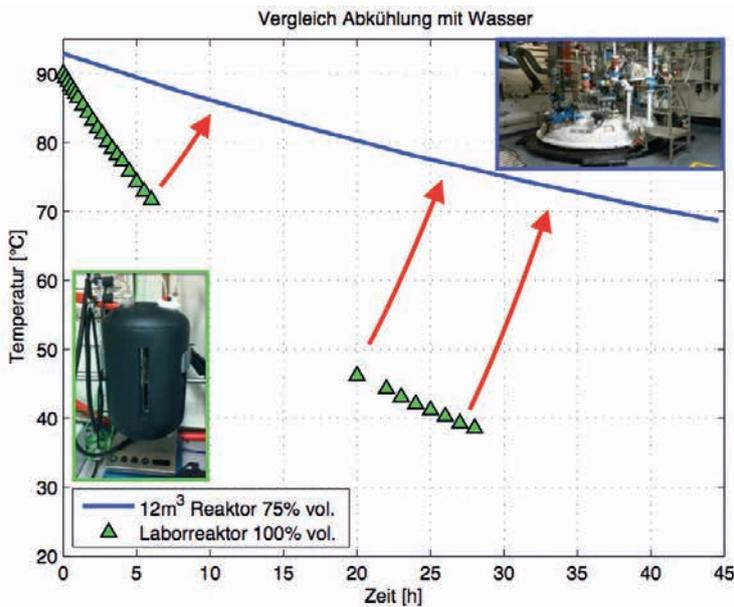


Abbildung 1: Abkühlungsverhalten eines Produktionsreaktors im Vergleich zu einem Laborreaktor

Zur Regelung des Wärmeverlusts im Laborreaktor wird mit einer aktiven Isolation gearbeitet, mit der die Umgebungstemperatur des Laborreaktors beeinflusst werden

kann. Die aktive Isolation besteht aus einem isolierten Stahlbehälter, der durch einen Ventilator mit temperierter Luft durchströmt wird (vgl. Abbildung 2).

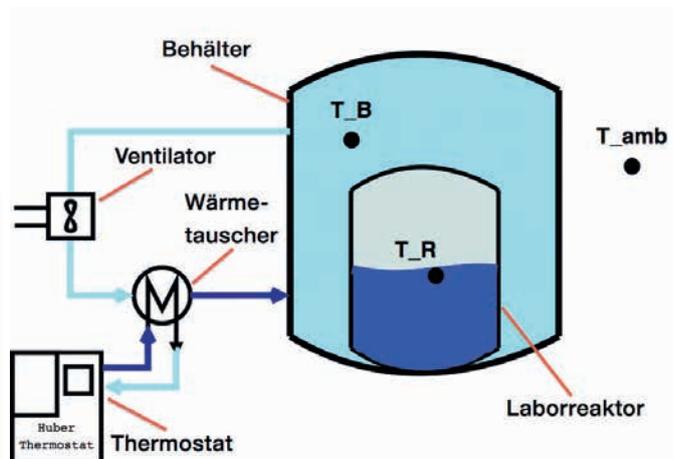


Abbildung 2: Aktive Isolation des Laborreaktors

Um das grundsätzliche thermische Verhalten eines Reaktors zu untersuchen, wurden Abkühlungsversuche durchgeführt. Dabei wurde der Reaktorinhalt auf 90°C geheizt und danach selbstständig abgekühlt. Dieses Abkühlungsverhalten kann mit einer Differentialgleichung 1. Ordnung beschrieben werden:

$$(M_R c_p + C_p) \frac{dT_R}{dt} = \overbrace{UA(T_R - T_{amb})}^{\dot{q}_{\text{loss}}}$$

$T_R$  ist die Reaktortemperatur

$T_{amb}$  ist die Umgebungstemperatur

$M_R$  ist die Masse des Wassers

$c_p$  ist die spezifische Wärmekapazität des Wassers  
 $\dot{q}_{loss}$  ist der Wärmeverluststrom  
 $C_p$  ist die Wärmekapazität des Reaktors (unbekannt)  
 $UA$  ist die Wärmeaustauschfläche multipliziert mit dem Wärmeübergangskoeffizienten (unbekannt)

Die Parameter  $C_p$  und  $UA$  des Reaktors werden mithilfe der Messdaten aus dem Versuch identifiziert. Das erhaltene Modell dient der Ermittlung des volumenspezifischen Wärmeverluststroms  $\dot{q}_{loss}$  des Produktionsreaktors. Dieser Wärmeverluststrom soll auch im Labor eingestellt werden können. Dafür benötigt man die Parameter des Laborreaktors, die auf dieselbe Art und Weise identifiziert werden.

Um einen identischen Temperaturverlauf der beiden Reaktoren zu erreichen, werden beide Differentialgleichungen mit den identifizierten Parametern gleichgesetzt:

$$\frac{dT_R}{dt} = \frac{UA_{Labor}(T_R - T_B)}{M_{R,Labor}c_p + C_{p,Labor}} \stackrel{!}{=} \frac{UA_{Betrieb}(T_R - T_{amb})}{M_{R,Betrieb}c_p + C_{p,Betrieb}}$$

Die notwendige Behältertemperatur für die aktive Isolation des Laborreaktors ergibt sich durch das Auflösen der obigen Gleichung nach  $T_B$ :

$$T_{B,soll}(T_R) = T_R - \frac{UA_{Betrieb}(T_R - T_{amb})(M_{R,Labor}c_p + C_{p,Labor})}{UA_{Labor}}$$

Durch die Regelung der Behältertemperatur mit obigem Sollwert wird erreicht, dass der volumenspezifische Wärmestrom zwischen Reaktor und Behälter im Labor gleich ist wie im Betrieb. Somit ist das thermische Verhalten in einem Abkühlungsszenario identisch.

### Abbildung des Heiz-/Kühlsystems eines Produktionsreaktors

Ein weiterer wichtiger Aspekt für das Verhalten eines

Rührkessels ist die Auslegung des Heiz-/Kühlsystems für den Reaktorinhalt. Bis anhin wurden Reaktoren im Labor über ihren Doppelmantel, der mit Wärmeträgeröl durchströmt wird, temperiert. Ein solcher Energieeintrag entspricht jedoch nicht dem Vorbild des Betriebs, da Oberflächentemperaturen und Wärmetauschflächen nicht angepasst sind. Auch kann mit diesem Vorgehen nur indirekt bestimmt werden, wieviel Wärmeenergie zugeführt wurde. Diese Information ist allerdings wichtig, um zwischen Reaktionsenergie aus den Edukten und von aussen zugeführter Energie zu differenzieren.

Produktionsreaktoren werden mit getrennten Heiz- und Kühlschienen betrieben. Dadurch kann die Temperatur der Heizschlangen schnell verändert werden. Um diese Umstände im Labor abzubilden, wurde zuerst ein Heiz-/Kühlfinger entwickelt, der das gleiche Verhältnis von Wärmetauschfläche zu Volumen aufweist wie der Betrieb (siehe Abbildung 3). Für die Temperierung des Heiz-/Kühlfingers wurden zwei Umwälzthermostate verwendet. Einer als Heizschiene und der andere als Kühlschiene. Beide Kreisläufe werden über Regelventile miteinander verbunden. Dadurch kann die Vorlauftemperatur auf eine beliebige Temperatur abgemischt werden (vgl. Abbildung 4). Zudem kann der Massenstrom durch den Heiz-/Kühlfinger mit weiteren Regelventilen eingestellt werden. Über die Messwerte von Vorlauftemperatur, Rücklauftemperatur und Massenstrom kann der volumenspezifische Energieeintrag in den Reaktor mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$\dot{q}_{in} = \frac{\dot{m}c_p(T_{in} - T_{out})}{V_R}$$

$\dot{m}$  ist der Massenstrom

$T_{in}$  ist die Vorlauftemperatur

$T_{out}$  ist die Rücklauftemperatur

$V_R$  ist das Reaktorvolumen

$\dot{q}_{in}$  ist der Wärmestrom von H/K-Finger in den Reaktor

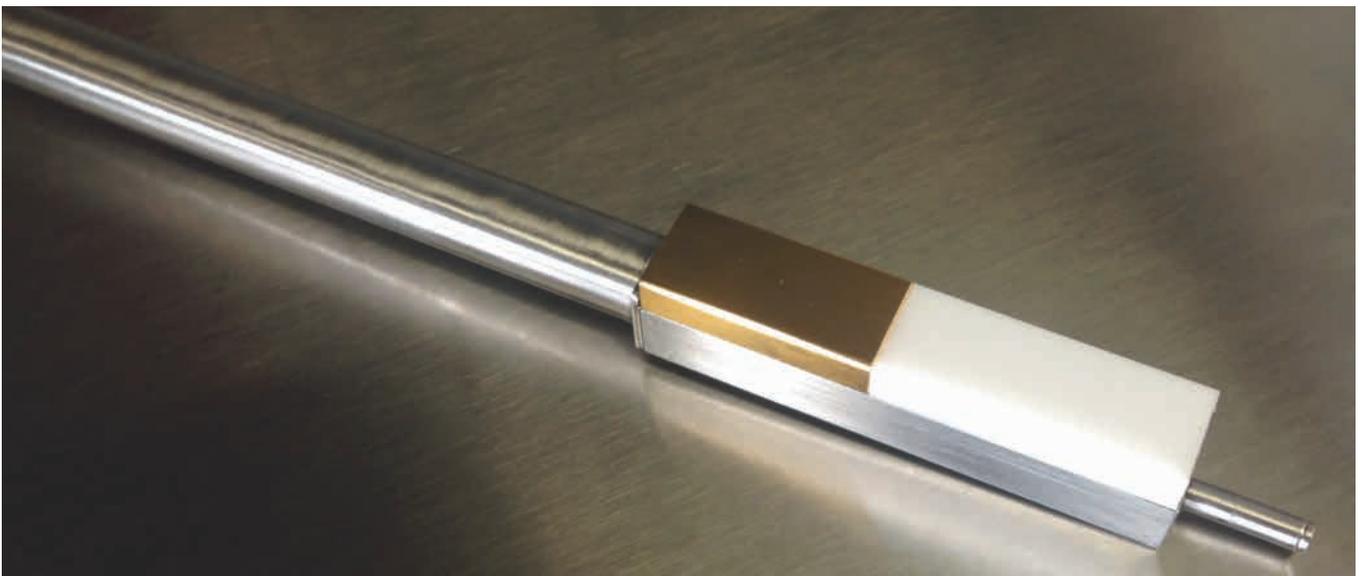


Abbildung 3: Der Heiz-/Kühlfinger wird mit Öl durchströmt, um dem Reaktor Wärme zuzuführen bzw. abzuführen

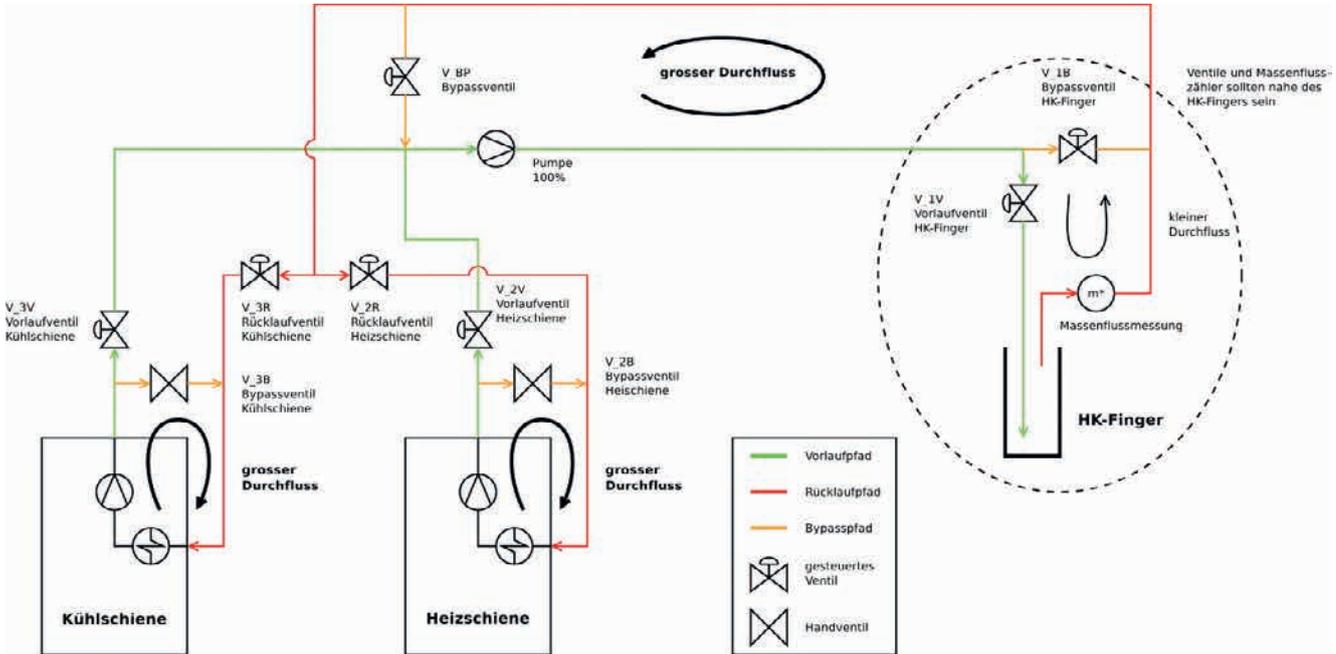


Abbildung 4: Realisierung des Mischthermostats mit Heiz- und Kühlschiene, Ventilen und Pumpen



Abbildung 5: Kompakte Realisierung der Mischventile.

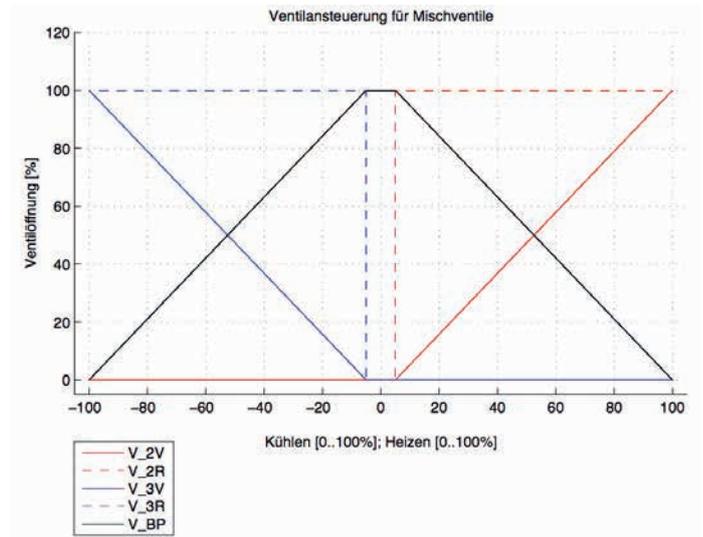


Abbildung 6: Lookup-Table für die Ansteuerung der Mischventile

Mit diesem Versuch konnte gezeigt werden, dass die Vorlauftemperaturregelung im Labor mit dem entwickelten Mischthermostaten ähnlich schnell ist wie das Produktionsvorbild. Grössere Unterschiede bestehen noch beim Abkühlungsprozess. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Leitungen im Labor noch nicht isoliert sind und dadurch auf dem Transportweg des Öls noch viel Kälteleistung verloren geht.

#### Hardware und Benutzerschnittstelle

Die Ansteuerung der verschiedenen Geräte (Umwälzthermostate, Pumpen, Ventilator, Ventile) und das Auslesen der Sensoren wurden auf einer SPS (Siemens S7-300) realisiert. Auf ihr sind auch alle Regelkreise implementiert. Als Benutzerschnittstelle wurde eine LabVIEW-Applikation entwickelt, die für das Anzeigen der Messwerte, das Einstellen der Regler, die Versuchsdurchführung und das Datenlogging verantwortlich ist.

Um das Verhalten der Laboranlage mit dem des Produktionsreaktors zu vergleichen, wurde ein Vorlauftemperaturprofil als Sollwert für die Labor Vorlauftemperatur gewählt und nachgefahren. Die Abbildung 7 zeigt einen solchen Versuch auf.

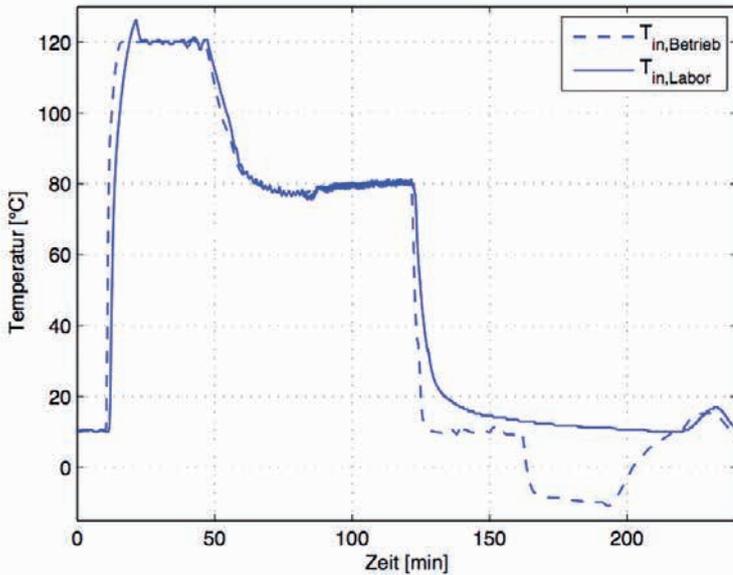


Abbildung 7: Vergleich der Vorlauftemperaturen Betrieb - Labor.

Diese Konfiguration wurde gewählt, da Siemens-Komponenten in der Firma F. Hoffmann - La Roche AG standardmäßig vertreten sind. Somit ist der Support firmenintern gewährleistet. Da die Anlage Forschungszwecken dient, muss eine einfache Erweiterbarkeit angestrebt werden. Dies wird erreicht mit der modular aufgebauten LabVIEW Applikation (siehe Abbildung 8). Die Gestaltung der Benutzeroberfläche mit Hilfe von Subpanels gestattet eine modulare und flexible Erweiterung. Die direkte Datenkommunikation mit der SPS ist über TCP/IP realisiert und ebenfalls erweiterbar.

### Aktuelle Situation und Aussicht

Im Moment werden auf der Anlage Charakterisierungsversuche durchgeführt. Ziel ist es, den Reaktor mit einem präziseren Modell abzubilden. Dabei werden auch Rührerdrehzahlen, Reaktionsenergien und sogenannte «Anback-Effekte» am Heiz-/Kühlfinger berücksichtigt. Das Ziel der Anlage ist es, einen beliebigen Betriebsreaktor emulieren zu können. Dafür soll das Modell des gewünschten Betriebsreaktors in LabVIEW als Echtzeit-Simulation ausgeführt werden und die Sollwerte für die Regelung des Laborreaktors vorgeben.

### Projektteam

Jérôme Blum, Bachelor of Science FHNW in Systemtechnik, Studierender Master of Science in Engineering MSE und wissenschaftlicher Assistent, jerome.blum@fhnw.ch  
 Dr. Andreas Zogg, F. Hoffmann - La Roche AG  
 Prof. Dr. David Zogg, Institut für Automation, Advisor

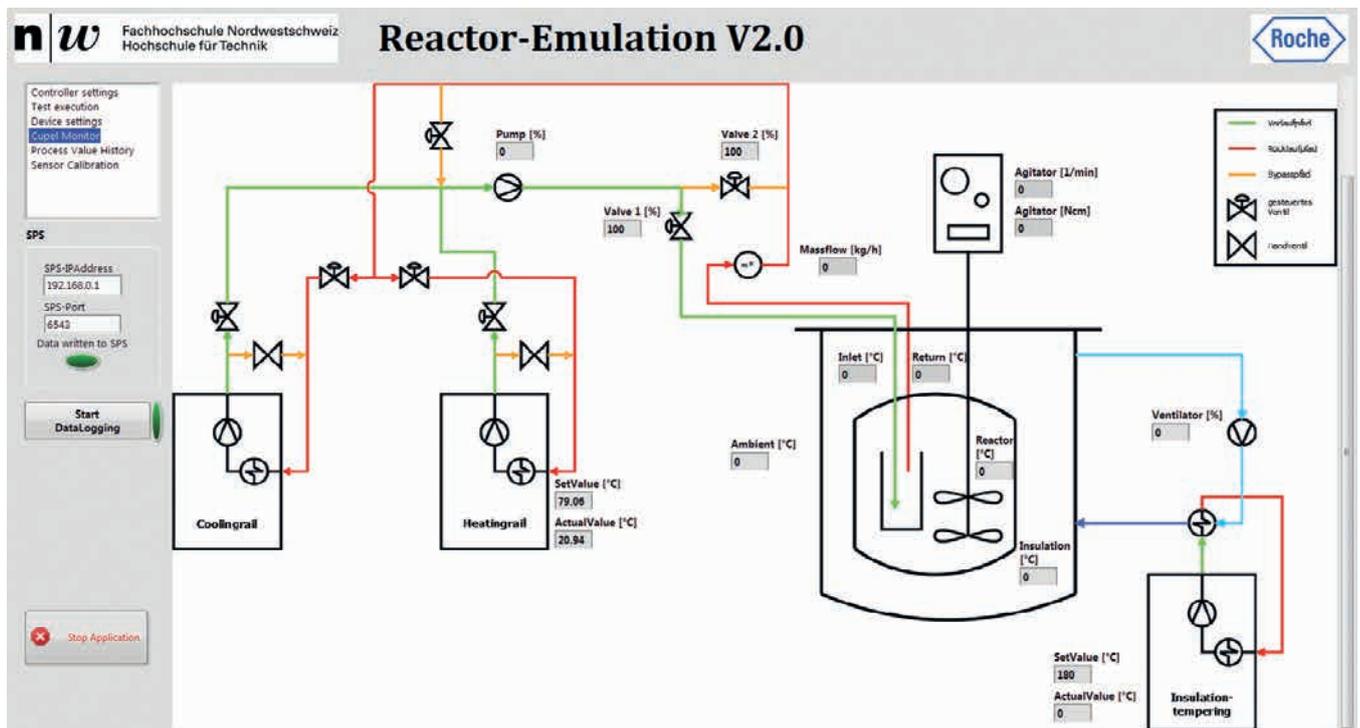


Abbildung 8: LabVIEW Benutzeroberfläche mit Subpanels.

# Dynamische Drehgestell-Prüfstandstechnik

Im Rahmen eines KTI-Projekts mit der Firma Nencki AG in Langenthal konnten neue Erkenntnisse im Bereich der Drehgestell-Prüfstandstechnik gewonnen werden. Die Versuche auf dem Schmalspur-Drehgestell der Oberaargau-Jura-Bahnen (OJB) wurden dabei durch Messungen auf einem modernen, komplexeren Stadler Doppelstöcker-Drehgestell ergänzt. Das dynamische Verfahren soll den Umfang des Prüfprozesses erweitern und neu auch geometrische Abweichungen sowie Dämpfereigenschaften eindeutig feststellen.

**Claudio Birrer**



Abbildung 1: Drehgestellprüfstand der Firma Nencki

## **Problematik und Hintergrundwissen**

Für das grundlegende Verständnis bedarf es einer breiteren Auslegung der Thematik des Rad-Schiene-Kontakts, dem Drehgestell und der Prüfstandstechnik. Das System aus Rad und Schiene übernimmt grundlegend die drei Aufgaben der Tragfunktion, Führungsfunktion und der Antriebs-/Bremsfunktion. Einerseits sorgt es für die Kraftübertragung der ganzen Last auf den Boden, andererseits muss es dafür garantieren, dass beim Lauf der Fahrt im Bogen (Kurve) die Entgleisungssicherheit garantiert ist. Diese wird durch die Radlast  $Q$  definiert, welche hoch genug sein muss, um gegen die lateral einwirkende Führungskraft  $Y$  zu bestehen.

Durch die leicht konische Form des Rads und den runden Schienenkopf steht die Normalkraft senkrecht zur Berührungstangentialebene. Zusätzlich treten im Aufstandspunkt auch Tangentialkräfte und Reibungskräfte auf. Diese Kräfte erzeugen bei nicht perfekt mittiger Lage des Radsatzes den Bogenlauf (Sinuslauf). Bis zu einer gewissen Grenzgeschwindigkeit ist der reale Sinuslauf gedämpft. Beim Überschreiten dieser Stabilitätsgrenze wird die Schwingung angefacht und die Amplitude der Querverschiebung steigt an. Dadurch kann es zum Anlaufen des Radkranzes an die Flanke des Schienenkopfes kommen. Durch diesen Zweipunktekontakt entstehen Reibungskräfte, die zum Ent-

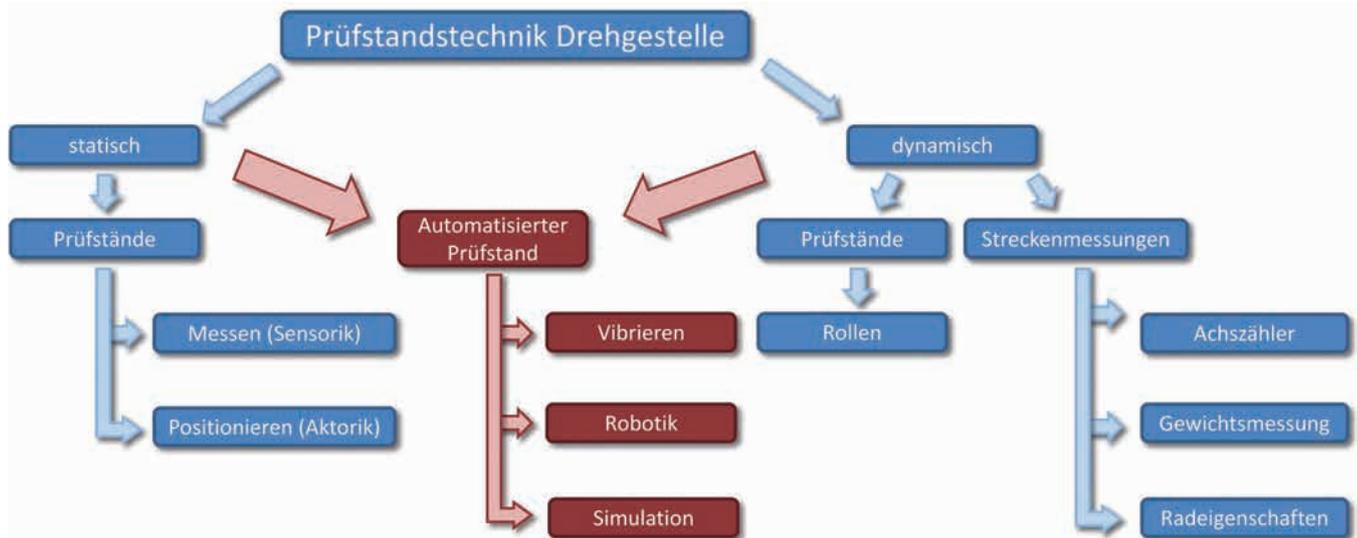


Abbildung 2: Übersicht der Prüfstandsarten

gleisen des Radsatzes führen können. Ausserdem wird das Gleis durch den aufschlagenden Radkranz verformt und zerstört. Die Güte von modernen Schienenfahrzeugen wird also massgeblich durch deren Laufverhalten bestimmt.

Werden zwei oder mehrere Radsätze gefedert und zu einem Drehgestell zusammengefügt, ermöglicht dies eine Verdrehung des Laufwerks um die Hochachse gegenüber dem Wagenkasten und somit die Konstruktion von längeren Fahrzeugen oder engere Kurvenfahrten. Eine gezielte Federung des Drehgestells kann die Führungskräfte im Gleis wesentlich vermindern, die Sicherheit erhöhen und den Komfort stark beeinflussen. Nicht zuletzt kommt diesen Komponenten bei hohen Geschwindigkeiten eine grosse Bedeutung bezüglich der Stabilität des Sinuslaufs zu. Reibungsdämpfer und Blattfedern wurden mehrheitlich durch Schraubenfedern, Metall-Gummifedern und Hydraulikdämpfer verdrängt. Zusätzliche Elemente wie z.B. Schlingerdämpfer, Achslenkerlager und Luftfedersysteme führen zu immer komplexeren Gesamtsystemen, um den immer höheren Anforderungen an Laufruhe, Sicherheit, Komfort und Höchstgeschwindigkeit gerecht zu werden. Somit ist auch die Verbindung zur Prüfstandstechnik hergestellt, denn nur mit deren Hilfe können diese Ansprüche sowie hohe Laufleistung und minimaler Verschleiss garantiert werden.

Mit einem Drehgestellprüfstand wie in Abbildung 1 gezeigt, wird unter anderem das Gewicht des Fahrzeugs simuliert, um das Verhalten des Drehgestells unter Last zu prüfen, bevor es zerlegt oder wieder am Fahrzeug montiert wird. Die vollautomatische Prüfung von Radlasten, Achsdistanzen, Achsabständen und Achsparallelität, Radrundlauf und Raddurchmesser, Einfederung und weiteren Parametern gehört zum Messablauf. Die Geometrie des Rad-Schiene Kontakts und der damit verbundene Sinuslauf erschwert auch hier die Positionierung der Aufstandspunkte in einer Ebene. Eine aufwändige Türmchenaktorik ist nötig, um diese Aufgabe zu erfüllen. Der neue DIN Standard 25043-7 setzt hier einen Meilenstein in der Prüfstandstechnik und definiert klare Eckpunkte in Sachen Positionierung des Rollmaterials, Testkriterien und Prüfqualität. Diese steigenden Anforderungen seitens der Industrie und die Minimierung der

Toleranzen führen zu immer komplexeren Lösungen und steiferen Prüfständen.

### Stand der Technik

Durch das Band gibt es relativ grosse Unterschiede in der Prüfstandstechnik. Eine Übersicht ist in Abbildung 2 zu sehen. Generell steht die statische Prüfung mittels einer hydraulischen Kraft und somit die simulierte Last des Wagenkastens im Vordergrund. Alternativ können Messungen der Aufstandskräfte direkt im Gleisbereich durchgeführt werden. Das Fahrzeug steht für eine statische Prüfung direkt mit allen Rädern auf den Prüfgleisen, während es für eine dynamische Prüfung langsam über das System rollt. Im Hochpreissegment befinden sich dynamische Rollenprüfstände für Anwendungen im Hochgeschwindigkeitsbereich. Mechatronische Prüfstände mit angetriebenen Rollen ermöglichen es, während des Testlaufs die gesamte Drehgestelllagerung zu verändern. Reaktionen bei bis zu 300 km/h können so problemlos getestet werden. Dieser Markt ist jedoch sehr klein und hochdynamische Rollenprüfstände bleiben eine Ausnahme.

Nachdem die erste Aufbruchswelle, die hauptsächlich in China stattgefunden hat, Geschichte ist, muss mit einer rückläufigen Nachfrage für Drehgestellprüfstände gerechnet werden, da fast alle alten und neuen Rollmaterialhersteller sowie die wichtigsten Hochgeschwindigkeitsbahnen ausgerüstet sind. Innovation ist nötig, um in diesem Markt weiterhin gegen die Konkurrenz bestehen zu können. Deshalb sollen die Vorteile der statischen und dynamischen Prüfstandstechnik in einem automatisierten Prüfstand kombiniert werden.

### Modellierung und Simulation

Berechnungen für den dynamisch erregten Prüfstand werden sowohl auf theoretischer Ebene durchgeführt, als auch mithilfe moderner Simulationstools. Das analytische Modell bildet die Basis dieses Ansatzes, während die Mehrkörpersimulation eine erweiterte Möglichkeit mit zusätzlichen Freiheitsgraden (Degree of Freedom, DOF) und dem Einfluss des nichtlinearen Rad-Schiene Kontakts bietet. Beide Modellierungsarten werden miteinander verglichen

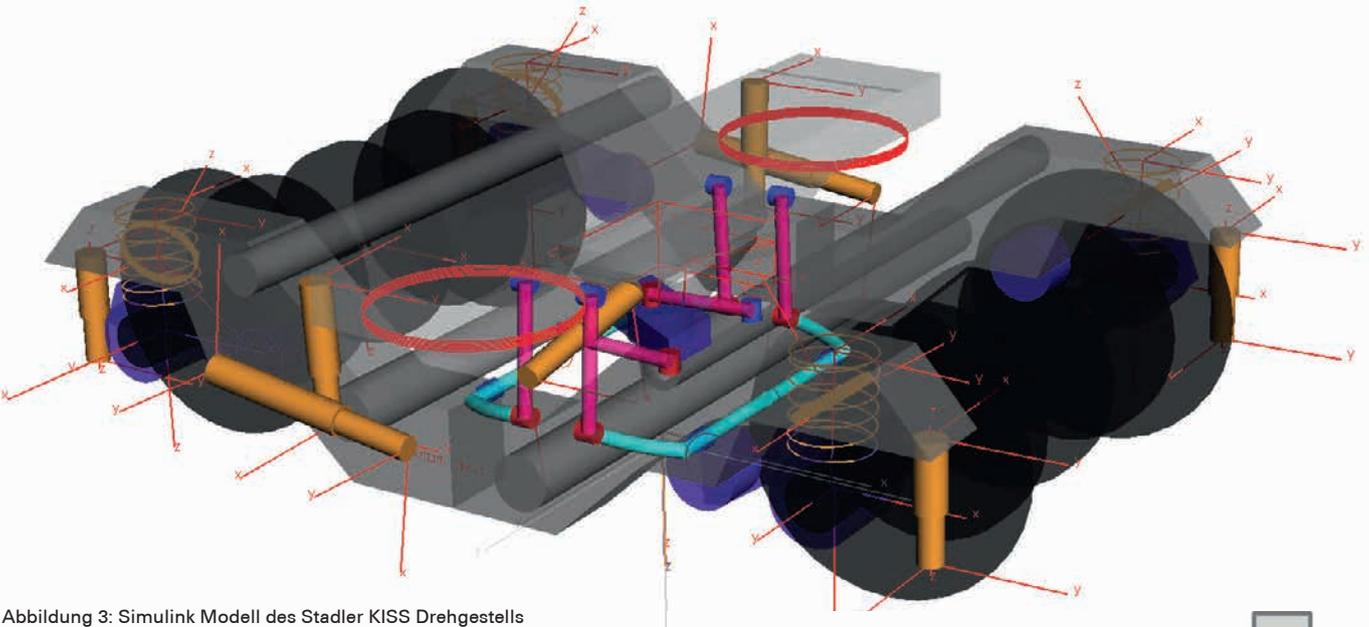


Abbildung 3: Simulink Modell des Stadler KISS Drehgestells

und die dynamischen Eigenschaften des Prüfstands inklusive Drehgestell mit Hilfe von  $n$  nichtlinearen gekoppelten Differentialgleichungen für das  $n$ -DOF System bestimmt. Das analytische Modell basiert auf einem Zweimassen-Feder-Dämpfer-System, das die Grundlage der neuen Technologie darstellt, während das komplexe Mehrkörpermodell mit 18 Freiheitsgraden die Möglichkeit bietet, eine präzise Simulation inklusive nichtlinearem Rad-Schiene Kontakt sowie verschiedener Feder- und Dämpfercharakteristiken durchzuführen. Durch Kontakte zur Firma Stadler Rail AG bestand zusätzlich die Möglichkeit, das komplexe moderne Modell eines Stadler KISS Drehgestells zu testen.

### Dynamischer Ansatz

Ein konventioneller statischer Prüfstand ermöglicht die Bestimmung der Primärfedersteifigkeit sowie die Messung der Lastverteilung, der Ebenheit des Drehgestellrahmens und vieler zusätzlicher geometrischer Parameter. Zusätzlich zu dieser klassischen Technologie werden nun auch dynamische Aspekte einbezogen. Mit einer direkt auf der Wiege montierten Erregereinheit ist es möglich, die Länge der individuellen Primär- und Sekundärfederungen zu bestimmen wie auch deren Steifigkeiten und Dämpfungsfaktoren. Aufgrund des Unterschieds zwischen statischer Einsenkung und dynamischer Auslenkung als Reaktion auf die Anregung, hat die Ebenheit der Radaufstandspunkte keinen Einfluss mehr auf die Berechnung der Drehgestellparameter. Somit ist bei einer Linearisierung der Feder- und Dämpferelemente um den Arbeitspunkt die perfekte Positionierung des Fahrwerks nicht mehr entscheidend. Diese Evaluationsmethode basiert auf der Analyse des Zeit- und Frequenzbereichs in der Nähe der Drehgestellresonanzen. Abbildung 4 zeigt den Messaufbau für die Validation am Stadler Drehgestell.

### Validation

Erste Tests und Validationsmessungen konnten mit einem ausrangierten Oberaargau-Jura-Bahn (OJB) Schmalspurdrehgestell auf einem Nencki Prüfstand durchgeführt werden. Weitere Messungen wurden mit dem neuen Stadler KISS Drehgestell (Abbildung 5) auf einem Normalspurprüf-

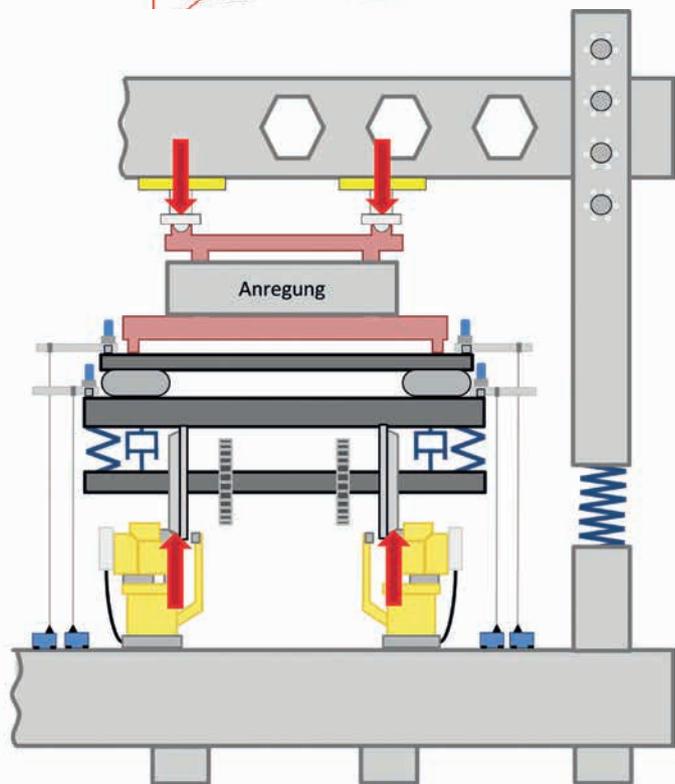


Abbildung 4: Übersicht Messaufbau für Stadler KISS Drehgestell

stand absolviert. Die Anregung im Frequenzbereich von 4-25 Hz wurde über das Anregungsmodul realisiert, während der tieffrequente Bereich direkt über die Hydraulik abgedeckt wurde. Die Messung von Beschleunigungskräften an verschiedenen Punkten am Drehgestell, an den Aufstandskräften der Räder und der Anregungskraft ermöglicht den Vergleich mit verschiedenen numerischen Simulationsszenarien. Es kann gezeigt werden, dass die Anregung zu klar messbaren Auslenkungen am Rahmen im Millimeterbereich während die gemessenen Kontaktkräfte sinusförmig oszillieren. Eine doppelte Integration der Beschleunigungssignale führt zur relativen Auslenkung an den Messpunkten bei höheren Frequenzen, während von 0-4 Hz vor allem die Seilgeber beachtet werden. Es konnte gezeigt werden, dass Modell und Realität gut vergleichbar sind.



Abbildung 5: Messaufbau Stadler KISS Drehgestell

### Ergebnisse und Ausblick

Neben dem Übertragungsverhalten der Drehgestelle, das die beiden dominanten Resonanzen des Mehrmassenschwingers zeigt, ist es möglich, die Dissipationskurven der Primärstufe aufzuzeichnen. Wird auf der x-Achse die Auslenkung und auf der y-Achse die Aufstandskraft dargestellt, entstehen elliptische Kurven, in denen die Steigung die aktuelle Steifigkeit der Primärfederstufe symbolisiert. Abbildung 6 zeigt die Kurven aus den Daten der Validationsmessungen. Die Fläche im Kreis ergibt die Energie im Dämpfer während einer Schwingungsperiode. Diese Fläche variiert durch den Zusammenhang der Frequenz und des Dämpfungsfaktors mit der Anregungsfrequenz.

Es konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe der dynamischen Anregung viel mehr Informationen über das Drehgestell gewonnen werden können. Es ist möglich, mit den Weg- und Kraftmesswerten die einzelnen Massen, die Primär- und Sekundärsteifigkeiten, sowie die Dämpfungskennwerte des Drehgestells zu berechnen. Zusätzlich ist der Messvorgang

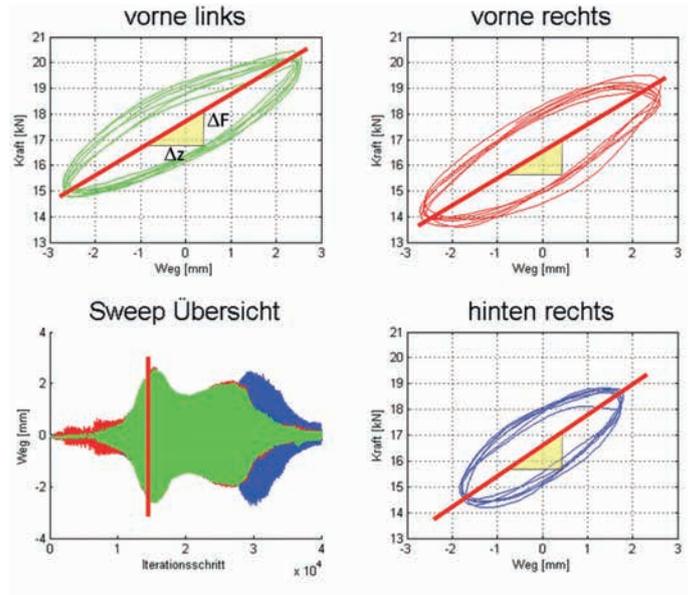


Abbildung 6: Dissipationskurven aus Messdaten

unabhängig von der statischen Verschiebung der Räder in vertikaler Richtung. Die dynamische Prüfung trennt Geometrie- und Lagefehler am Drehgestell von mechanischen Eigenschaften der Federn und bietet eine schnellere Prüfung mit weniger Aufwand beim Einrichten des Prüflings. Das führt zu einer Annäherung der Prüftechnik und der Drehgestellauslegung. Es zählen nicht nur geometrische Parameter und statische Angaben, auch das Laufverhalten in vertikaler und horizontaler Richtung muss beachtet werden. Nur so ist es möglich, den Sicherheitsstandard in der Schienenfahrzeugtechnik anzuheben.

Eine Add-on Lösung mit Anregungseinheit für bestehende Prüfstände und softwaretechnisch implementierter tieferequenter Erregung über die Hydraulik bietet einen klaren Mehrwert für den Kunden. Zusätzlich können die dynamischen Erkenntnisse in die Drehgestellüberwachung während des Betriebs einfließen und somit die Sicherheit im schienengebundenen Verkehr steigern.

### Projektteam

Prof. Dr. Roland Andereg, Leiter Institut für Automation FHNW, roland.andereg@fhnw.ch  
 Claudio Birrer, Bachelor of Science FHNW in Systemtechnik, Studierender Master of Science in Engineering MSE und wissenschaftlicher Assistent, claudio.birrer@fhnw.ch

# Mikrogenerator zur Energiegewinnung aus beliebig langsamen Rotationen für smarte Drehwinkelsensoren

In einem KTI-Projekt wird ein elektromagnetischer Generator nach dem Prinzip des Energy-Harvesting für die Gewinnung von Energie aus schnellen, aber auch beliebig langsamen Drehbewegungen entwickelt. Die Firma Camille Bauer AG kann damit ihre «Singleturn»-Winkelsensoren auf «Multiturn»-Typen erweitern.

**Hans Gysin**

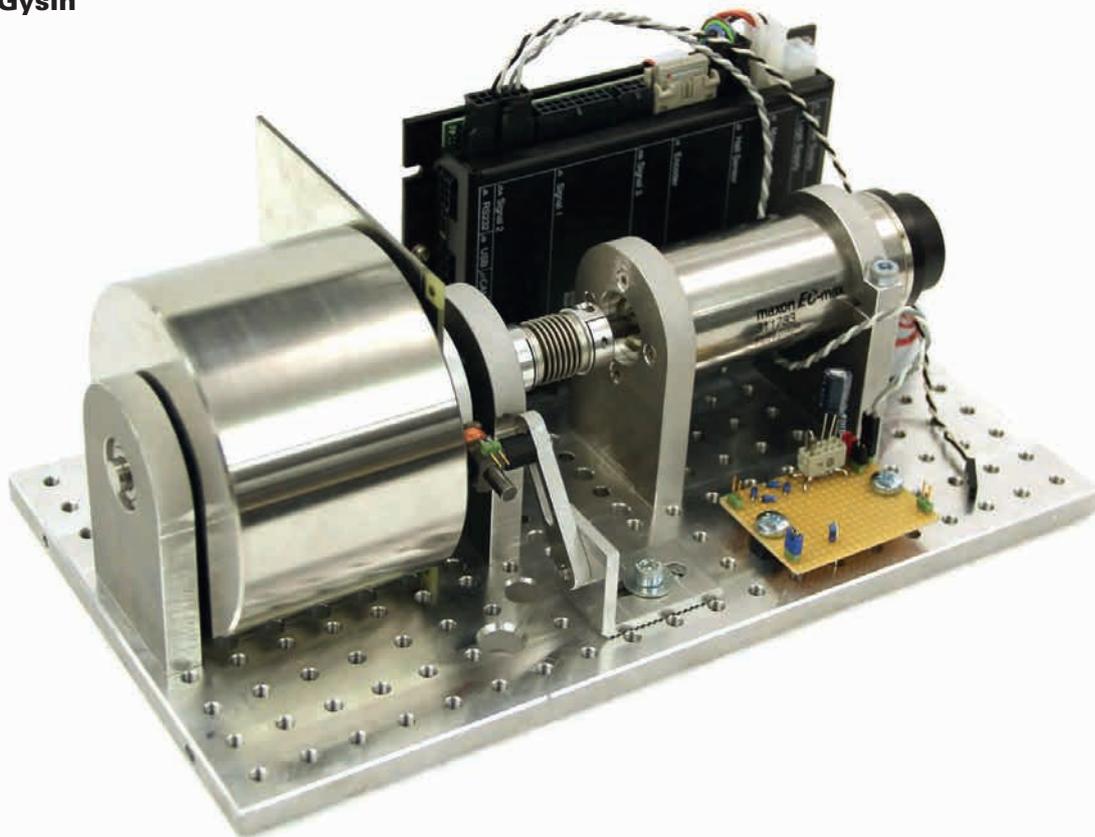


Abbildung 1 : Prüfstand

Für das Testen der Mikrogeneratoren wurde im Rahmen einer Studierendenarbeit der obige Prüfstand (Abb. 1) aufgebaut. Der Generator ist zwischen Antriebsmotor und Schwungmasse eingebaut. Die Schwungmasse dient dazu, bei extrem langsamen Bewegungen die Rückwirkungen des Mikrogenerators aufzufangen.

## **Konzeptphase**

Nach umfangreichen und vielfältigen Überlegungen fiel schon früh die Entscheidung auf einen elektromagnetischen Generator. Dies vereinfachte nicht nur den KTI-Projektantrag sondern es erleichterte generell den Einstieg in dieses überaus vielseitige Projekt. Erfahrungen aus vorangegangenen Studierendenprojekten ergaben ebenfalls entsprechende Hinweise

zur Stossrichtung für diese Entwicklung. Einerseits verlangte die Anforderung nach einer beliebig langsamen Drehzahl eine Energiespeicherung mit nachfolgender «schlagartiger» Entladung und andererseits war das Auftreten hoher Drehzahlen der Todesstoss für alle Ideen mit gespannten Federn und Ähnlichem. Zusätzliche Bedingungen wie die Drehrichtungserkennung und die Synchronisation der Winkelmessrichtung mit dem Umdrehungszähler waren enorme Hemschuhe auf dem Weg zu einem einfachen und kostengünstigen Generator. Ebenfalls unerwartet hohe Schwierigkeiten machte die Patentsituation. Der speziell für solche Zwecke entwickelte Wiegand-Sensor wurde in dieser Anwendung bereits von einem Konkurrenten patentiert und auch weitere einfache und gute Ideen fielen den aktuellen Patenten zum Opfer.

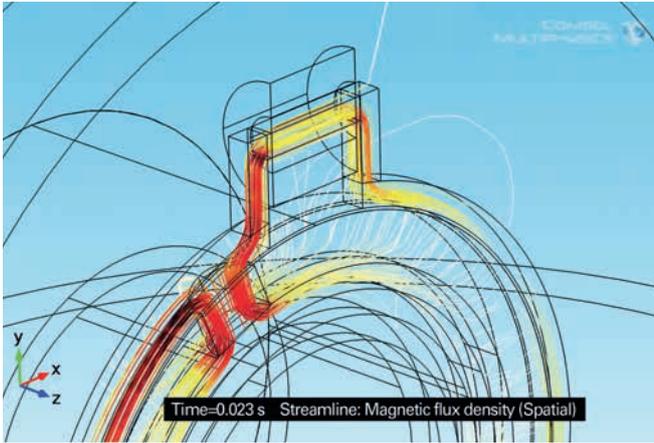


Abbildung 2: Simulationsgraphik

Die Bündelung der verschiedenen Ideen und Versuche zeigte klar, dass nur ein Prinzip mit einem beweglichen Rotor- oder Statorteil infrage kam. Diese mechanische Bewegung musste in der Lage sein, magnetische Feldenergie aufzuspeichern und in der Art eines Kippvorganges zu entladen. Dabei spielt es keine wesentliche Rolle, ob sich Spule, Magnet oder Eisenteil bewegt. Die Energiemenge, die bei einem solchen Vorgang geerntet werden kann, ist von der Stärke und der Änderungsgeschwindigkeit eines Magnetfelds in einer Spule abhängig. Um den Überblick zu behalten, wurde im Verlaufe des Projektes parallel zu den unzähligen Ideenskizzen und Handmustern ein morphologischer Kasten erstellt, der die massgebenden Aspekte eines solchen Generators übersichtlich aufzeigte.

### Stand des Projektes Ausblick

Nachdem im Herbst 2014 das Funktionsprinzip weitgehend geklärt war und der Bau eines Prototypen freigegeben werden konnte, stellten sich noch diverse Optimierungsaufgaben. Optimierungen in Bezug auf die Magnetdimensionen, die Spulengrössen und Windungszahlen, sowie bezüglich definitiver Geometrie und Materialwahl des «Stator- und Rotoreisens». Auch der Schaltungsentwurf zur Zwischenspeicherung der Energie und der Zählung der Impulse sowie das Layout der Leiterplatte musste in Angriff genommen werden. Während dem die ersten Arbeiten zur Dimensionierung des Magnetsystems

noch weitgehend mit 2-D Simulationen ausgeführt wurden, drängte sich für die Optimierungsaufgaben ein 3-D Simulationstool auf. Der Aufwand für diese Simulationsarbeiten stieg beträchtlich und man konnte bei weitem nicht alle der überlegten Einflussfaktoren in die Optimierung einbeziehen.

Die Simulationsgraphik (Abb.: 2) zeigt Feldlinien und Flussdichten im Bereich einer Statorspule und einem vorgelagerten Rotormagnet. Mit solchen Simulationen können ebenfalls die auftretende sprungartige Bewegung des Rotors und damit verbunden die Energiegewinnung über eine Belastung der Statorspule ermittelt werden.

### Ausblick

Ende 2014 standen erste Prototypen für Tests zur Verfügung. Auf den ersten Blick war die Funktion der Prototypen in Ordnung. Energie konnte auch bei langsamster Bewegung genügend «geerntet» werden, um den Prozessor zu starten und den Zählvorgang mit Berücksichtigung der Drehrichtung zu vollziehen.

Als nächstes stehen ausgedehnte Test- und Verbesserungsphasen bevor und parallel dazu natürlich die Validierung der Simulationsmodelle und der zugehörigen Berechnungen. Dauertests sowie jegliche Art von Tests zur Normenkompatibilität und die Kontrolle der Pflichtenheftvorgaben stehen ebenfalls auf dem Programm. Durch die laufende Berücksichtigung dieser Punkte - inklusive der Patente - während den Entwicklungsarbeiten, sind kaum mehr grosse Überraschungen zu erwarten. Von einem erfolgreichen Abschluss dieser Mikrogenerator-Entwicklung im 2015 kann deshalb ausgegangen werden.

### Projektteam

Camille Bauer AG, Entwicklung: Martin Zimmermann (Projektleitung) und Thomas Keusch

### Institut für Automation FHNW:

Benjamin Ernst, Bachelor of Science FHNW in Systemtechnik, Studierender Master of Science in Engineering MSE und wissenschaftlicher Assistent, benjamin.ernst@fhnw.ch  
 Lukas Kurmann, Master of Science EE und Doktorand  
 Prof. Hans Gysin, Projektverantwortlicher FHNW, Advisor

# Energieeffizientes Design von Strassenwalzen

Auf Grund der nichtlinearen Dynamik resultieren bei Erdverdichtungswalzen Effekte, die grosse Verdichtungskräfte erzeugen können. Die Nichtlinearität entsteht durch den Verlust des Bodenkontaktes zwischen Maschine und Verdichtungsgut. Bei Strassenwalzen gibt es bei Betrachtung des dynamischen Prozesses aber eine zusätzliche Restriktion. Die Asphaltverdichtungsmaschine muss ständig auf dem Boden bleiben, um den zu verdichtenden Belag nicht zu beschädigen. In diesem Projekt sollen Lösungen gefunden werden, um trotz dieser Restriktion eine grosse Verdichtungsleistung mittels nichtlinearer Dynamik zu erzielen.

**Dominik Wiss**



## Heutige Asphaltverdichtungstechnik

Aus dynamischer Sicht betrachtet findet die heutige Verdichtung von Asphalt linear statt. Abstrahiert kann der Asphaltbelag als Federsteifigkeit mit zusätzlicher Dämpfung betrachtet werden (siehe Abbildung 1). Diese Steifigkeitswerte hängen von mehreren Parametern ab, wie beispielsweise der Zusammensetzung des Asphalts, dessen Temperatur oder dem Aufbau der darunterliegenden Schichten, sowie

von weiteren mehr oder weniger vernachlässigbaren Faktoren. Während des Verdichtungsprozesses wird die Steifigkeit dieser Feder respektive des Untergrunds durch die Arbeit der Verdichtungsmaschinen zunehmen. Die Maschine kann allgemein als Zweimassenschwinger, bestehend aus Chassis und Walzenrad (Bandage), betrachtet werden [aus 1]. Die Gummipuffer zwischen den Massen sind vereinfacht als lineare Feder- und Dämpferelemente definiert.

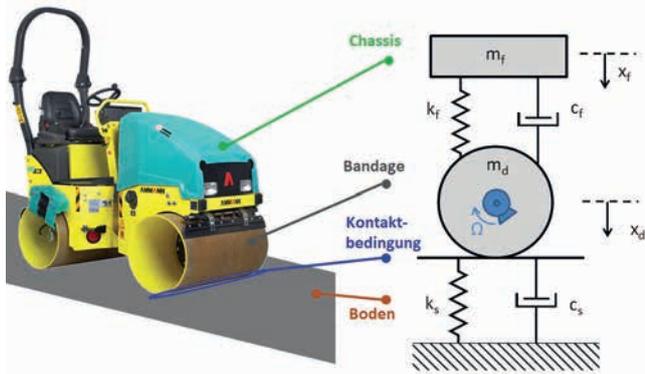


Abbildung 1: Verdichtungsmaschine und zugehöriges abstrahiertes Modell

Eine wichtige Kennzahl für das Mass der Verdichtungsleistung einer Walze ist der Vergleich der maximalen Bodenreaktionskraft zum gesamten Maschinengewicht ( $F_{bod}/mg$ ). Je höher dieser Wert ist, desto mehr Verdichtungskraft verglichen zur statischen Maschinenbelastung wird auf den Untergrund übertragen.

Eine statische Verdichtung erreicht ein  $F_{bod}/mg$  - Verhältnis vom Wert eins, da  $F_{bod}$  nur aus dem statischen Maschinengewicht besteht. Bei einer dynamischen Anregung mittels Unwuchterregern in der Bandage steigt der  $F_{bod}/mg$  - Wert symmetrisch mit grösserer Frequenz oder zunehmendem Unwuchtmoment an. Standardmaschinen besitzen üblicherweise zwei umschaltbare Unwuchtmomente und zugehörige Anregungsfrequenzen. In der Abbildung 2 links ist ersichtlich, dass der Verhältniswert im linearen Fall bis auf maximal zwei angehoben werden kann, ohne den Kontakt zum Untergrund zu verlieren. Ein Kontaktverlust der Bandage zum Untergrund würde einem negativen Wert und damit einem Ziehen am Boden gleichkommen.

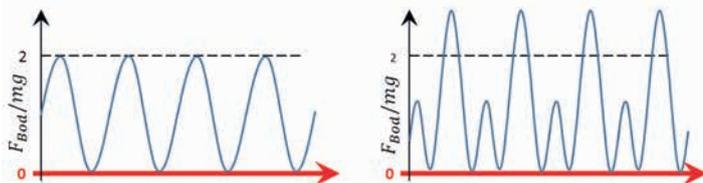


Abbildung 2: links lineare Verdichtung (symmetrisch) und rechts nichtlineare Verdichtung (asymmetrisch)

### Ziel des Projektes

Durch das Einbringen einer Nichtlinearität in diese vorhandene, vorwiegend lineare Dynamik, soll eine Asymmetrie in den Verhältnisverlauf eingebracht werden, wie in Abbildung 2 rechts dargestellt. Für die Verdichtung des Bodens ist der maximale Wert, also ein möglichst grosser Impuls, relevant. Dank der Asymmetrie durch die nichtlineare Dynamik könnte mit einer kleineren, leichteren Maschine trotzdem eine grosse Verdichtung erzeugt werden. Eine kleinere Maschine weist einen tieferen Energieverbrauch als eine Grossmaschine auf und der Transport fällt leichter aus. Das Ziel ist bei gleicher Prozessleistung eine Reduktion des Gewichtes von 50% bis 70% zu erreichen.

### Aktives oder selbstregelndes System

Insbesondere bei nichtlinearen Systemen zeigt sich je nach

Wahl oder Änderung der Parameter ein ganz anderes Verhalten des Systems. Für ein aktiv zu regelndes System ist die Ungewissheit über das zu regelnde System von grossem Nachteil. Grundsätzlich stehen zwei Varianten zur Regelung dieses nichtlinearen Systems zur Verfügung. Es sind dies aktive oder passive selbstregelnde Systeme, wie die folgende Abbildung 3 zeigt.

Eine aktive Regelung kann mit einem strukturumschaltenden Regler (Sliding Mode Control) vollzogen werden. Solche Regler schalten je nach Änderung der Systemparameter ihr Regelverhalten um. Für diesen Regler Typ muss allerdings die Dynamik möglichst vollständig beschrieben und auf stabile Bereiche reduziert werden.

Ein Fuzzy Regler ist denkbar, wenn die Möglichkeit besteht, einige wenige wichtige Parameter als Eingangsvariablen zu identifizieren und diese mittels logischen Beschreibungen mit den Stellgliedern zu verknüpfen.

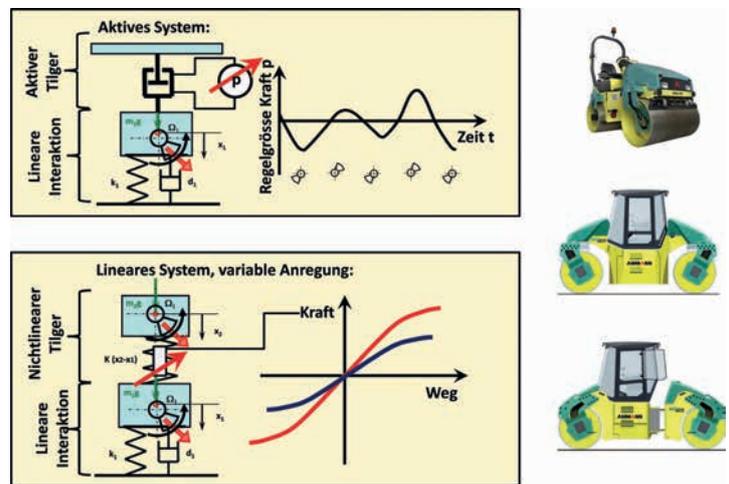


Abbildung 3: Skizzierung der Systeme mit aktiver und nichtaktiver Regelung

Bei einem selbst regelnden System ist das oben erwähnte Problem nicht vorhanden. Zusätzliche Elemente würden so gewählt, dass eine möglichst mechanische Regelung stattfindet. Das heisst, dass das Verhalten des Systems über einen weiten Bereich durch geeignete Parameterwahl in dessen Entwicklungsphase bestimmt wird. Die stabilen Attraktorbereiche müssten dann so ausgelegt werden, dass die gewünschten Verhaltensweisen je nach Stellsignal erfolgen.

Auf Grund dieser Fakten wird vorwiegend versucht, ein selbstregelndes System zu entwerfen.

### Simulationen und Messungen

Als erstes wurden die Bewegungsgleichungen des Systems aufgestellt und mit möglichen Varianten ergänzt. In Matlab/Simulink wurden anschliessend verschiedene Ansätze implementiert und durch Simulationen untersucht. Es haben sich verschiedene mögliche Aufbauten herauskristallisiert.

Ein realisierbarer Ansatz wurde vom KTI-Projekt Partner Ammann Schweiz AG in Langenthal aufgebaut. Die Unter-

suchungen haben vielversprechende Resultate geliefert. Die Validierung der Simulationsresultate mit den Messungen des realen Funktionsmusters ist noch nicht abgeschlossen.

Das Verhalten der Dynamik konnte ebenfalls mit dem Funktionsmuster (siehe Abbildung 3) einer Rüttelplatte, das von Studenten der FHNW erstellt wurde, überprüft werden [aus 2]. Die Untersuchungen mit diesem einfachen System haben nebst besserem Verständnis der Dynamik zu weiteren vorstellbaren Lösungsansätzen verholfen.

Ein weiterer Versuch, die aufgestellten und simulierten Lösungsansätze praktisch zu validieren, fand mit einem elektromechanischen Analogon statt. Der Versuch, ein elektronisches Versuchsmuster als Analogon zu erstellen, überzeugte durch dessen Einfachheit im Aufbau verglichen mit einem mechanischen Funktionsmuster. Passive Bauelemente reichen aus, um einen Schwingkreis zu realisieren und somit ein dynamisches Verhalten zu erreichen. Auch in der Elektrik gibt es Energiespeicher, wie sie in der Mechanik anzutreffen sind. Die Energiespeicherung erfolgt entweder in elektronischer (Kondensator) oder magnetischer Form (Spule), vergleichbar dazu ist in der Mechanik die Masse und die Feder, wie nachstehende Tabelle 1 zeigt. Ein mit der mechanischen Dynamik vergleichbares Verhalten der nichtlinearen Effekte konnte auch bei elektrischen Komponenten - vorerst mit einer Simulation in LTSpice - nachgewiesen werden.

	Elektrisch	Mechanisch
Veränderliche	Spannung $u$ Strom $i$	$v$ Geschwindigkeit $p$ Kraft
Systemgrößen	Induktivität $L$	$h = \frac{1}{k}$ Federkonstante
	Widerstand $R$	$d = \frac{1}{b}$ Dämpfung
	Kapazität $C$	$m$ Masse

Tabelle 1: Variablenzuordnung des elektromechanischen Analogons [aus 3]

## Ergebnisse und Ausblick

Ein realisierbarer Ansatz wurde auf einem Funktionsmuster aufgebaut und ersten Tests unterzogen. Dabei konnte eine nichtlineare Dynamik ohne Bodenkontaktverlust erzeugt werden. Mit weiteren Versuchen - und allenfalls einem weiteren Funktionsmuster beruhend auf anderen Ansätzen - soll der optimale mechanische Aufbau gefunden werden.

Im weiteren Projektverlauf sollen bereits ausgearbeitete Varianten und Lösungen durch Patente geschützt und eine genaue technische Umsetzungsvariante spezifiziert werden.

## Projektteam

Prof. Dr. Roland Anderegg, Leiter Institut für Automation FHNW, roland.anderegg@fhnw.ch

Dominik Wiss, Bachelor of Science FHNW in Systemtechnik, Student Master of Science in Engineering MSE und wissenschaftlicher Assistent, dominik.wiss@fhnw.ch

## Referenzen

- [1] Anderegg R., Kaufmann K.: Intelligent Compaction with Vibratory Rollers: Journal of the Transportation Research Board No 1868, TRB, Washington DC, 2004. (p.124-134)
- [2] Marending P., Niederberger S.: Modellaufbau eines Schwingungssystems mit zwei Freiheitsgraden und einseitiger Bindung, FHNW, 2010
- [3] Klotter K.: Die Analogien zwischen elektrischen und mechanischen Schwingern: Archive of Applied mechanics, 01/1950

# Mit dem Bachelor-Diplom zu neuen Karriereperspektiven

Die praxisorientierte Ingenieur-Ausbildung an der FHNW bereitet die Studierenden hervorragend auf den Berufseinstieg vor und eröffnet neue Karriereperspektiven. Dabei zeichnet sich ein neuer Studientrend ab: Immer mehr junge Frauen und Männer wählen das berufsbegleitende Studium – davon profitieren auch die Arbeitgeber.

Die Informatikerinnen und Informatiker sowie die Ingenieurinnen und Ingenieure der FHNW sind bei Unternehmen in Industrie und Wirtschaft äusserst gesucht.

## Einblicke in die Unternehmenswelt

Die praxisorientierte Ausbildung an der FHNW ist ein Erfolgsmodell. Ab dem ersten Semester arbeiten die Studierenden an Projekten und lernen im Laufe der Ausbildung verschiedenste Unternehmen und Branchen kennen, eine ideale Vorbereitung auf ihren Berufseinstieg.

## Neuer Studientrend – auch in klassischen Disziplinen

Nebst dem klassischen Vollzeitstudium entscheidet sich eine zunehmende Zahl von jungen Frauen und Männern für die berufsbegleitende Ausbildung.

## Job und Studium kombinieren – unabhängig bleiben

Das Ausbildungskonzept ermöglicht inhaltlich und zeitlich eine individuelle Gestaltung des Studiums. Für viele Studierende ist die Ergänzung von Theorie und Praxis ideal. Sie bleiben finanziell unabhängig und können das Erlernte direkt in ihrem Unternehmen umsetzen.

## Arbeitgeber profitieren gleich mehrfach

Die Arbeitgeber profitieren gleich mehrfach vom Bachelor-Studium ihrer Mitarbeitenden: Das Know-how bleibt dem Betrieb erhalten und im Rahmen von Studierendenprojekten können Aufgabenstellungen aus dem Unternehmen bearbeitet werden. Und fast immer sind berufsbegleitend Studierende nicht nur sehr belastbar, sondern hoch motivierte Mitarbeitende, die dem Unternehmen auch über den Studienabschluss hinaus erhalten bleiben.

## Zentral studieren auf dem neuen Campus Brugg-Windisch

Mit Ausnahme der Optometrie (Olten) und Mechatronik trinational (Muttenz) werden die Bachelor-Studiengänge auf dem neuen Campus Brugg-Windisch FHNW, direkt neben dem Bahnhof SBB, durchgeführt. Die Studierenden profitieren vom anregenden Campus-Ambiente mit seiner modernsten Lernumgebung sowie von vielen sportlichen und kulturellen Angeboten.

[www.fhnw.ch/technik/bachelor](http://www.fhnw.ch/technik/bachelor)

## Technik-Infotage in Brugg-Windisch

13. November 2015, 4. März 2016, 15. April 2016: [www.fhnw.ch/technik/infotage](http://www.fhnw.ch/technik/infotage)



## Das Studium als Investition in die Zukunft

«Mit dem Studium an der FHNW erhalte ich ein breitgefächertes Wissen und kann mein Know-how spezifisch am Arbeitsplatz anwenden.»

André Renggli, Student berufsbegleitendes Studium, Bachelor of Science FHNW in Systemtechnik; Projektleiter, Chestonag Automation AG, Seengen



## Mein Studium, meine Faszination

«Die Studienrichtung Systemtechnik wählte ich, weil mich Automation schon immer fasziniert hat. Die Ingenieurausbildung bot mir einen vertieften Einblick in dieses Gebiet und in verschiedene andere Technologien.»

Silvia Walti, Diplomandin Bachelor of Science FHNW in Systemtechnik mit Vertiefung Automation

# Entwicklung eines innovativen Online-Diagnosesystems für die zustandsbasierte Wartung von Produktionsanlagen

Die Anforderungen an den modernen Fertigungsbetrieb steigern sich kontinuierlich. Eine Fertigungsanlage muss eine möglichst hohe Verfügbarkeit und Produktivität bei minimalen Betriebs- und Wartungskosten haben. Um dieses Ziel zu erreichen, wird im Rahmen eines KTI-Projekts ein Online-Diagnosesystem entwickelt, das basierend auf Sensordaten den aktuellen Zustand der Anlage berechnet, klassifiziert und visualisiert. Dabei werden Methoden der mathematisch-physikalischen Modellbildung mit statistischen Methoden kombiniert.

**David Zogg**



Wesentliche Innovationen dieses Projekts sind intelligente, modellbasierte Diagnosealgorithmen, die als Module in einer erweiterbaren Plattform zur Verfügung gestellt werden. Die Entwicklung der Diagnosealgorithmen und Hardware-Anbindung wird am Institut für Automation FHNW durchgeführt, während die Softwareplattform inklusive Visualisierung am Institut für Mobile und Verteilte Systeme FHNW entwickelt wird.

## **Wartungsszenarien**

Prinzipiell wird zwischen folgenden Szenarien für die Wartung unterschieden:

- **Reaktive Wartung:** Es gibt keine Planung. Die Wartung wird erst dann durchgeführt, wenn ein Fehler auftritt oder eine Komponente ausfällt. Die Folgen sind unerwünschte Stillstandszeiten, die hohe Kosten verursachen.
- **Präventive Wartung:** Die Wartungsintervalle werden vorausschauend geplant. Ziel ist, die Wartung durchzuführen, bevor einzelne Komponenten ausfallen. In der Praxis werden meist feste Wartungsintervalle definiert, die sich aufgrund der vorgegebenen Lebensdauer der einzelnen Komponenten ergeben (Abbildung 1 links). Um auf der sicheren Seite zu sein, werden die Wartungsintervalle eher zu kurz gewählt. Damit werden oft unnötige

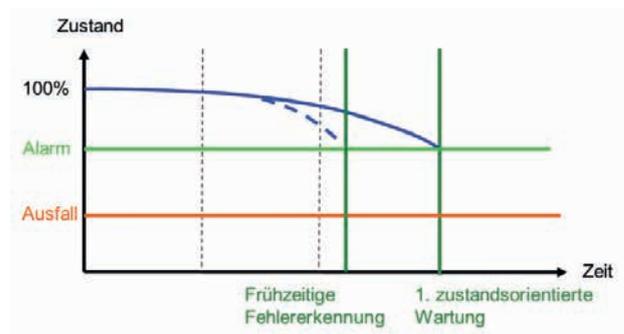
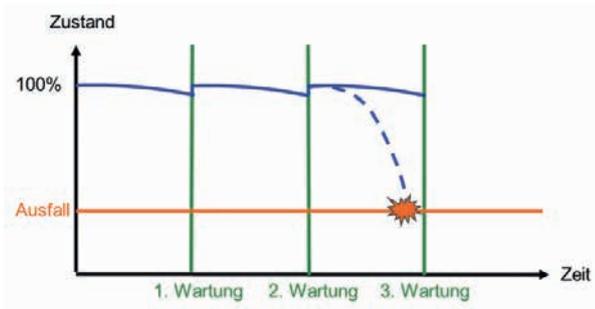


Abbildung 1: Präventive Wartung mit festen Intervallen (links) und zustandsbasierte Wartung (rechts)

Wartungen oder Wechsel von Komponenten durchgeführt, was wiederum zu hohen Kosten führt.

- Zustandsbasierte Wartung:** Bei dieser Methode wird der tatsächliche Zustand der Anlage und der einzelnen (kritischen) Komponenten laufend erfasst. Es muss nur dann eine Wartung durchgeführt werden, wenn dies tatsächlich erforderlich ist (Abbildung 1 rechts). Dabei müssen nur diejenigen Komponenten ausgetauscht werden, die tatsächlich in einem schlechten Zustand sind. Damit kann die Anzahl der Wartungszyklen reduziert werden und aus dem momentanen Zustand der Anlage kann der Zeitpunkt des nächsten Wartungseinsatzes vorausgesagt werden. Dies vereinfacht die Logistik der Ersatzteilhaltung. Zudem können vorzeitige Ausfälle durch Fehler-Früherkennung verhindert werden. Aufgrund höherer Anlagenverfügbarkeit und Einsparungen auf der Ersatzteilseite können damit massiv Kosten gespart werden.

Im vorliegenden Projekt wird ein Diagnosesystem entwickelt, welches die zustandsbasierte Wartung ermöglicht.

### Anlage und Messgrößen

Abbildung 2 zeigt eine typische Anlage. Die Anlage besteht aus verschiedenen Modulen, wobei jedes Modul für einen bestimmten Bearbeitungsschritt zuständig ist. Ein Modul enthält mehrere Komponenten wie z.B. x-, y- und z-Achsen mit Antrieben. Für einen Antrieb (Motor mit Spindel) werden folgende dynamische Messgrößen ausgewertet:

- Bewegungsprofil (Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung über der Zeit)
- Lastprofil (Stromaufnahme über der Zeit)
- Erhitzung (Temperaturverlauf über längere Zeit)
- Vibration (Spektrogramm mit zeitlichem Verlauf des Frequenzinhalts)

Da die gleichen Module in verschiedenen Anlagen vorkommen, wird das Diagnosesystem als frei konfigurierbare, modulare Plattform aufgebaut.

### Methodik der Fehlerdiagnose

Grundsätzlich wird das Diagnosesystem während einer Adaptionphase auf die Anlage eingelernt (Teaching, Abbildung 3). Dies geschieht während der Inbetriebnahme. Als wichtige Voraussetzung für die spätere Umsetzung sollen hier nur fehlerfreie Zustände eingelernt werden. Die fehlerhaften Zustände werden aus physikalischen Zusammenhängen (Modellen) interpretiert. Im Gegensatz zu rein

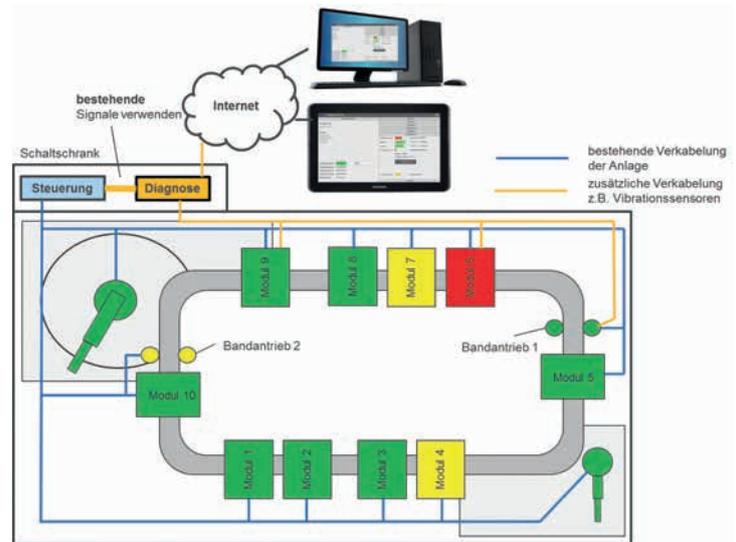


Abbildung 2: Aufbau einer typischen Anlage, bestehend aus einzelnen Modulen.

datenbasierten Methoden [1] wird hier mit analytischer Redundanz aus physikalischen Modellen gearbeitet [2]. Alle verwendeten Signale und Parameter haben eine physikalische Bedeutung, was die Interpretation wesentlich vereinfacht [3] [4].

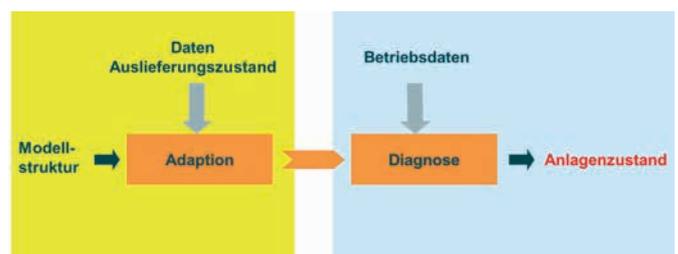


Abbildung 3: Adaption (Teaching) und Betrieb des Diagnosesystems

Für die Entwicklung der modellbasierten Diagnosemethoden werden folgende Schritte durchgeführt:

- Verständnis der **physikalischen Zusammenhänge** eines Moduls aufbauen. Bei einem Antrieb ist dies beispielsweise der Zusammenhang zwischen der Leistungsaufnahme, der Belastung und dem thermischen Verhalten (Erwärmung).
- Aufstellen der **Modellgleichungen** in Form von Differentialgleichungen oder algebraischen Gleichungen mit physikalischen Parametern.

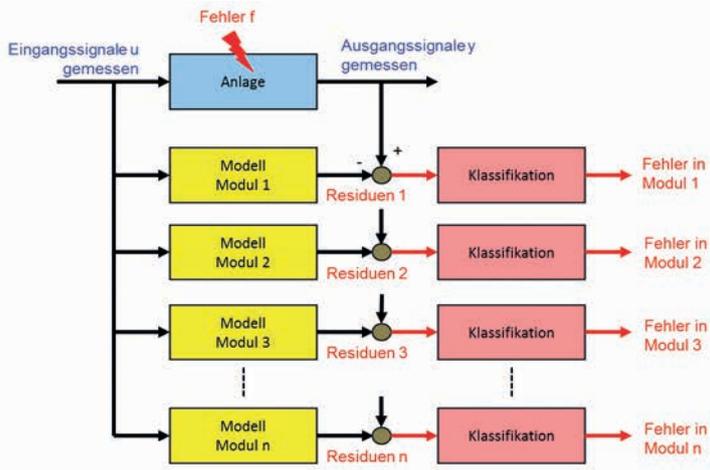


Abbildung 4: Residuen-Methode, Vergleich von Anlagen- und Modelldaten

- Berücksichtigung der **Herstellerdaten** in Form von Datenblättern und Kennlinien. Es soll möglichst viel Information zum Auslegungszustand aus bekannten Herstellerdaten einfließen, um den Aufwand für die Parameter-Identifikation (siehe nächster Schritt) zu minimieren.
- Entwicklung von Algorithmen der **Parameter-Identifikation**, um unbekannte Parameter während der Adaption einzulernen (Teaching) [5] [6]
- Entwicklung von Algorithmen der **Fehlerdetektion**. Während dem Betrieb werden die Modelldaten mit den realen Messdaten der Anlage verglichen. Damit entstehen die **Residuen** (Abbildung 4), die statistisch ausgewertet und mit Grenzwerten verglichen werden [1] [7]
- Entwicklung von Algorithmen der **Fehlerdiagnose**. Über eine Klassifikation wird aus den Residuen auf die Ursache der Fehler geschlossen. Für die Klassifikation werden deterministische Methoden wie **Fehlerbäume** (Abbildung 5) oder statistische Methoden wie **Clustering-Algorithmen** (Abbildung 6) verwendet [8]. Die Entscheidungskriterien der Fehlerbäume bzw. die Bereichsgrenzen der Cluster werden während dem Teaching eingelesen.

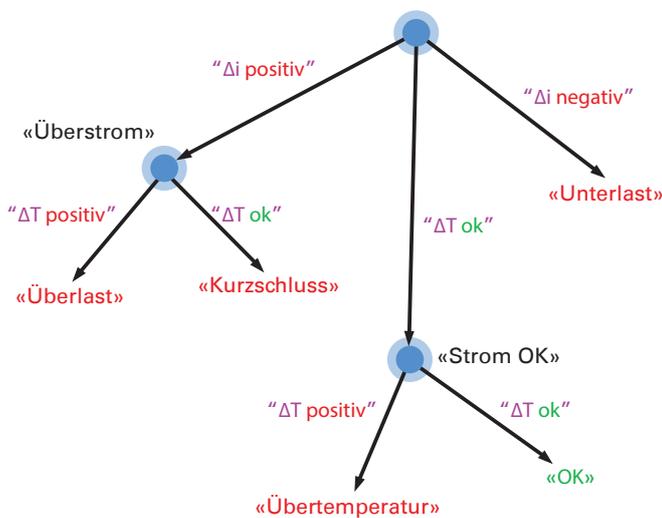


Abbildung 5: Klassifikation über Fehlerbaum (Beispiel Antrieb)

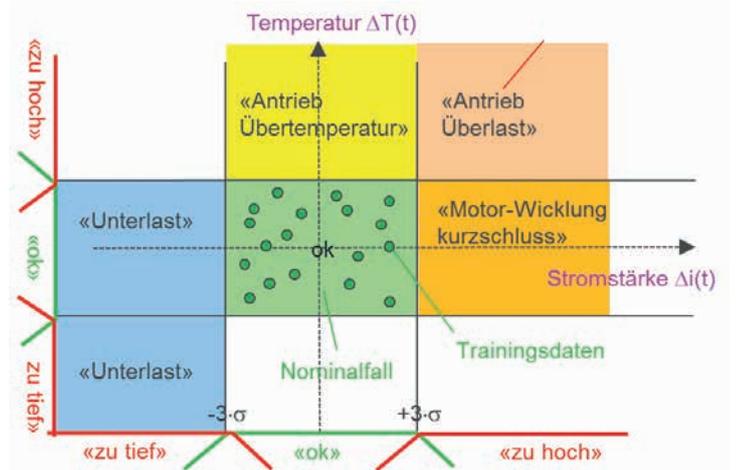


Abbildung 6: Klassifikation über Clustering (Beispiel Antrieb)

### Fazit

Da das Projekt aufgrund des Plattformgedankens sehr umfangreich ist, muss schrittweise entwickelt werden. Im momentanen Entwicklungsschritt werden die Methoden der Fehlerdiagnose für ein typisches Modul mit Spindeltrieb entwickelt und anhand von Daten realer Anlagen getestet. Erste Resultate sind vielversprechend. Parallel dazu wird eine objektorientierte Software-Struktur in LabVIEW aufgebaut, die einen modularen Aufbau des Diagnosesystems ermöglicht. Die freie Konfigurierbarkeit und Erweiterbarkeit ist im Vordergrund.

### Ausblick

Im weiteren Projektverlauf werden die Diagnosemethoden auf weitere Module appliziert und in die LabVIEW-Software integriert. Parallel dazu wird vom Institut für Mobile und Verteilte Systeme FHNW eine umfangreiche Visualisierungs-Software erstellt, welche die weltweiten Daten verschiedener Anlagen in einer ansprechenden Form für Manager und Service-Techniker zur Verfügung stellt. Im letzten Schritt sollen die LabVIEW- und Visualisierungs-Software zusammen «verheiratet» werden und als Proof of Concept dem Industriepartner übergeben werden (geplant 2016).

### Projektteam Institut für Automation FHNW

Prof. Dr. David Zogg, Leitung KTI-Projekt Hochschulpartner, david.zogg@fhnw.ch  
Silvano Germann, Entwicklung LabVIEW Software, silvano.germann@fhnw.ch

### Projektteam Institut für Mobile und Verteilte Systeme FHNW

Prof. Dr. Jürg Luthiger, Institutsleiter, juerg.luthiger@fhnw.ch  
Matthias Krebs, Entwicklung Visualisierungs-Software, matthias.krebs@fhnw.ch

### Projektteam Industriepartner

Dr. Chris Rennhard, CEO LCA Automation AG, chris.rennhard@lca-automation.ch  
Marc Engeler, Entwicklung und Leitung KTI-Projekt LCA Automation AG, marc.engeler@lca-automation.ch

### Literaturverzeichnis (Auswahl)

- [1] M. Kantardzic, Data Mining, IEEE Press, 2011
- [2] R. Isermann, Fault-Diagnosis Systems, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2006
- [3] D. Zogg: Fault Diagnosis for Heat Pump Systems, Diss. ETH No. 14594, Zürich, 2002
- [4] D. Zogg, E. Shafai: A Short-Term Rating Method for Heat Pump Heating Systems – Phase 5: Test of the Fault
- [5] D. Treyer, D. Zogg, "Model and Expert Knowledge Based Fault Diagnosis for a Heat Exchanger", IEEE Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), October 2013, Nice, France
- [6] L. Ljung, System Identification, Theory for the User, Prentice Hall, Second Edition, 2009
- [7] J. J. Gertler, Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems, Marcel Dekker Verlag, 1998
- [8] Ch. Borgelt, F. Klawonn, R. Kruse, D. Nauck, Neuro-Fuzzy-Systeme, 3. Auflage, Vieweg Verlag, 2003
- [9] 6. VDI-Fachtagung, Schwingungsüberwachung, Leonberg bei Stuttgart, 24. und 25. Mai 2011

# Vollautomatische, robotergestützte Schleifzelle

Armaturen müssen heute mehr sein als nur Wasserhähne: In einem schön gestalteten Bad oder einer durchgestylten Küche sind Designerarmaturen gefragt. Die erhöhten Ansprüche an die Form haben ihre Auswirkung auf die Produktionstechnik. Besonders beim Schleifen und Polieren der Designoberflächen mit dem Roboter zeigen sich sehr spezielle Herausforderungen. Diese wurden im gemeinsamen, abgeschlossenen Forschungsprojekt untersucht und gelöst.

**Max Edelmann**



## **Ausgangslage und Projektmotivation**

Der Schleif- und Polierprozess bei der Herstellung von Armaturen für Küche und Bad ist eine zentrale Kernkompetenz der Firma Franke Water System AG KWC in Unterkulm. Ursprünglich ist dies ein Handarbeitsschritt, der von erfahrenen Facharbeitern ausgeführt werden musste, bevor der Industrieroboter in diesen Fertigungsbereich Einzug fand. Die Armaturrohlinge werden an ein, über eine Kontaktrolle geführtes, Schleifband gepresst, um die gewünschte Oberflächenqualität der Designarmatur zu erhalten. Durch geometrische Schwankungen der Armaturrohlinge und Prozessunsicherheiten ist es erforderlich, die programmierte Roboterbahn oder einzelne Fertigungsparameter kontinuierlich anzupassen, um den hohen Qualitätsanforderungen gerecht zu werden.

Mit Hilfe der Vollautomation dieses Prozesses soll es möglich sein, die Seriengröße einer Armatur auf die Einheit 1 zu senken und die Flexibilität der Produktion zu maximieren. Diese vollkommen neue Produktionsmethode erlaubt es, die Firma KWC gegenüber der internationalen Konkurrenz durch eine kostenoptimierte Produktion und ein wesentlich flexibleres und breiteres Angebot vorteilhaft zu positionieren.

Neben umfangreichen Untersuchungen im Rahmen der Situationsanalyse zum Fertigungsprozess bei KWC bildet eine Kombination der Roboterkinematik und -dynamik mit der nichtlinearen Dynamik von Systemen mit einseitigen Bindungen die Grundlage der Innovation. Mit der Steigerung der Prozesseffizienz und der damit einhergehenden Qualitätsnachverfolgbarkeit nimmt der Energiebedarf pro gefertigte Armatureinheit infolge des wegfallenden Einrichtaufwands ab.

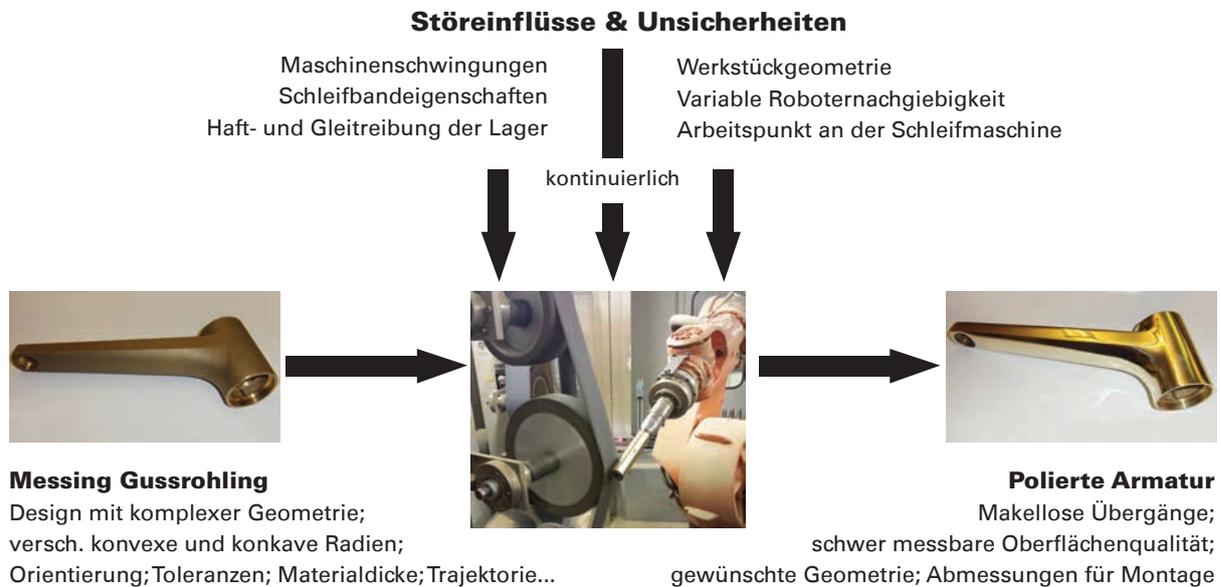


Abbildung 1 Übersicht zu den Herausforderungen des Schleifprozesses von Armaturen

### Projektherausforderungen

Auf Basis einer analytischen Modellierung und eines Simulationsmodells wurde der robotergestützte, dynamische Schleifprozess für Freiformflächen modelliert, simuliert und validiert. Das entwickelte Modell dient dazu, den Schleifprozess von Armaturen zu automatisieren und den Einrichtungsaufwand für zu schleifende Armaturenserien zu minimieren. Neben der erhöhten Produktivität resultiert daraus die Möglichkeit, sogar eine einzelne Armatur automatisiert und ökonomisch schleifen zu können. Dies verringert den Lagerbestand für die Produktion massiv.

Der vollautomatische Prozess hat aber seine speziellen Eigenschaften, da die gewünschte Armatur-Geometrie sehr spezifische Schleifeigenschaften benötigt, der Roboter aber stellungsabhängig grosse Unterschiede in den Prozessparametern bewirken kann. Dadurch ist es schwierig vorherzusagen, ob die anspruchsvollen Vorgaben an den Prozess eingehalten werden können,

- die Gushaut des Armaturrohlings vollständig abzutragen
- die notwendigen Toleranzen zu allen Anbauteilen, wie z.B. Mischhebel und Sockel, einzuhalten
- nach dem Fertigungsschritt eine Armatur mit makellosen, fließenden Übergängen zu allen Freiformflächen des Designwerkstücks zu erhalten, obwohl Lagefehler, Werkzeugverschleiss und Gusstoleranzen zu erwarten sind.

Vergleiche dazu auch Abbildung 1 Übersicht zu den Herausforderungen des Schleifprozesses von Armaturen.

### Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts sind viele neue Erkenntnisse zu den Fertigungssystemen bei KWC entstanden. Zur Lösung des Problems wurde ein Funktionsmuster entwickelt, mit dem der Schleifprozess aktiv geregelt werden kann. Alle wesentlichen Prozessunsicherheiten werden durch einen ganzheitlichen Regelalgorithmus kompensiert und bilden ein weiteres wichtiges Ergebnis der Zusammenarbeit.

Das entwickelte System ist in der Lage die prozessrelevanten Grössen der Schleifbearbeitung im Regelalgorithmus

zu integrieren. Über eine speziell entwickelte Strategie zur Prozessvorsteuerung können Unsicherheiten durch geometrische Abweichungen der Gussarmaturen, kontinuierlichen Schleifbandverschleiss und sich verändernde Maschinenparameter kompensiert werden. Die aktive Regelung des Prozesses berücksichtigt dabei die grösste Herausforderung, eine stark variable Robotersteifigkeit im Bearbeitungsprozess. Werkstücke mit geometrischen Abweichungen können trotz sich verändernden Maschinenparametern auf ein Mass mit entsprechender Kontur gebracht werden, das den hohen Qualitätsanforderungen des Armaturenerstellers und dessen Kunden entspricht.

Mit der entwickelten Lösung kann die Losgrösse von 200 auf 1 reduziert werden, bei gleichzeitigem Wegfall von Einrichtzeiten. Das System ist zudem nachrüstbar gestaltet und kann roboterunabhängig auf andere Fertigungszellen übertragen werden. Neben den regelungstechnischen Neuerungen kann der korrekte Betriebszustand der Schleifzelle automatisch überwacht werden, was eine konstant hohe Qualität garantiert.

### Projektpartner

Franke Water Systems AG, KWC

### Projektförderung:

Kommission für Technologie und Innovation KTI

### Projektteam

Prof. Dr. Roland Anderegg, Leiter Institut für Automation FHNW, roland.anderegg@fhnw.ch

Max Edelmann, Wissenschaftlicher Assistent und Absolvent Master of Science in Engineering MSE, max.edelmann@fhnw.ch

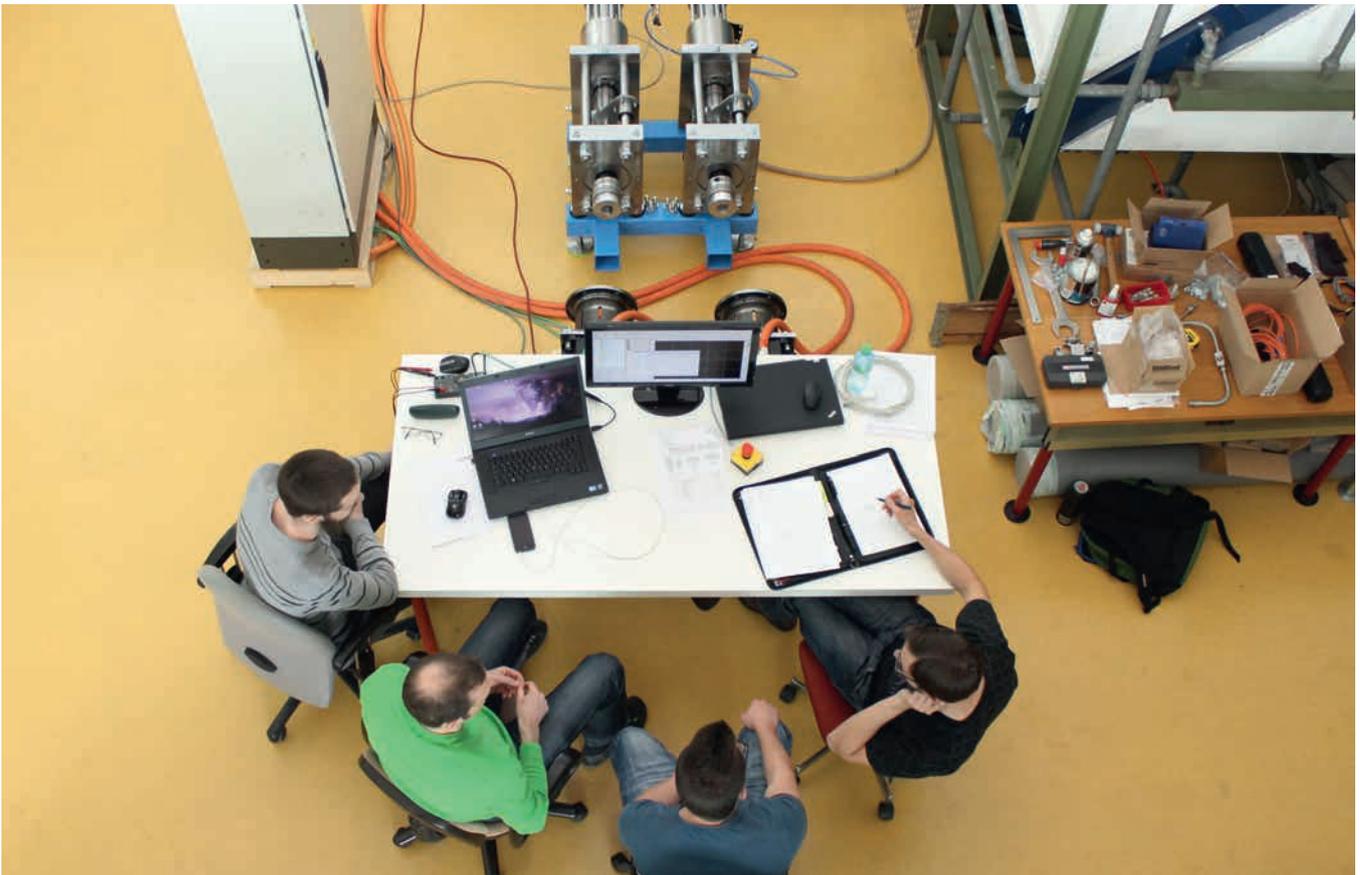
### Bachelor-Arbeiten im Studiengang Systemtechnik:

- Patrick Hunziker, Abschluss 2011
- Pascal Keller, Abschluss 2011
- Andreas Lüthi, Abschluss 2012
- Daniel Gautschi, Abschluss 2013

# Hochdruckwasserstrahlschneiden

Im Rahmen eines KTI-Projekts zusammen mit den Industriepartnern Jet Cut Power GmbH, Zaugg Maschinenfabrik AG und Saphirwerk AG hat das Institut für Automation FHNW die Konzeption und Validation eines Elektro-Direktantriebs für ein Wasserstrahlschneidaggregat abgeschlossen.

**Lukas Kurmann**



## Einleitung

Heute werden Wasserstrahlschneidaggregate in vielen Industriezweigen eingesetzt. Die heutigen Wasserstrahlschneidaggregate werden ausschliesslich hydraulisch gesteuert: Die Druckübersetzung erfolgt durch Zylinder, sogenannte Plunger. Auf einer Seite das Steuermedium Öl, auf der anderen Seite das Arbeitsmedium Wasser (siehe Abbildung 1, Plunger in den Druckübersetzern grün eingezeichnet). Der Ölkreislauf wird über eine Druckübersetzerpumpe angetrieben, die einen Ausgangswasserdruck zwischen 3'000 und 4'000 bar erzeugt. Dieser Hochdruckwasserstrahl wird in einer feinen Rubin-, Saphir- oder Diamantdüse gebündelt. Mit diesem hochenergetischen Wasserstrahl lassen sich beinahe alle Materialien schneiden.

Mit Hilfe klassischer Bondgrafen und numerischer Werkzeuge wurde ein Modell des bestehenden Wasserstrahlhochdruckaggregats abgebildet, um so grundlegende Eigenschaften des Systems zu analysieren. In einem folgenden Schritt wurde das bestehende hydraulische System validiert, um die Gültigkeit des generierten theoretischen Modells zu prüfen. Im Laufe des weiteren Projekts werden die Erkenntnisse dazu verwendet, einen Elektro-Direktantrieb einzusetzen. Das erklärte Ziel dabei ist, ein möglichst energieeffizientes Wasserstrahlschneidaggregat zu entwickeln. Der ursprünglich hydraulische Antrieb soll durch zwei lineare Elektroantrieb-Einheiten (siehe Abbildung 1) ersetzt werden – die bisher verwendeten Medien Öl und

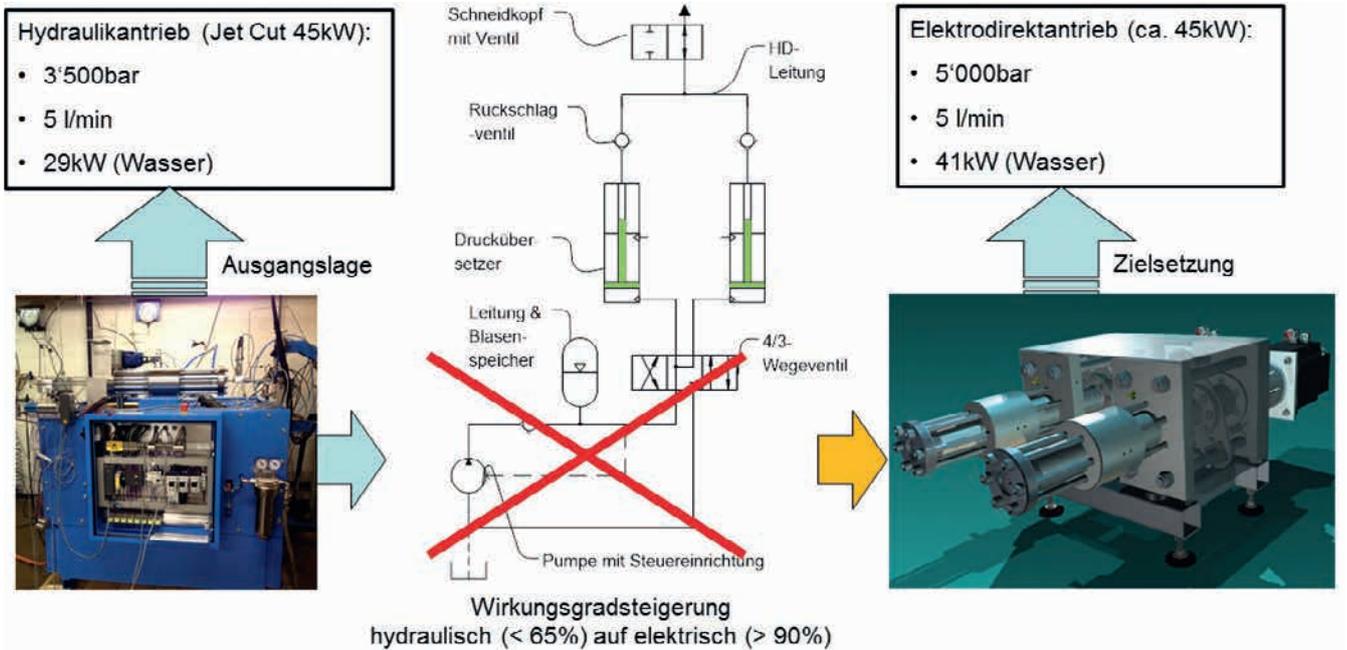


Abbildung 1: Hochdruckwasserstrahlschneidaggregat mit Hydraulikantrieb (links), der durch einen Elektroantrieb ersetzt werden soll (rechts)

Luft fallen komplett weg, nur noch die Medien Wasser und Elektrizität bleiben erhalten.

Die zwei Druckübersetzer (siehe Abbildung 1) sind die zentralen Elemente einer Hochdruckpumpe. Bisher erzeugt eine Axialkolbenpumpe einen Hydraulikdruck, der über die beiden Druckübersetzer eine Wassersäule auf den gewünschten Druck verdichtet (bis maximal 4'000 bar). Der neue Elektroantrieb baut auf dem bestehenden hydraulischen Konzept der Druckübersetzung mit zwei phasenverschoben betriebenen Kolbenstangen auf. Dieses Konzept wurde gewählt, um ohne Druckspeicher einen kontinuierlichen Hochdruck erzielen zu können.

### Analytisches Modell der bestehenden Anlage

Das numerische Modell (Abbildung 2, oben) konnte mit Hilfe einer bestehenden Pumpenanlage validiert werden. Die nichtlinearen Gleichungssysteme des Modells werden numerisch berechnet. Dieses verwendete numerische Verfahren ist für steife Systeme optimiert, damit die Simulation zuverlässig und mit genügender Genauigkeit arbeitet. Dies ist nötig, da in der Fluidodynamik Zeitkonstanten in der Größenordnung von Millisekunden auftreten, jedoch ist der zu untersuchende Prozesszyklus mit mehreren Sekunden getaktet.

Anhand von Herstellerangaben und durch die Zusammenarbeit mit Jet Cut Power GmbH wurden die meisten der benötigten Parameter und Kennlinien bestimmt. Einige wenige Parameter stammen aus Schätzungen anhand von Formelwerken. Um diese Unsicherheiten zu eliminieren wurden detaillierte Messungen an einem bestehenden Hochdruckaggregat durchgeführt.

Die Auswertung zeigt (Abbildung 2, unten; Simulation oben und Messung unten), dass die gemessene Dynamik - also das Einschwingverhalten des erzeugten Hochdrucks - von der Trägheit der Hydraulikpumpe abhängt. Beim Schalt-

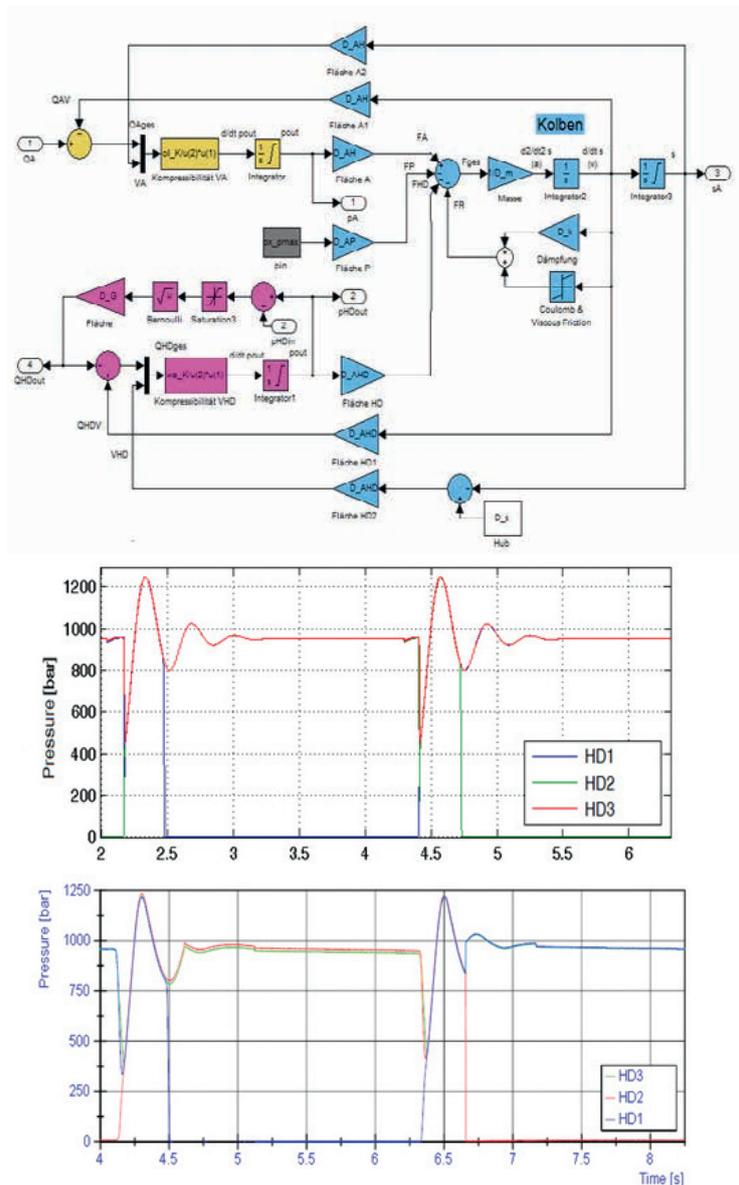


Abbildung 2: Auszug aus dem numerischen Modell (oben) Druckauswertungen (unten)

vorgang des 4/3-Wegeventils ändert sich die Last an der Pumpe. Diese muss ihr Schöpfvermögen steigern, um einen Druckabfall zu vermeiden, was nur bedingt gelingt. Messungen zeigen, dass das simulierte Schaltverhalten die grundlegenden Eigenschaften der Realität abbildet.

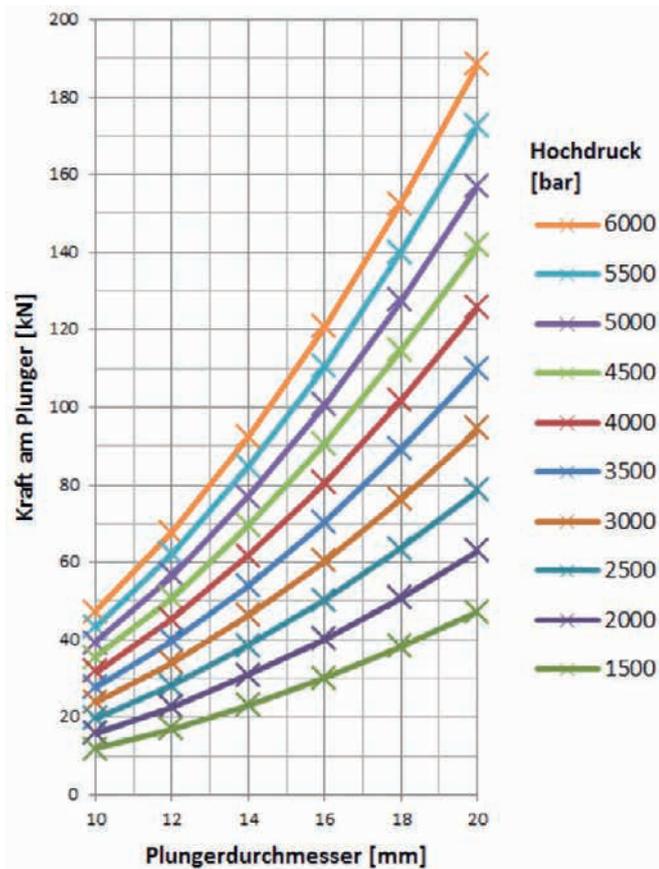


Abbildung 3: Kraftverlauf am Plunger bei verschiedenen Plunger-Durchmessern und Hochdruck-Verläufen.

### Auslegen eines Linearantriebs für die elektrische Hochdruckpumpe

Um einen Druck von 4'000 bar bei 5.0 l/min Volumenstrom zu erzeugen, wurde zunächst mit den Plunger-Dimensionen des 45 kW-Aggregats der Firma Jet Cut Power gerechnet. Das Erreichen des Drucks hängt von der Kraft pro Fläche ab. Mit dem Plungerdurchmesser des 45 kW-Aggregats be-

findet man sich bereits im Bereich der Hochlastanwendungen, die für Motion-Anwendungen beim aktuellen Stand der Technik wenig geeignet sind. Wird der Plungerdurchmesser kleiner, wird bei gleichbleibendem Druck die Kraft abnehmen. Dies ist von grosser Relevanz, um die Problemgrößen (grosse Kraft bei hoher Geschwindigkeit) anzupassen. Mit kleineren Kräften ist es eher möglich, schnelle Geschwindigkeiten zu fahren. Eine Analyse der Kräfte am Plunger bei verschiedenen Plungerdurchmessern und Druckverläufen wurde für die untersuchten Antriebskonzepte erstellt, um so eine Entscheidungsgrundlage für die Wahl der Aktor Systeme zu geben (siehe auch Abbildung 3). Dabei wurde auch in Betracht gezogen, dass die Kosten der Zylinder- und Plungerherstellung möglichst gering gehalten werden. Es wurden daher keine konstruktiven Änderungen gewünscht.

### Mess- und Regelungstechnik der elektrisch angetriebenen Hochdruckpumpe

Die neue Hochdruckpumpe wurde in zwei Abschnitte aufgeteilt; zum einen die Prozessumgebung und zum andern der Manipulator (Abbildung 4, rechte Hälfte). Die Prozessumgebung wurde soweit untersucht, um die Spezifikation des Prototypen durchzuführen. Der Manipulator besteht aus zwei unabhängigen und identischen Pumpeneinheiten. Eine solche Einheit besteht je aus einem Servomotor mit Servodrive, der über eine Lineareinheit einen Plunger bewegt. Abbildung 4, linke Hälfte zeigt die Hierarchie der Steuerung. Diese steuert synchron in einer übergeordneten Speicher-programmierbaren Steuerung (SPS) die beiden Pumpeneinheiten.

Für die Auslegung des Regelungskonzepts wurde das Hochdrucksystem auf ein minimales Differenzialgleichungssystem reduziert. Nur die dominierenden Anteile wurden dabei berücksichtigt: Kapazität des Wassers, Widerstand der Düse und Masse des Plungers. Zur Validierung dieses minimalen Modells wurden die Modellparameter mittels linearer Regression identifiziert. Dabei wurden drei Betriebsfälle identifiziert:

- (1) Druckaufbau
- (2) Fördern
- (3) Zurückfahren

Um den Prozess der Druckerzeugung mit zwei phasenverschobenen Plungern zu verstehen, sind an dieser Stelle

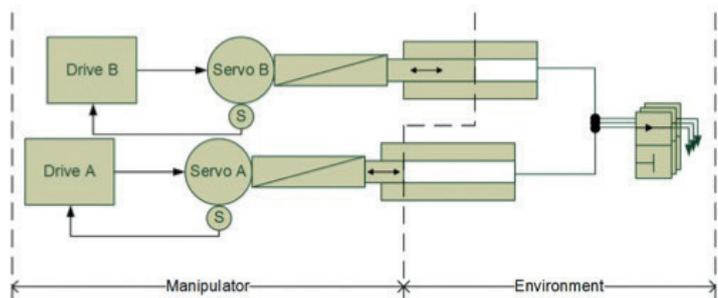
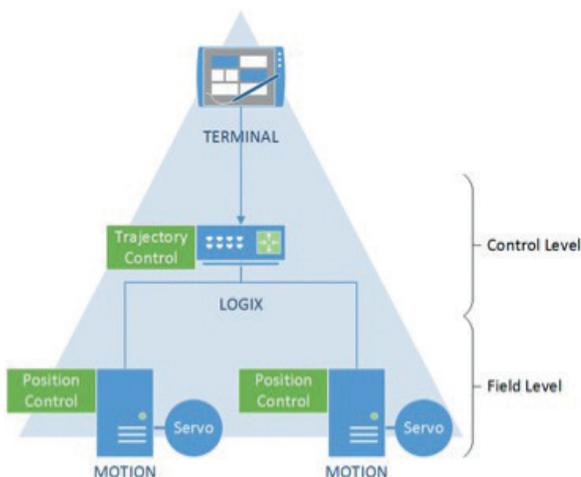


Abbildung 4: Steuerungskonzept (links) und Antriebskonzept (rechts) der neuen Hochdruckpumpe

drei Betriebszustände einzuführen. Jeder der Plunger befindet sich stets in einem dieser Zustände. Die Betriebsfälle fordern unterschiedliche Dynamik des Antriebsstranges (siehe dazu auch Abbildung 5):

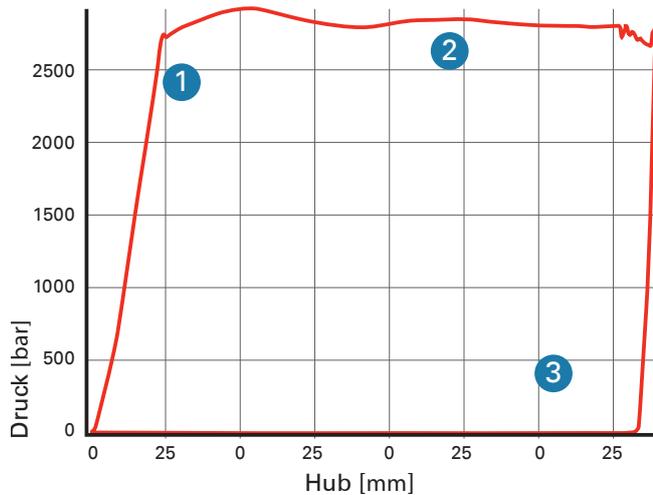


Abbildung 5: Druckaufbau (1), Förderphase (2) und Zurückfahren (3)

- Im Betriebszustand „Druckaufbau“ wird der Plunger auf die benötigte Vorschubgeschwindigkeit beschleunigt. Die Hochdruckkammer ist von der Wasserversorgung und von der Hochdruckleitung über Rückschlagventile abgeschlossen.
- Im Betriebszustand „Fördern“ befindet sich der Plunger in einer konstanten Vorschubbewegung. Die Hochdruckkammer ist von der Wasserversorgung über ein Rückschlagventil abgeschlossen. Das Rückschlagventil zur Hochdruckleitung ist geöffnet.
- Im Betriebszustand „Zurückfahren“ befindet sich der Plunger rückwärts in der Eilgangbewegung. Das Rückschlagventil zur Hochdruckkammer öffnet, sobald der Druck in der Kammer abgebaut ist. Die Hochdruckkammer ist von der Hochdruckleitung über ein Rückschlagventil abgeschlossen.

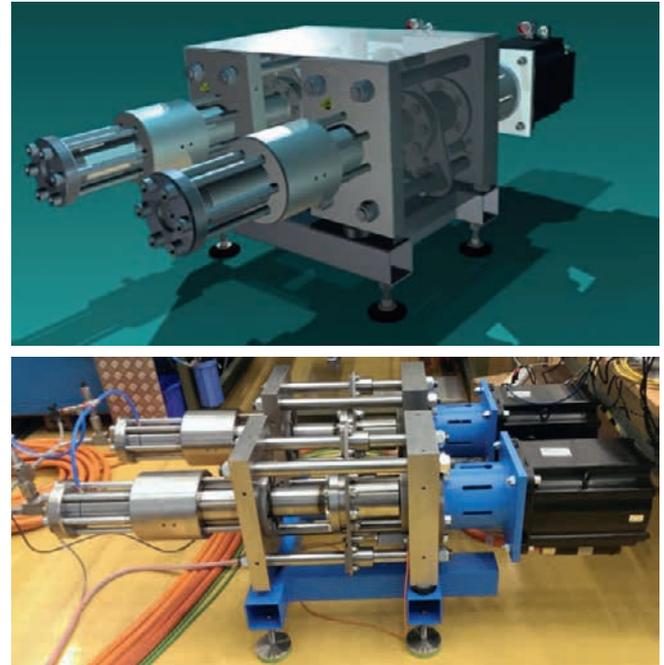


Abbildung 6: CAD Simulation der elektrisch angetriebenen HD Pumpe (oben) und realisierter Aufbau im FHNW HD Pumpenlabor (unten)

### Konstruktion und Validation der elektrisch angetriebenen Hochdruckpumpe

Im neu geschaffenen Hochdruckpumpenlabor der Hochschule für Technik FHNW wird diese Hochdruckpumpe weiter ausführlich getestet. Abbildung 6 zeigt die CAD Simulation der elektrisch angetriebenen Hochdruckpumpe und den realisierten Aufbau im Labor.

Abbildungen 7 zeigen den simulierten Hochdruckverlauf der vorgestellten Regelung mit Störgrössenaufschaltung. Auch mit Berücksichtigung von möglichen Störeinflüssen, Signalrauschen und Produktionsabweichungen liegen die Druckschwankungen, selbst bei der Interaktion mit Verbrauchern, innerhalb der Spezifikationen.

Die Störgrössenaufschaltung geschieht in der Form von Zu- und Abschalten verschiedener Verbraucher am Hochdruckausgang, was in der Praxis eine weit verbreitete Methode

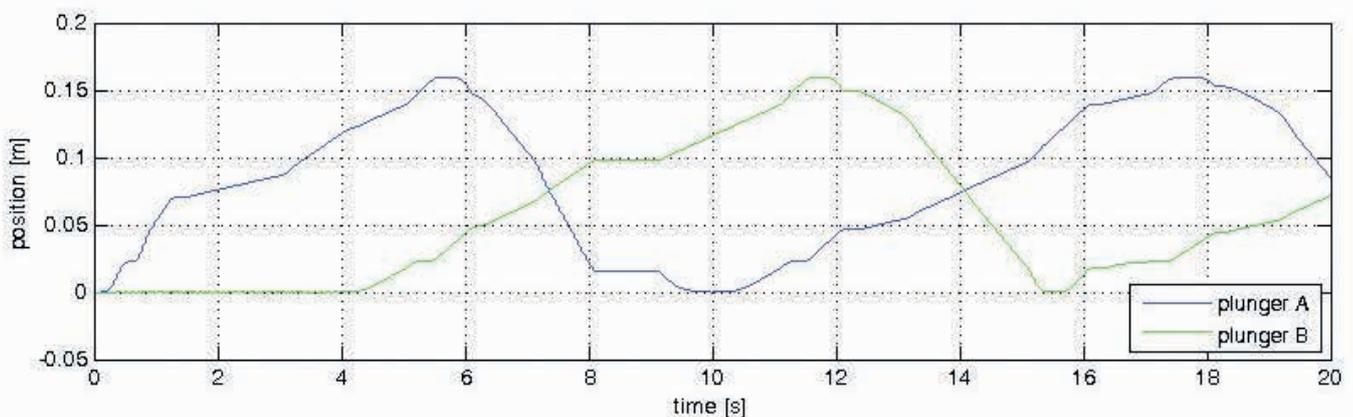


Abbildung 7a: Resultierende Plunger-Trajektorien der adaptiven Regelung

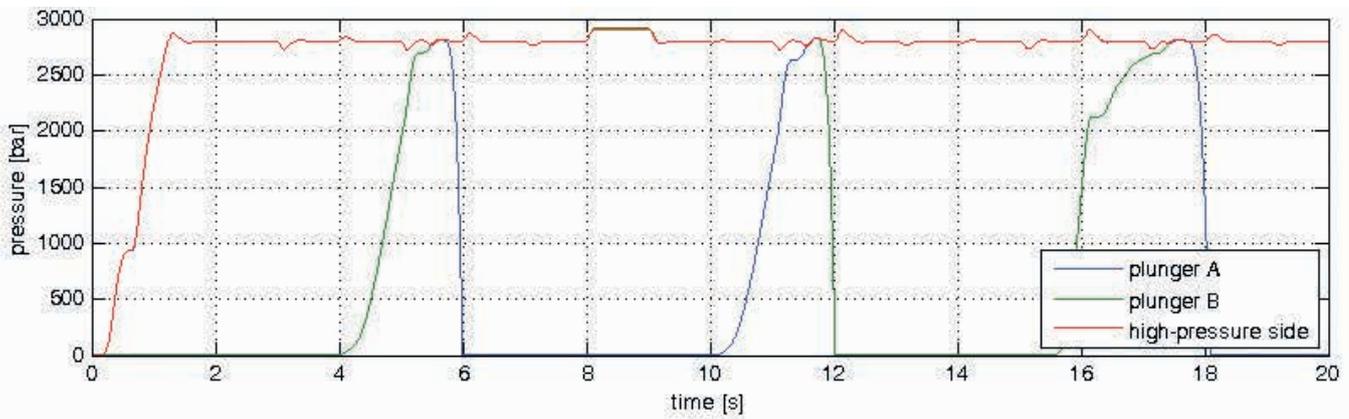


Abbildung 7b: Erwarteter Hochdruckverlauf

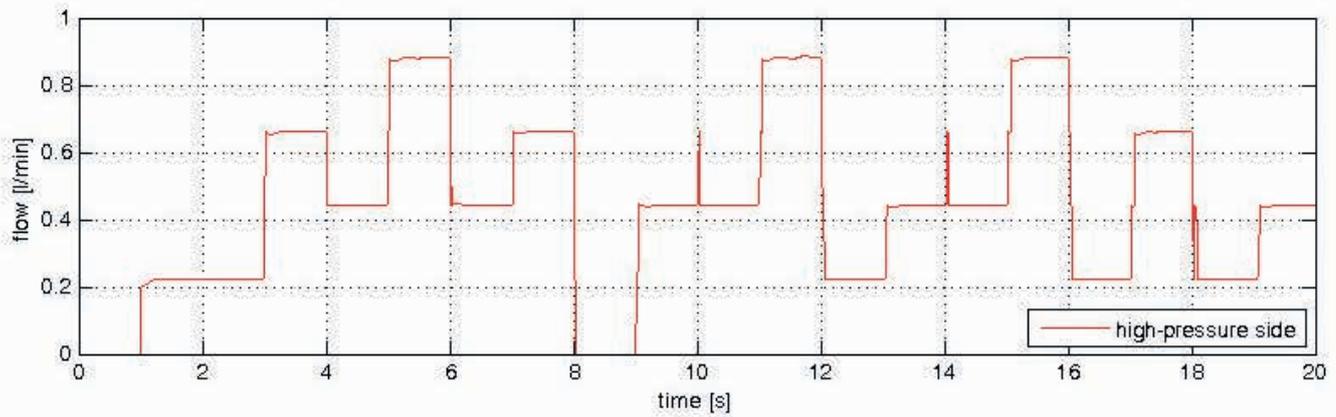


Abbildung 7c: Mit Störgrössenaufschaltung

ist. Das Labor ist noch entsprechend auszubauen, um das Verhalten der Regelung bei mehreren Verbrauchern zu validieren.

#### Ergebnisse, Stand der Arbeiten und weiteres Vorgehen

Die im Rahmen des Projekts erreichten Ziele bilden die Basis für eine neue, zukunftssträchtige, hocheffiziente Wasserstrahlpumpen-Generation, die durch minimierte Medien und nun dank in Software gegossenen Regelalgorithmen und Bahnplanungstrajektorien äusserst flexibel eingesetzt werden können. Dabei wurde mit den Industriepartnern ein KTI Folgeprojekt vereinbart, zurzeit ist ein solches in Vorbereitung.

#### Projektteam

Lukas Kurmann, Master of Science EE und Doktorand, [lukas.kurmann@fhnw.ch](mailto:lukas.kurmann@fhnw.ch);

Stefan Niederberger, Bachelor of Science FHNW in Systems Engineering, Student Master of Science in Engineering MSE und wissenschaftlicher Assistent, [stefan.niederberger@fhnw.ch](mailto:stefan.niederberger@fhnw.ch)

Das Projektteam bedankt sich bei den Industriepartnern Jet Cut Power GmbH, Zaugg Maschinenfabrik AG und Saphirwerke AG und bei allen weiteren involvierten Firmen für die gute und effektive Zusammenarbeit.

# Studierendenprojekte – Ihre Aufgabenstellung wird durch unsere Studierenden gelöst

Für Unternehmen aus Industrie und Wirtschaft bieten Studierendenprojekte eine Chance, komplexe Problemstellungen ohne grösseren finanziellen Aufwand bearbeiten zu lassen. Die angehenden Ingenieurinnen und Ingenieure lösen die Aufgaben fachkundig, kreativ und zuverlässig. Sie werden dabei durch unsere Dozierenden und wissenschaftlichen Mitarbeitenden betreut.



Haben Sie konkrete Aufgabenstellungen aus Ihrem Unternehmen, die Sie umsetzen möchten? Für Fragen und Informationen stehen wir gerne zu Ihrer Verfügung.

Studierendenprojekte und Technologiefragen  
Markus Krack, Leiter FITT (Forschung, Innovation, Technologietransfer)  
markus.krack@fhnw.ch, T + 41 56 202 78 79  
www.fhnw.ch/technik/sp

Studierendenprojekte im Studiengang Systemtechnik (Automation)  
Prof. Peter Zysset, Studiengangleiter Systemtechnik,  
peter.zysset@fhnw.ch

## Neue Mitarbeitende gewinnen

«Wir sind immer wieder von der erfrischenden Kreativität und vom Engagement begeistert, die über die Studierendenprojekte Eingang in unser Unternehmen finden. Gleichzeitig ist es für uns eine gute Sache, die Studierenden kennenzulernen und als neue Mitarbeitende zu gewinnen. Auf fachlicher und personeller Ebene lohnt sich für uns die Zusammenarbeit mit der Hochschule für Technik FHNW.»

Alois Huser, Geschäftsführer, Encontrol AG, Niederrohrdorf

# Regelstrategien zur Optimierung des Eigenverbrauchs von Gebäuden

In diesem Projekt werden Regelstrategien zur Optimierung des Eigenverbrauchs unter Berücksichtigung der lokalen elektrischen wie auch thermischen Produktion, der Speicherkapazität und des Verbrauchs untersucht. Die Entwicklung moderner Regelmethode steht im Fokus.

## James Trayler

Im Projekt werden Photovoltaikanlagen als lokale Produzenten und Wärmepumpen sowie Brauchwarmwassererwärmer als lokale Verbraucher betrachtet. Das Ziel ist die zeitliche Deckung von Verbrauch und Produktion. Damit kann der Eigenverbrauch optimiert und das Stromnetz entlastet werden. Seit dem 1. April 2014 unterstützt die neue Energieverordnung des Bundes [3] dieses Vorhaben. Im Zusammenhang mit der Einmalvergütung (EIV) ist der finanzielle Anreiz zur Optimierung des Eigenverbrauchs gegeben.

Durch regelungstechnische Optimierungen sind erhebliche Steigerungen des Eigenverbrauchs und des Autarkiegrads möglich. Allerdings ist der tatsächliche finanzielle Anreiz stark abhängig von der zukünftigen Struktur des Stromtarifs. In diesem Projekt werden deshalb verschiedene Szenarien für heutige und zukünftige Stromtarife berechnet.

Zudem wird untersucht, wie sich die lokale Optimierung in zukünftige Smart Grids integrieren lässt.

## Modell

Zur gezielten Optimierung des Eigenverbrauchs, der Effizienz und der Energiekosten wurden bestehende Gebäudemodelle [4] in MATLAB/Simulink übernommen und weiterentwickelt. Abbildung 1 zeigt die oberste Ebene des Modells mit den einzelnen Teilsystemen.

Für verschiedene Regelstrategien wurden Jahressimulationen durchgeführt und ausgewertet. Abbildung 2 zeigt eine Jahressimulation mit den wichtigsten Temperaturverläufen.

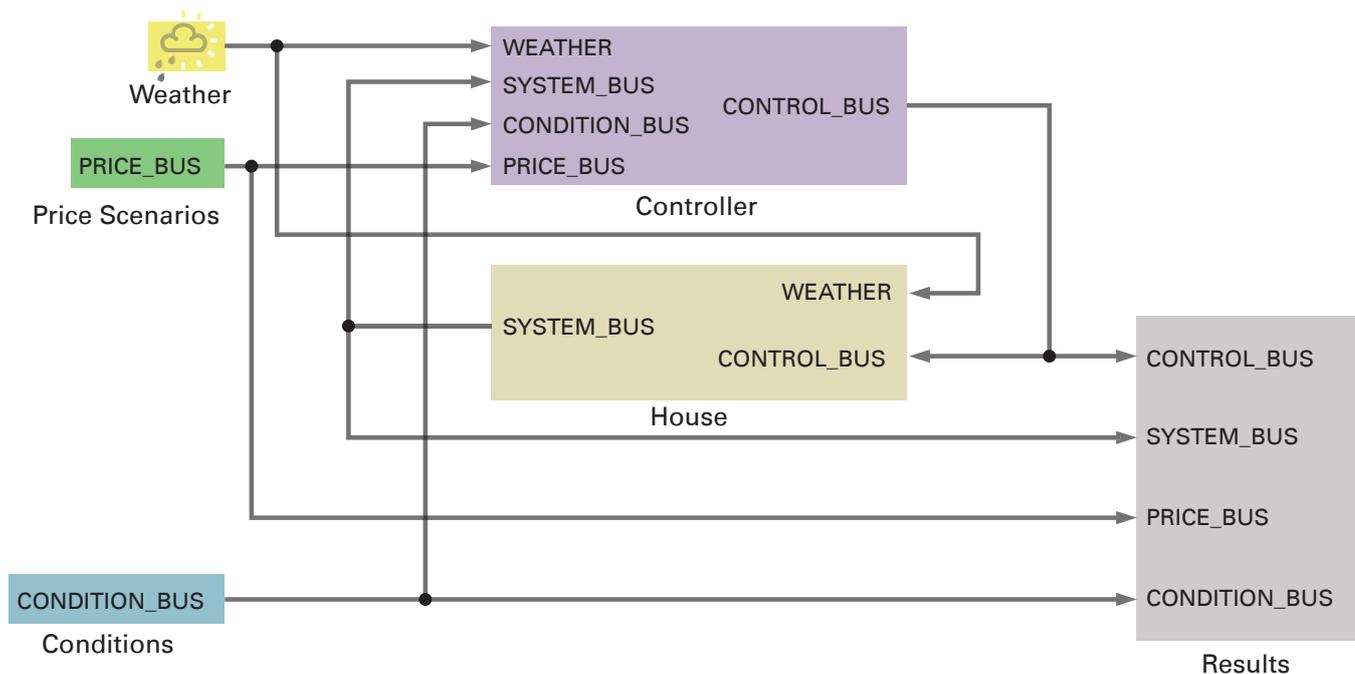


Abbildung 1: MATLAB/Simulink-Modell mit Regelalgorithmus (Controller), Gebäude (House), Wetterdaten (Weather), Stromtarifen (Price Scenarios), Conditions (Bedingungen) und automatisierter Auswertung (Results)

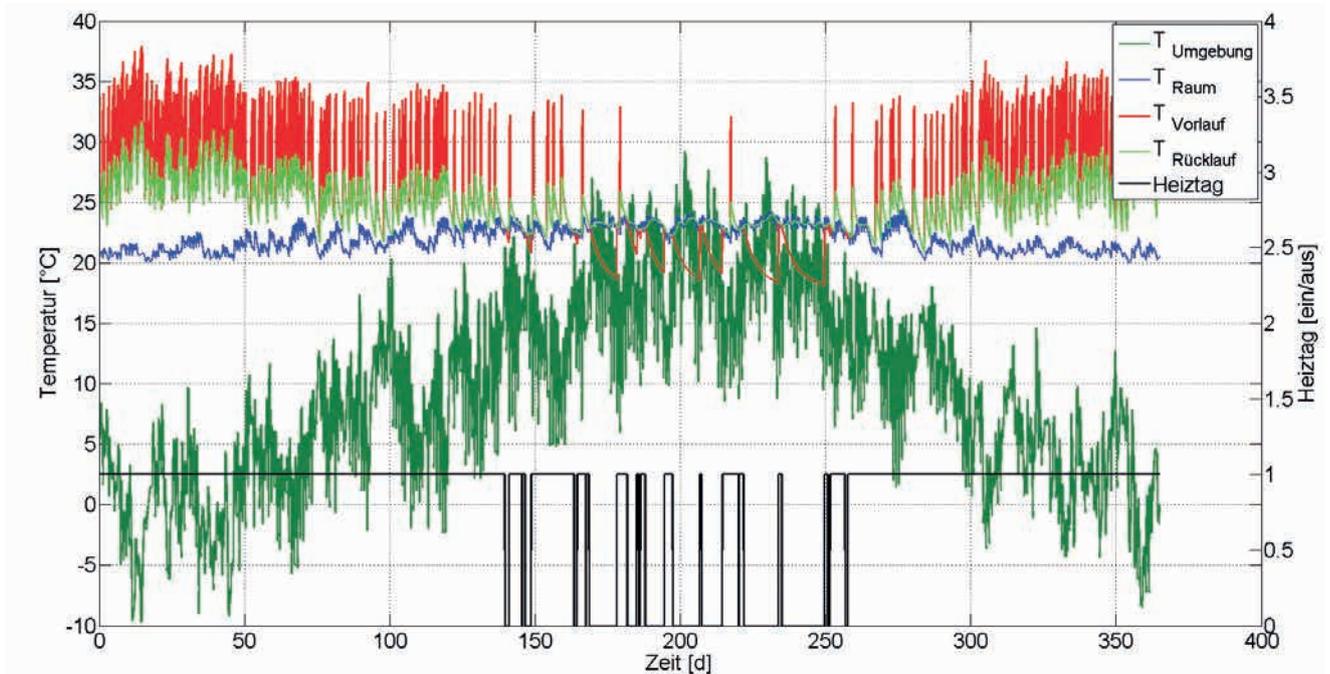


Abbildung 2: Jahressimulation am Gebäude mit Vorlauftemperatur ( $T_{Vorlauf}$ ) und Rücklauftemperatur ( $T_{Rücklauf}$ ) der Wärmepumpe, Raumtemperatur ( $T_{Raum}$ ) und Umgebungstemperatur ( $T_{Umgebung}$ ), sowie der Tage, an denen geheizt wird (Heiztage)

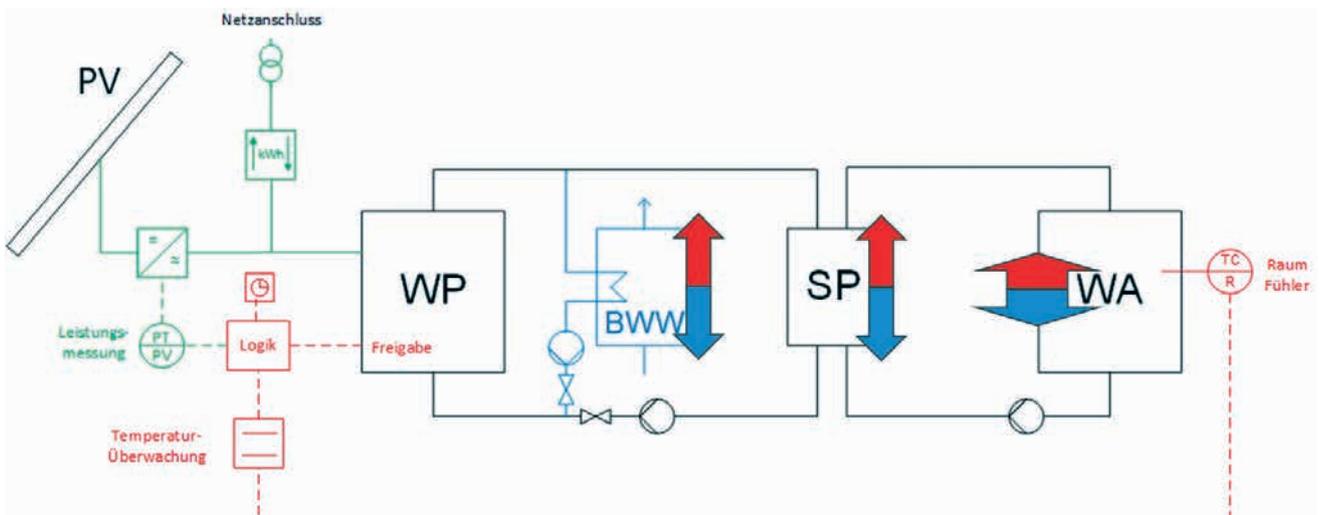


Abbildung 3: STASCH 6 mit Wärmepumpe (WP), Parallelspeicher (SP), Wärmeabgabe (WA), Brauchwarmwasserspeicher (BWW) und Anbindung der Photovoltaik-Anlage (PV)

### Hydraulische Schaltungen und Regelstrukturen

Als hydraulische Schaltungen wurden die Standards STASCH 4 und STASCH 6 [5] verwendet. Die Schaltungen wurden mit der Photovoltaik-Anlage (PV) und den Regelstrukturen ergänzt, die eine Eigenverbrauchsoptimierung ermöglichen (Abbildung 3).

Das Potential zur thermischen Speicherung mittels Temperaturerhöhung und -absenkung ist in Abbildung 3 mit den roten und blauen Pfeilen angedeutet. Hier können sowohl die Temperaturen des Parallelspeichers als auch des Brauchwarmwasserspeichers nach oben und unten gefahren werden. Um das thermische Speicherpotential der Gebäudehülle voll ausnutzen zu können, muss auch die Raumtemperatur angehoben oder abgesenkt werden können. Dazu ist eine zentrale Raumtemperatur-Aufschaltung über Raumfühler notwendig.

Zudem ist neben der Einhaltung des Raumkomforts ein neues Regelziel im Fokus, nämlich die möglichst hohe Gleichzeitigkeit zwischen Produktion und Verbrauch. Bis heute kann in Standard-Wärmepumpen nur über eine Zeitprogrammierung versucht werden, die Laufzeit auf die Mittagszeit zu verschieben. Mit einer solchen Lösung läuft die Wärmepumpe aber auch dann, wenn keine Sonneneinstrahlung vorhanden ist. Damit muss teurer Strom aus dem Netz bezogen werden, anstatt den Eigenverbrauch zu optimieren.

In diesem Projekt werden Regler untersucht, die in Abhängigkeit der aktuellen PV-Leistung die Verbraucher steuern (Leistungssteuerung). Zudem werden Regler untersucht, die direkt die Energiekosten optimieren unter Berücksichtigung des externen Tarifs und der lokalen Produktion (Preisregler). Als weitere Möglichkeit werden Regler zur Begrenzung der Bezugs- oder Einspeiseleistung unter-

sucht, die lokale Lasten gezielt abwerfen oder dazu schalten. Als Schnittstellen zu den Verbrauchern werden die EW-Sperre (Rundsteuerschaltung) und moderne SGReady-Schnittstellen untersucht. Damit ist auch die sofortige Umsetzbarkeit gegeben.

### Kennzahlen

Für die Beurteilung der Resultate wurden unter anderem folgende Kennzahlen betrachtet:

### Eigenverbrauchsverhältnis

Das Eigenverbrauchsverhältnis sagt aus, wie viel des lokal produzierten Stroms tatsächlich lokal verbraucht wird.

$$R_{ocs} = \frac{(E_{cs} - E_{feg})}{E_{acp}}$$

$R_{ocs}$	Eigenverbrauchsverhältnis
$E_{cs}$	Gesamter elektr. Verbrauch (Wärmepumpe + Haushaltgeräte)
$E_{feg}$	Netzbezug
$E_{acp}$	Eigenstromproduktion

### Autarkiegrad

Der Autarkiegrad sagt aus, wie unabhängig ein System gegenüber dem Stromnetz ist. Dieser ist wie folgt definiert:

$$R_{aut} = \frac{E_{dcs}}{E_{cs}}$$

$R_{aut}$	Autarkiegrad
$E_{dcs}$	Direktverbrauch, entspricht der selbst genutzten PV-Energie
$E_{cs}$	Gesamter elektr. Verbrauch

### Einfluss der PV-Leistung auf den natürlichen Eigenverbrauch bzw. Autarkiegrad

Der Einfluss der installierten PV-Leistung auf die Kennzahlen wird in Abbildung 4 gezeigt. Hier werden die „natürlichen“ Werte betrachtet, welche ohne regelungstechnische Massnahmen erreicht werden. Erwartungsgemäss steigt der Autarkiegrad (Raut) bei zunehmender PV-Anlagengrösse. Im Gegensatz dazu sinkt jedoch das Eigenverbrauchs-

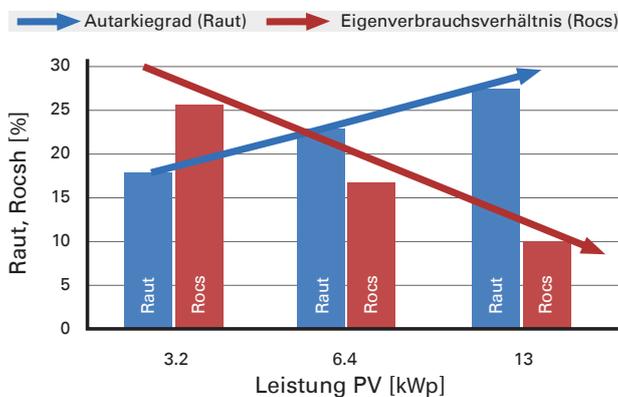


Abbildung 4: Einfluss der installierten PV-Leistung auf den natürlichen Autarkiegrad und das Eigenverbrauchsverhältnis (ohne regelungstechnische Massnahmen) bei einem Minergie-P Gebäude

verhältnis (Rocs) und der Überschuss muss ins Netz eingespeist werden. Ein Optimum befindet sich in der Mitte.

### Resultate mit Tarifmodell 2035

Basierend auf einer Studie des Verbands Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen [6] wurde für das Tarifmodell 2035 eine «Flatrate» ohne Hoch-/Niedertarif gewählt. Es wird angenommen, dass die Produktion von Bandenergie (u.A. durch AKW) reduziert wird und deshalb keine tiefen Nachttarife mehr angeboten werden. Für die Eigenverbrauchsoptimierung ist diese Tarifstruktur vorteilhaft, da kein Anreiz besteht, günstigen Strom in der Nacht einzukaufen und „teuren“ Strom am Tag einzuspeisen.

In Abbildung 5 sind folgende Resultate ersichtlich [7]:

- Der optimierte Regler kann die Autarkie gegenüber einer heutigen Standard-Lösung mit festem Zeitprogramm wesentlich erhöhen (Beispiel: von 22% auf 34% bei SFH100).
- Ein finanzieller Anreiz zur Steigerung des lokalen Eigenverbrauchs ist mit dieser Tarifstruktur gegeben. Mit dem kostenoptimierten Regler können die jährlichen Nettokosten (Bezugskosten - Einspeisevergütung) reduziert werden (Beispiel: ca. CHF 100 Kostenersparnis bei SFH100).

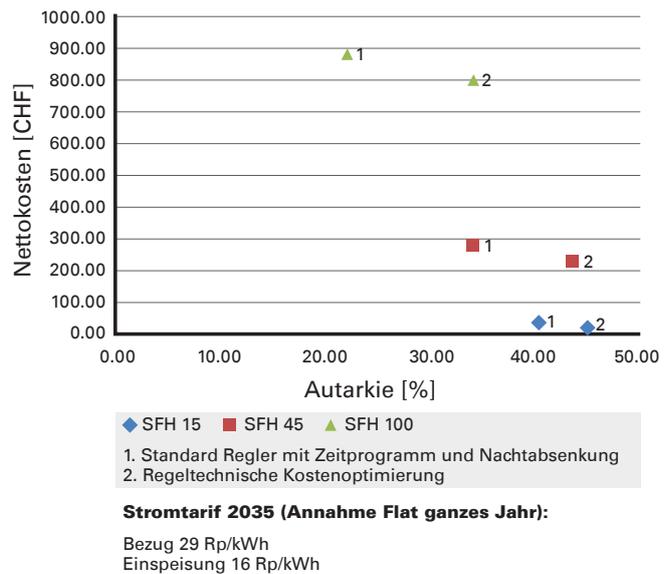


Abbildung 5: Verhalten von Nettokosten und Autarkie beim Stromtarif 2035 für drei verschiedene Gebäudetypen (SFH = Single Family House, 15 = 15 kWh/m²/Jahr, 45 = 45 kWh/m²/Jahr, 100 = 100 kWh/m²/Jahr bezogener Verbrauch)

### Fazit

Folgende erste Erkenntnisse konnten gemacht werden:

- Die regelungstechnische Optimierung bestehender Systeme hat grosses Potential. Mit kleinen Investitionen kann der Eigenverbrauch wesentlich gesteigert werden.
- Mit der Gestaltung zukünftiger Stromtarife müssen die richtigen Anreize geschaffen werden. So muss der tiefe Nachtтарif aufgehoben werden. Noch besser wären variable Tarife.

- Für die maximale Ausnutzung der Gebäudehülle als thermischer Speicher muss eine Raumtemperaturaufschaltung auf den zentralen Regler implementiert werden, um den Komfort jederzeit zu garantieren.

#### **Ausblick**

Im weiteren Projektverlauf werden folgende Punkte bearbeitet:

- Weiterentwicklung der Regelstrategien und Durchführung von Simulationen für verschiedene feste und variable Stromtarife.
- Praxis-Test an realen Gebäuden mit vollständiger Installation und Messdatenerfassung.

Das laufende BFE-Projekt wird Ende 2015 abgeschlossen.

#### **Auftraggeber**

Bundesamt für Energie (BFE)

#### **Projektteam**

Prof. Dr. David Zogg, Projektleiter david.zogg@fhnw.ch  
James Trayler, Bachelor of Science FHNW in Systemtechnik, Student Master of Science in Engineering MSE und wissenschaftlicher Assistent, james.trayler@fhnw.ch

#### **Weitere Projektpartner**

SIEMENS Building Technologies  
CTA Klima Kälte Wärme AG  
Ökozentrum Langenbruck

#### **Literaturverzeichnis**

- [1] BFE-Projekt „Regelstrategien für die Optimierung des Eigenverbrauchs von Gebäuden“, „OPTEG“, Projekt-Nr. 8100083, Forschungsprogramm „Energie in Gebäuden“
- [2] J. Ragaller, Projektarbeit: Simulation und Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs von Photovoltaik-Wärmepumpenanlagen mit Polysun®, Januar 2014
- [3] Revision der Energieverordnung (EnV, SR 730.01), Eigenverbrauch, Rückerstattung des Zuschlags und Einmalvergütung - Vernehmlassung
- [4] IEA – SHC Task 44, Solar and Heat Pump Systems
- [5] H.R. Gabathuler, H. Mayer, Dr. Th. Afjei: BFE-Projekt Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen, Teil 1: STASCH-Planungshilfen, 2002
- [6] VSE (Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen): Wege in die Stromzukunft - Gesamtbericht, 2012
- [7] R.Waser, Projektarbeit: Simulation und Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs von Photovoltaik-Wärmepumpenanlagen mit Matlab/Simulink, August 2014

# Optimiertes Automationsengineering für die BLS Netz AG

Eine optimale Erstellung und Wartung von Anlagenautomatisierungen ist heutzutage unumgänglich, um die hohen Ansprüche an Kosten, Verfügbarkeit und konsistente Wartbarkeit zu erfüllen. In einer Masterarbeit im Rahmen des Weiterbildungslehrgangs MAS Automation Management wurde dafür ein systemunabhängiges Engineeringtool entwickelt.

## Markus Balmer

Das Automationsengineering von Anlagen, für die eine hohe Wiederverwendbarkeit von Software möglich ist, ist prädestiniert, mit Tools massiv unterstützt zu werden. Dies ist prinzipiell für jede gut strukturierte Anlage möglich. Offensichtlich nötig ist dies aber beispielsweise in der Gebäudeautomation oder - wie die nachfolgenden Ausführungen zeigen – für die Automation der Infrastruktur der BLS AG.

### Ausgangssituation

Ein Tool soll alle Prozesse des Steuerungse Engineerings der BLS unterstützen, insbesondere die Konfiguration der SPS, inklusive der Erzeugung der I/O-Listen, der automatischen Erstellung der Steuerungssoftware und der Anlagenvisualisierung. Dies gilt auch für alle Änderungen im Einsatzzeitraum der Anlagen. Da meist nicht bei null begonnen wird, soll auch eine Integration bestehender Lösungen mit ihrer über den Lauf der Zeit entstandenen Produktvielfalt möglich sein.

### Ziel: Konzept und Entwicklung eines Engineering Tools

Die Masterarbeit begann mit einer Analyse der Literatur und der bestehenden Produkte. Nach einer Analyse des BLS-Systems und der Prozesse wurde klar, dass von den wenigen existierenden Engineering Tools keines über die notwendige Offenheit verfügte. Es wurde entschieden, ein eigenes Tool selber zu entwickeln. Dieser Entscheid wurde dadurch unterstützt, dass die Programmiersoftware «SPS-Builder» für die oft verwendeten SAIA-Steuerungen über eine offene Schnittstelle verfügt und dass auch das von der Firma Bergauer entwickelte Leitsystem-Konfigurationstool «amSET» einfach integriert werden konnte. In der Masterarbeit wurde das Konzept für das Engineering-Tool erstellt und mit Unterstützung eines Programmierers umgesetzt. Eine Systemübersicht ist in Abbildung 1 dargestellt.

### Standardisierung der Funktionen

Die Grundkomponenten des Engineering Tools bilden die Vorlagen und die Engineering Datenbank. In den Vorlagen sind die funktionalen Grundlagen abgelegt. Die Steuerfunktionen sind zu Modulen standardisiert und in einer Modulbibliothek verwaltet. Sie bilden die Bausteine für die automatische Erstellung der SPS-Software. Ebenso sind für die Anlagenbedienung «Alertmaster»-Vorlagen abgespeichert.

Der Einfachheit halber nicht eingezeichnet sind weitere Vorlagen, beispielsweise ein SPS-Basisprojekt.

### Engineering-Datenbank

Die zweite wichtige Komponente des Tools ist die Engineering-Datenbank. Sie enthält alle wesentlichen Informationen über die Feldgeräte, die Steuer- und Leitsystemkonfiguration und die Liste samt Konfiguration der verwendeten Module. Verschiedene Schnittstellen für den Import von Daten wurden geschaffen, damit auch bestehende Daten einfach integriert werden können. Aus der Engineering-Datenbank können mittels Exportfunktionen verschiedene nützliche Listen erzeugt werden, wie z.B. eine I/O-Liste oder ein Testprotokoll. Die wesentliche Funktion des Engineering Tools ist aber die automatische Erstellung der SPS- und Leitsystem-Konfigurationen. Kombiniert mit den vorhandenen Vorlagen können so die Steuerungssoftware und die Anlagenbedienung automatisch erstellt und mit dem Tool auf die Steuerung geladen werden.

### Effizienzsteigerung und Konsistenz der Daten

Der Nutzen des Engineering-Tools ist vielfältig. Anpassungen und Änderungen am System können erheblich einfacher und effizienter vorgenommen werden. Das Engineering Tool erlaubt es auch, dass Mitarbeiter der BLS Netz AG die Daten jederzeit bearbeiten können und die daraus erstellten Konfigurationen auf das System laden können. Da die Konfigurationen in einer einzigen Datenbank abgelegt sind, ist eine hohe Konsistenz der Daten gewährleistet.

Erbt ein Ingenieur nun ein Projekt, so muss er nicht annehmen, dass die Anlagendokumentation teilweise nicht mehr aktuell ist und er zuerst mit der Aufnahme des Istzustandes beginnen muss. Auch werden Fehlerkorrekturen und andere Verbesserungen in den Vorlagen abgespeichert, was ein Know-how-Wachstum garantiert. Das Management der Vorlagen stellt daher die grösste Herausforderung dar. Entstehen zu viele Varianten der fast identischen Funktion, verliert man schnell die Übersicht, inwiefern sich ein Modul von einem anderen unterscheidet. Um diese Gefahr zu minimieren, ist es sehr nützlich, wenn es mittels Optionen möglich ist zu kontrollieren, welche Teile der Software für eine spezielle Instanz kompiliert werden.

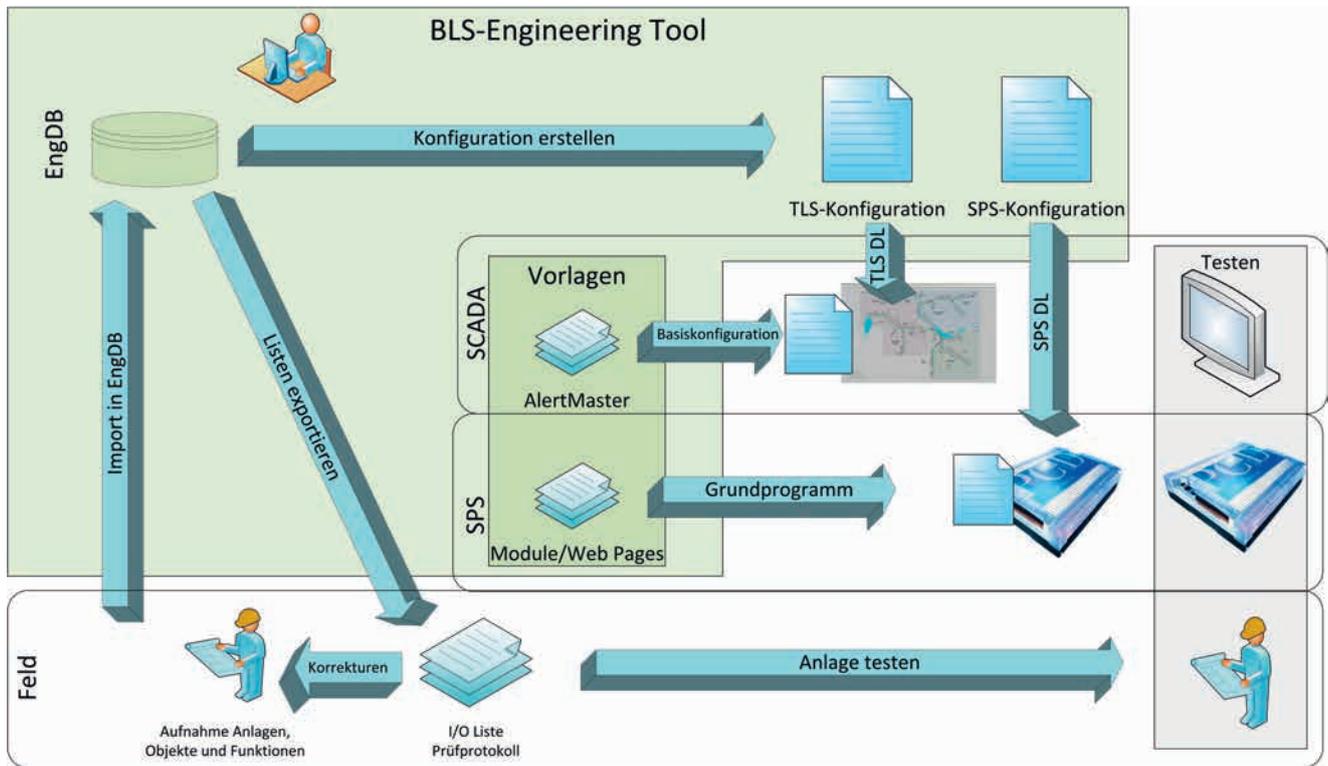


Abbildung 1: Struktur des Engineering Tools

### Prozessorientierte und einfache Benutzerschnittstelle

Das Tool verfügt über eine prozessorientierte, sehr ansprechende Benutzerschnittstelle. Es ist nicht zu erwarten, dass ein Anwender eine aufwändige Schulung absolvieren muss, bis er das Tool kompetent bedienen kann.

Während der Arbeit wurden verschiedene Wünsche an die SPS- und Leitsystemhersteller offensichtlich. Hier wäre eine Standardisierung von Schnittstellen für Engineering Tools wie z.B. die PLCopen XML-Spezifikation von grossem Interesse!

### Testlauf Praxisumsetzung

Besonders spannend aber auch herausfordernd ist es, wenn das Resultat einer Masterarbeit direkt in ein Produkt hineinfliesst und nicht einfach eine Papierübung bleibt. Der Projektzeitplan sah vor, dass im September 2014 eine erste Steuerung mithilfe des Engineering Tools erstellt wird und im Feld die Feuerprobe bestehen soll. Ist der Test erfolgreich,

soll zunächst eine Bahnhofssteuerung darin integriert werden. Bewähren sich die Prozesse und das Tool, so können sämtliche technischen Räume der BLS AG integriert werden.

Diese Masterarbeit hat gezeigt, dass dies der zukünftige Weg für die Softwareerstellung ist, denn es konnte ein wesentlicher Beitrag zur Optimierung des Automationsengineerings bei der BLS Netz AG geleistet werden. Eine Weiterbildung öffnet Horizonte, da man sich ausserhalb seiner fachlich sehr spezialisierten Arbeitsumgebung mit weniger bekannten Themen befassen muss. Oftmals ergeben sich dadurch neue Perspektiven einer interessanten beruflichen Zukunft.

### Projektteam

Prof. Dr. Jürg Peter Keller, Fachhochschule Nordwestschweiz; juerg.keller1@fhnw.ch  
Markus Balmer, Bergauer AG

## Ihre Weiterbildung in Automatisierungstechnik

**MAS Automation Management** – die Weiterbildung für angehende Projektleiter von Automationsprojekten und Ingenieuren, die ihr Fachwissen aktualisieren möchten.

**Die Teilnehmenden profitieren dabei vom Netzwerk verschiedener Fachhochschulen und ihren Kompetenzen.**

**Start:** 7. September 2015

[www.masam.ch](http://www.masam.ch)

### Kontakt

Jürg Keller, Studiengangleiter MAS Automation Management, T +41 56 202 77 62, juerg.keller1@fhnw.ch  
Patrizia Hostettler, Sekretariat, T +41 56 202 72 18, weiterbildung.technik@fhnw.ch

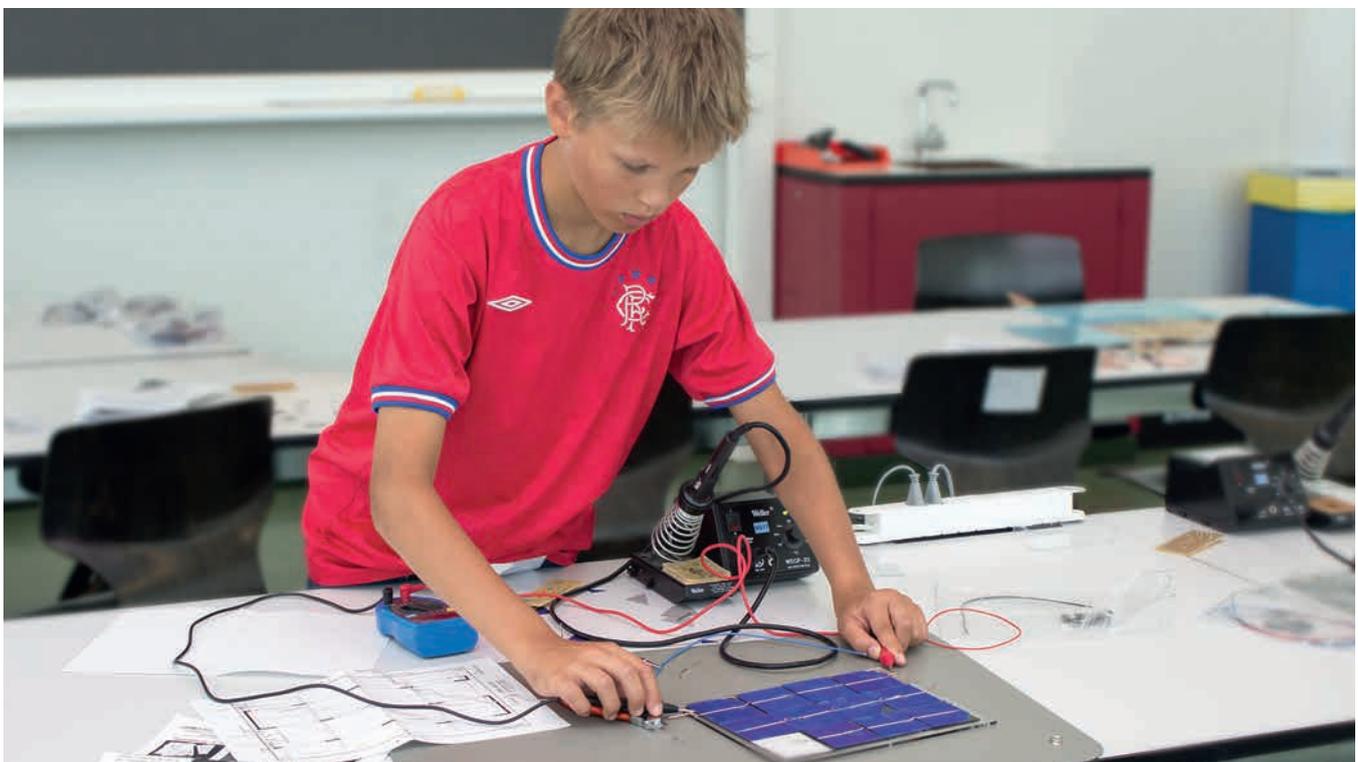
**Besuchen Sie unsere Infoveranstaltung – wir informieren Sie gerne:**

Montag, 22. Juni 2015, 18.15 Uhr in Windisch  
Mittwoch, 26. August 2015, 18.15 Uhr in Windisch  
Montag, 2. November 2015, 18.15 Uhr in Basel  
[www.fhnw.ch/wbt](http://www.fhnw.ch/wbt)

# Automation an den Projektwochen von «Schweizer Jugend forscht»

Bereits zum fünften Mal wurden an der Hochschule für Technik FHNW die Projektwochen girls@science und boys@science durchgeführt. Das Institut für Automation FHNW beteiligt sich jedes Jahr mit drei bis vier attraktiven Arbeitsposten an dieser sehr erfreulichen Jugendförderung.

**Jürg Peter Keller**



Die Stiftung «Schweizer Jugend forscht» SJf bietet zweimal im Jahr die Projektwochen «girls@science» und «boys@science» an, einmal an der Universität Basel und einmal an der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW. An der «girls@science»-Woche kommen 48 Mädchen, an der «boys@science»-Woche 48 Knaben, alle im Alter von ungefähr 12 Jahren an die FHNW. Den Jugendlichen stehen vier «Forschungsthemen» zur Verfügung: Informatik, Mikroelektronik, Maschinenbau/Produktionstechnik und Automation. Die Kinder werden gemäss den Anmeldungswünschen den Themen zugeteilt. Der Ablauf einer Woche gestaltet sich so, dass die Kinder von Montag bis Mittwoch jeden Tag in Vierergruppen an einem anderen Arbeitsposten aber immer im gleichen Themenbereich beschäftigt sind. Nach der täglichen Arbeit an der FHNW werden die Kinder den SJf-Betreuerinnen und Betreuern übergeben. Sie begleiten die Kinder durch das viel-

seitige Abendangebot (Sport, Besuch PSI), übernachten mit ihnen in der Jugendherberge und bringen sie am nächsten Morgen wieder an die FHNW. Am letzten Tag, d.h. am Donnerstag, dokumentieren die Kinder ihre Arbeit entweder auf einem grossen Poster oder mit einem kurzen Vortrag. Eltern und Schulklassen können die Schlussveranstaltung mit den Vorträgen und die Poster-Ausstellung besuchen.

## **Roboter, Lötkolben und Handyladestation**

2014 wurden vom Institut für Automation vier Arbeitsposten angeboten. Robotik darf natürlich nicht fehlen. An einem Posten lernen die Kinder, mit einem Industrieroboter umzugehen. Nach einer einfachen Einführung in die Koordinatensysteme lernen sie, den Roboter mit dem Bediengerät zu steuern. Es steht ihnen ein Roboter mit einer Heissdrahtsäge zur Verfügung. Sie sollen damit eine vorangehend entworfene Figur



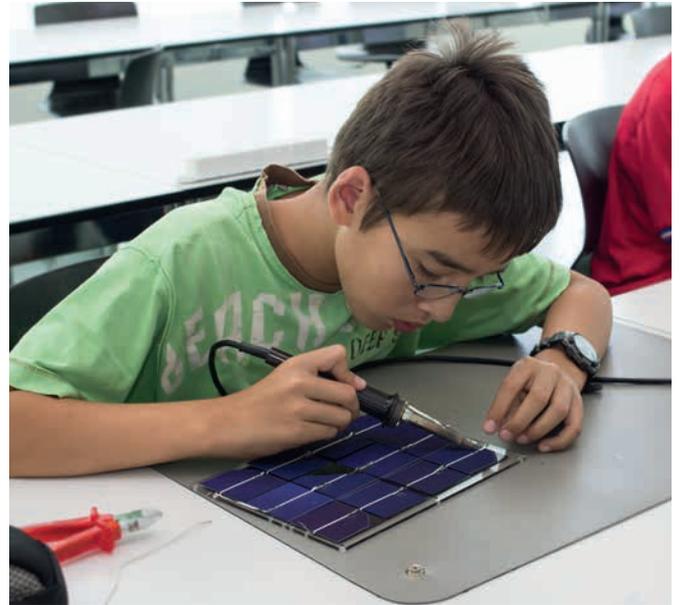
aus einem Styroporblock aussägen. Dazu «teachen» sie dem Roboter die Eckpunkte ihrer Figur und erstellen danach ein Programm, mit dem sie die Eckpunkte über Geraden oder Kreissegmente abfahren. Würde man alle ausgeschnittenen Figuren und Objekte in eine Kiste werfen, könnte man sie sehr leicht den Knaben oder Mädchen zuordnen. Wer macht wohl die Styroporherzen und Blumen, wer die Autos und Panzer?

Am zweiten Robotikposten lernen die Kinder die Programmierung von Lego-Robotern. Nach einer kurzen Einführung in die Robotersprache, d.h. in die zur Verfügung stehenden Programmblöcke, sind die Jugendlichen schnell in der Lage, ein eigenes Programm zu schreiben. Sie sind dann aufgefordert, sich eine eigene Robotikaufgabe auszudenken und diese danach zu realisieren. Manchmal ist es erstaunlich, wie willig sie gegebene Aufgaben lösen, sich aber manchmal sehr schwer tun, eine Idee für eine eigene Aufgabe zu finden.

Löten ist für Kinder eine äusserst faszinierende Tätigkeit. Metall schmelzen um damit Bauteile zusammen zu fügen, ist die Einführungsübung, die die Jugendlichen am liebsten fast den ganzen Tag machen würden. Das Ziel des Arbeitspostens



ist aber, dass sie am Abend einen funktionierenden Klatschschalter gelötet und zusammengebaut haben. Sie lernen die verschiedenen Bauteile kennen und einen Bestückungsplan zu lesen. Danach sind sie in der Lage, den richtigen Widerstand oder die richtigen Dioden richtig auf die vorgefertigte Platine zu löten. Gegen Abend kommt dann die Stunde der Wahrheit und der Betreuer ist gefordert, schnell die Fehler und schlechten Lötstellen zu finden. Die meisten haben aber am Ende einen funktionierenden Klatschschalter.



In diesem Jahr wurde für den Bereich Produktionstechnik ein zusätzlicher Arbeitsposten angeboten. Die Jugendlichen waren mit der Aufgabe konfrontiert, sich eine Ladestation z.B. für das Handy aus Solarzellen zu bauen. Die äusserst feinen Solarzellen mussten zusammengelötet werden und dann vorsichtig auf eine Unterlage geklebt werden. Vor allem bei den Knaben zerbrachen viele Solarzellen und so gaben die Knaben im Feedback dem Posten eine Note knapp über 4, die Mädchen aber fast eine 6.

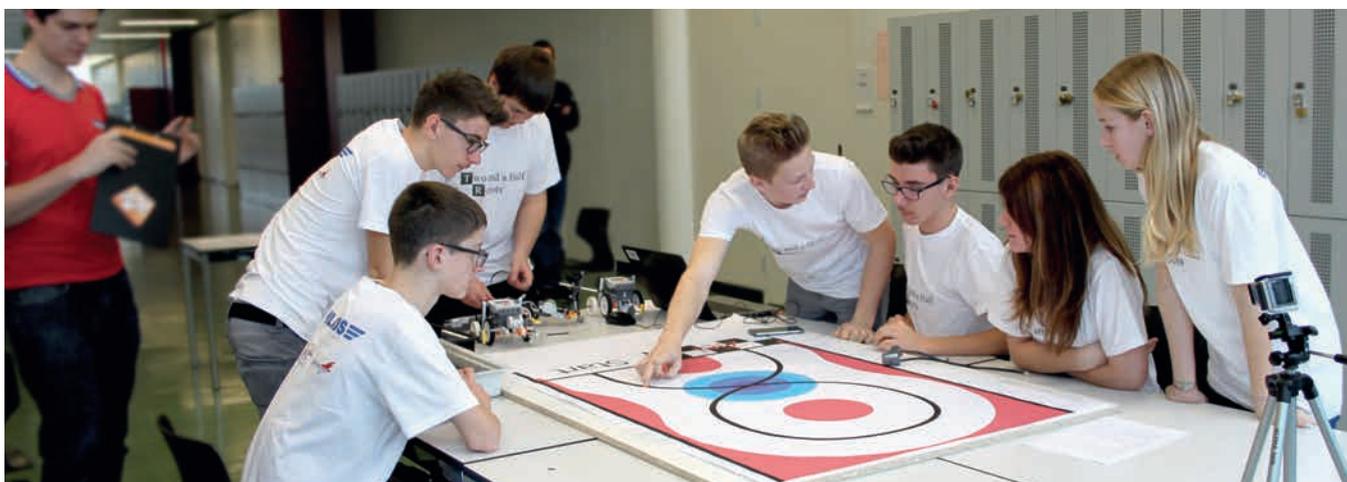
Am Institut für Automation FHNW haben wir das Glück, dass wir für die Projektbetreuung immer genügend Studierende des Studiengangs Systemtechnik finden können. Während der Sommerferien studieren sie die vorbereiteten Unterlagen und erstellen die Detailplanung für einen Projekttag. Meist muss man selber auch noch die Arbeit ausprobieren, damit man selber die Tücken kennt. Unterstützt werden die Betreuenden durch einen Didaktik-Kurs, der von Dozierenden der Pädagogischen Hochschule angeboten wird. Im 2014 stellte sich dafür wiederum die äusserst erfahrene Anni Heitzmann zur Verfügung.

Die Stimmung im Schulgebäude ändert sich stark, wenn die SJf-Wochen stattfinden. Das fast eingeschlafene, in den Semesterferien ziemlich leere Gebäude wird schnell durch das Leben der Jugendlichen geweckt. Die Kinder nehmen viele Erlebnisse aus den Projektwochen mit, an die sie sich lange erinnern, bei einigen prägt sie aufgrund der Berufswahl ihr ganzes Leben.

# FIRST LEGO League: Herausforderungen der Nachwuchsförderung

FIRST® LEGO® League ist ein Förderprogramm, das Kinder und Jugendliche im Alter zwischen 10 und 16 Jahren in einer sportlichen Atmosphäre an Wissenschaft und Technologie heranführen möchte. Unter dem Motto «Worldclass» untersuchten die Kinder und Jugendlichen im diesjährigen Wettbewerb, wie das Klassenzimmer mit moderner Technik revolutioniert werden kann.

**Jürg Peter Keller**



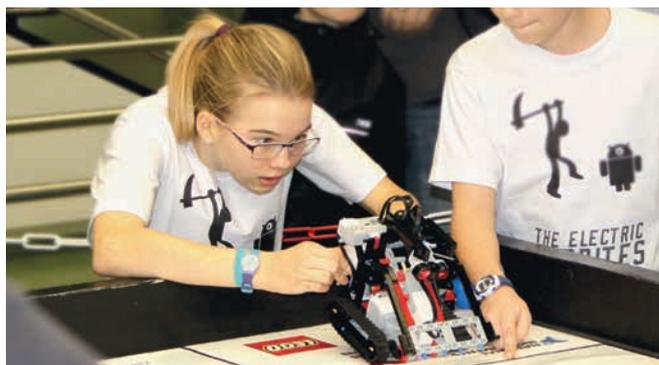
Fachkräftemangel und Jugendförderung sind viel diskutierte politische Themen. Die Hochschule für Technik FHNW versucht mit Jugendprogrammen wie der FIRST LEGO League (FLL) ihren Teil zur Problemlösung beizutragen. Wenn man aber die rückläufigen Teilnehmerzahlen und auch die Leistungen der Teilnehmenden am FLL-Wettbewerb betrachtet, so sieht es düster aus für den Technik-Nachwuchs. Während in Deutschland die FLL-Wettbewerbe von Gymnasiastinnen und Gymnasiasten sowie von Jugendlichen in Förderprogrammen geradezu überschwemmt werden, ist in der Schweiz nichts davon zu spüren. Auch das fachliche Niveau gibt zu denken: Die wenigen Teams, die am diesjährigen Wettbewerb teilgenommen haben, überzeugten eher durch Improvisationstalent als durch technisches Können und Kreativität. Kein Team aus der Nordwestschweiz konnte sich am anschliessenden Halbfinal in Chur für die nächste Runde qualifizieren und am Final in München waren die drei Schweizer Teams auf den hintersten fünf Rängen zu finden.

## **Fehlender Support für technische Bildung**

Wichtige Gründe für die fehlende Technik-Begeisterung und das tiefe fachliche Niveau sind der Mangel technisch ausgebildeter Lehrpersonen und das Fehlen konkreter Ziele und

Konzepte für die technische Bildung auf politischer Ebene. Auch im «Lehrplan 21» nimmt die technische Bildung nur die Rolle eines Mauerblümchens ein und auf Sek1-Stufe sind die Gymnasien nicht in der Lage, einen Technikunterricht zu gestalten, der der Bedeutung des Fachs im Alltag entspricht.

Trotz der schlechten Ausgangslage konnten wir dank der Unterstützung von SwissLos in diesem Jahr wieder einen regionalen Wettbewerb durchführen und einigen Jugendlichen ein tolles Erlebnis anbieten. Dies wird durch die Bilder dokumentiert.



# Konferenzbeiträge

Anlässlich von Konferenzen hielten Mitarbeitende des Instituts für Automation zahlreiche Referate zu ihren Fachgebieten.

Konferenzen		Hochschule	Referate des Instituts für Automation
Mechatronics 2014 The 14th Mechatronics Forum International Conference	16.-18.Juni 2014 Karlstad, Sweden	Karlstad University, Sweden	Kurmamm L. und Niederberger S. <b>Energy-Efficient High-Pressure Pump</b> Proceedings of the 14th Mechatronics Forum International Conference, Karlstad University, Swe- den, 2014, ISBN: 978-91-7063-564-9, pp.132-140.
SysTol 2013 2nd International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems	9.-11.Oktober 2013 Nice, France	Research Center for Auto- matic Control of Nancy and Université de Lorraine	Zogg D. und Treyer D. <b>Model and Expert Knowledge Based Fault Diagnosis for a Heat Exchanger</b> Proc. 2013 Conf. on Control and Fault-Tolerant Systems, Nice, France, pp.680-685.
IN-TECH 2013 International Conference on Innovative Technologies	10.-13. September 2013 Budapest, Hungary	Faculty of Engineering, Rijeka University, Croatia	Anderegg R. und Edelmann M. <b>Modeling and Control of Robot Aided Belt Grinding Manufacturing Processes</b> IN-TECH 2013 Proceedings of International Conference on Innovative Technologies, Faculty of Engineering University of Rijeka, 2013, ISBN: 978-953-6326-88-4, S. 197 – 200.
Bogie 2013 9th International Conference on Railway Bogies and Running Gears	9.-12. September 2013 Budapest, Hungary	Budapest University of Technol- ogy and Economics, Depart- ment of Railway Vehicles and Vehicle System Analysis	Anderegg R. und Birrer C. <b>New, Intelligent Bogie Test-Rig Technology</b>
INCINCO 2013 International Conference on Infor- matics in Control, Automation and Robotics	29.-31. Juli 2013 Reykjavik, Island	Reykjavik University, Island	Keller J. P und Agarwal M. <b>Performance Optimization in Intelligent Manufacturing: Decision Support System for Value Engineering in Flour Mills</b>
1st Annual International Conference on Industrial, Systems and Design Engineering	24.-27. Juni 2013 Athens, Greece	Athens Institute for Educa- tion and Research, Sciences and Engineering, Research Division	Anderegg R. und Edelmann M. <b>Non-Linear Control of Robot aided Belt Grinding Manufacturing Processes</b> Athens: ATINER'S Conference Paper Series, No: IND2013-0818, 2013, ISSN 2241-2891

## Preise

Die Leistungen unserer Bachelor- und Master-Studierenden wurden im 2014 mit folgenden Preisen für hervorragende Diplomarbeiten ausgezeichnet:

### Studierendenpreise 2014 der Schweizerischen Vereinigung der Systemingenieure (SSSE)

1. Platz: Max Edelmann, Bachelor of Science FHNW in Systemtechnik und Master of Science in Engineering MSE für seine Masterarbeit im Systems Engineering mit dem Titel ‚Vollautomatische robotergestützte Schleiftechnologie in der Armaturenfertigung‘
3. Platz: Stefan Herbert, Bachelor of Science FHNW in Systemtechnik für seine Bachelorarbeit im Systems Engineering mit dem Titel ‚Requirements Engineering mittels PLM Technologien‘

### Studienpreise 2014 der Deutschen Gesellschaft für Systems Engineering (GfSE)

2. Platz: Max Edelmann für seine Masterarbeit im Systems Engineering mit dem Titel ‚Vollautomatische robotergestützte Schleiftechnologie in der Armaturenfertigung‘

### Förderpreis 2014 der Schweizerischen Gesellschaft für Automatik (SGA)

1. Platz: Max Edelmann für die beste Masterarbeit in der Regelungstechnik mit dem Titel ‚Vollautomatische robotergestützte Schleiftechnologie in der Armaturenfertigung‘

# Studierendenprojekte und Bachelor-Thesen

Die nachfolgenden Arbeiten wurden im Rahmen der Studiengänge Systemtechnik, Elektro- und Informationstechnik sowie Energie- und Umwelttechnik durch Dozierende und wissenschaftliche Mitarbeitende des Instituts für Automation der Hochschule für Technik FHNW betreut.

Themengebiet / Projektidee / Aufgabenstellung	Auftraggeber/Partner	Advisor	Studierende
Neugestaltung Steuerung zu Ultrahoch-Vakuum-Kammer	PSI Villigen	Sekler Jörg	Seeger Sebastian
Next Generation Quadcopter V2.0	FHNW, Institut für Automation	Kurmann Lukas	Hugi Dominik
PSI Brennpunkts-Apparatur	PSI Villigen	Stuber Bruno	Schaffner David
Implementierung Bewirtschaftung eines Wasserkanalsystems	Chestonag Automation AG	Stuber Bruno	Renggli André
Pulsmuster-Simulationsgenerator	Alstom AG	Stuber Bruno	Böhler Frank
Systems Engineering und Requirements Management	Siemens AG	Anderegg Roland	Herbert Stefan
Testanlage und Simulator für automatisierte Inbetriebsetzungen	Ammann Schweiz AG	Anderegg Roland	Schmidlin Peter
Integration einer Robotersteuerung in eine Gesamtfertigungslösung	Fanuc Robotic	Edelmann Max, Anderegg Roland	Villinger Joachim Florian
Zusammenlegung FK-IT und FK-SX	Robatech AG	Edelmann Max, Anderegg Roland	Renggli Fabian
Sensorik und Algorithmus für die Messung des Oberflächenwiderstands	Alstom (Schweiz) AG, Electrical Insulation Systems (EIS)	Hauswirth Karl	Zihlmann Marcel
Echtzeit-Simulation des dynamischen Systemverhaltens	Ammann Schweiz AG	Anderegg Roland	Hofer Tobias
Dynamik von Baumaschinen zum Abtrag von Asphalt, Beton usw.	Ammann Schweiz AG	Stuber Bruno	Muggli Lukas
Automatisierung von Montageprozessen für Halbleiterkomponenten	ABB Schweiz – Semiconductors	Sekler Jörg	Borisavljevic Marko
Automatisierte Oberflächenanalyse mittels Wafer-Mikroskop	PSI Villigen	Sekler Jörg	Müller Samuel
Interpolation von Encodern	FHNW, Zumbach AG	Keller Jürg Peter	Brun Benedikt
Automatische Kopfpositionsbestimmung integriert in einen Bürostuhl für die aktive Schallauslöschung am Arbeitsplatz	Stoll Giroflex AG	Gaulocher Sebastian	Siegenthaler Mathias
Getriebelose Mühlenantriebe im Bergbau - FMEA	ABB Schweiz AG	Gaulocher Sebastian	Sieber Daniel
Indoor-Navigationssystem für Rollstühle	Curtis Instruments AG	Gaulocher Sebastian	Notter Daniel
Ansteuerung eines Labor-Wasserturms mit Labview	FHNW, Institut für Automation	Zogg David, Germann Sivano	Wecker Sebastian
Mobiler Roboter	RUAG Defence, RUAG Land Systems AG	Niederberger Stefan	Reinhardt Tobias
Mobiler Roboter	RUAG Defence, RUAG Land Systems AG	Niederberger Stefan	Limberger Raffael
Ausstellungsobjekt Benutzer-Roboter-Spiel	FHNW, Institut für Automation	Gaulocher Sebastian, Edelmann Max	Mössner Nick
Automatisierung Wärmepumpen-Prüfstand	FHNW, System Control Lab	Zogg David	Fehlmann Patrick
Erweiterung Kriechexperimentieranlage	PSI Villigen	Sekler Jörg	Rebac Tomislav
Anpassung Gold Evaporator	PSI Villigen	Sekler Jörg	Schmidt Marcus
Intelligente Auswertung von FLAR-Informationen auf Segelflugplätzen	FHNW	Keller Jürg Peter	Kirchhofer Ron, Salazar Federic
Dronentuner für Dudelsack entwickeln	Dr. med vet. Rappo	Keller Jürg Peter	Wüthrich Lukas

Neue Regelstrategien für leistungsgeregelte Wärmepumpen	Bundesamt für Energie, Sektion Erneuerbare Energien	Zogg David, Treyer Daniel	Voramwald Lukas
Optimierung lokaler Eigenverbrauch von Photovoltaik-Wärmepumpenanlagen	Siemens Building Technologies International Headquarters, Zug	Zogg David	Waser Remo
Software zur Messwerterfassung von Mettlerwaagen	DSM Nutritional Products AG	Binggeli Daniel	Bruhin Adrian
Entwicklung Test-Umgebung "Jalousien" Regel- und Steuerapplikationen	Siemens Building Technologies, Control Products and Systems	Zogg David	Kost Johan
Entwicklung Test-Umgebung Wärmepumpen Regel- und Steuerapplikationen	Siemens Building Technologies, Control Products and Systems	Zogg David	Lüthy Michael
Mobile Robotik	Rapid AG	Anderegg Roland	Bösch Philipp
Testanlage für Joysticks	Genge & Thoma AG	Keller Jürg Peter	Wirz Simon
PEC-Recovery Koffer	ABB Schweiz AG	Gaulocher Sebastian	Niggli Sascha (P5)
Linux-Applikationsentwicklung zur automatisierten Analyse von Mineralien	SpectraFlow Analytics AG	Gaulocher Sebastian	Niggli Sascha (BT)
Skaliertes Modell eines Energiegenerators	Amman Schweiz AG	Gysin Hans, Kurmann Lukas	Steger Jan (P5)
Simulation der Drahtschwingungen einer Drahtsäge	Meyer Burger AG	Gaulocher Sebastian, Treyer Daniel	Steger Jan (BT)
POLE-Project	FHNW, Institut für Automation	Eichin Heinz	Miracco Sergio
Batterieprüfstation	Renata SA	Hauswirth Karl	Baumann Patrik
Sensor-Elektronik für Gasqualitätsmessgerät	Zehnder Group Int.	Ganzmann Peter, Meier Matthias	Jeseneg Andreas, Mäder Robin
Trajektorienregelung einer Landwirtschaftsmaschine	FHNW, Institut für Automation	Keller Jürg Peter	Wullschleger Moritz

## Vertiefungsprojekte der Master-Studierenden

<b>Projektthema</b>	<b>Auftraggeber</b>	<b>Advisor</b>	<b>Studierende</b>
Regelung eines Labor Rührkessels für Scale-up	Roche Pharma AG	Zogg David	Blum Jérôme
Effiziente Elektroantriebe	Micro-Motor AG	Stuber Bruno	Elber Sebastian
Zustandsbasierte Wartung von Wärmepumpen und Kälteanlagen	KWT Kälte- Wärmetechnik AG	Zogg David	Elmiger Andreas
Dynamik eines Mikrogenerators	Camille Baur AG	Gysin Hans	Ernst Benjamin
Energie- und ressourceneffizientes Design für Verdichtungsgeräte im Strassenbau	Ammann Schweiz AG	Anderegg Roland	Wiss Dominik
Partikelsedimentation unter simulierter partieller und Mikro-Gravitation	Kompetenzzentrum "Aerospace Biomedical Science & Technology" (c/o HSLU)	Sekler Jörg	Glünkin Raphael
Repetitive Zustandsregelung eines Objektivs mittels Piezoaktor zur Laserfokussierung	FHNW	Keller Jürg Peter	Keller Oliver
Intelligente, automatisierte Drehgestell-Prüfstandstechnik	Nencki AG	Anderegg Roland	Birrer Claudio
Realisierung „Angetriebene Armatur“	Nussbaum AG	Gysin Hans	Schneider Livio
Regelstrategien für die Optimierung des Eigenverbrauchs von Gebäuden	Bundesamt für Energie	Zogg David	Trayler James



Für persönliche Auskünfte und Beratung stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung:

Leiter Institut für Automation  
Prof. Dr. Roland Anderegg  
T +41 56 202 77 43, [roland.anderegg@fhnw.ch](mailto:roland.anderegg@fhnw.ch)

Sekretariat Institut für Automation  
T +41 56 202 75 28, [info.ia.technik@fhnw.ch](mailto:info.ia.technik@fhnw.ch)

Weiterbildung MAS Automation Management  
Studiengangleiter Prof. Dr. Jürg Peter Keller  
T +41 56 202 77 62, [juerg.keller1@fhnw.ch](mailto:juerg.keller1@fhnw.ch)  
[www.fhnw.ch/wbt/mas/am](http://www.fhnw.ch/wbt/mas/am)

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW  
Hochschule für Technik  
Institut für Automation  
Klosterzelgstrasse 2  
CH-5210 Windisch

[www.fhnw.ch/technik/ia](http://www.fhnw.ch/technik/ia)