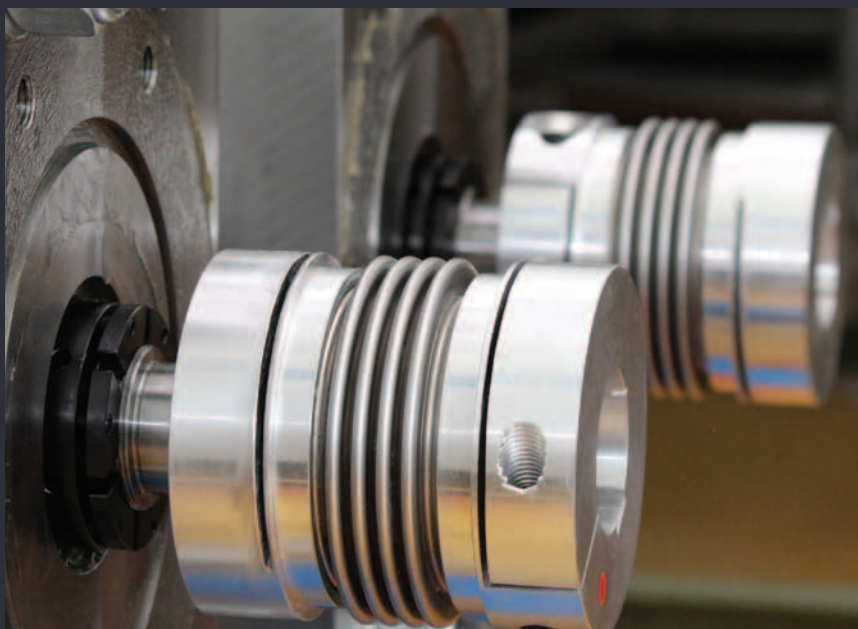
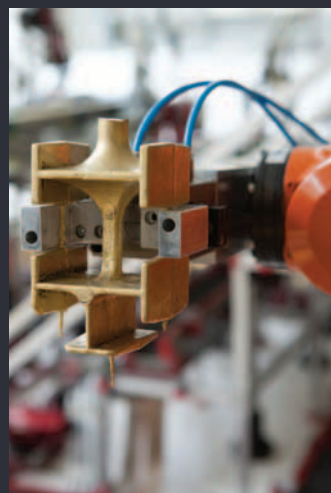
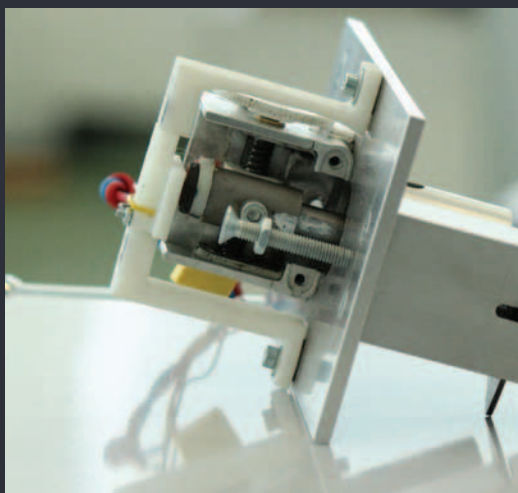


**Institut für Automation
Tätigkeitsbericht 2013**
www.fhnw.ch/technik/ia



Impressum

Herausgeberin: Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW,
Hochschule für Technik, Institut für Automation

Projektleitung und Redaktion: Rolf Isler, Jadwiga Gabrys, Annette Lüthy

Layout: Ben Newton, digitworks.ch

Erscheinungsweise: jährlich

Druck: Abächerli Media AG

Auflage: 1'000 Exemplare

Inhalt

3	Editorial
---	-----------

Moderne Methoden der Regelungstechnik

4	Optimale Steuerung und Regelung von Solar-Parabolrinnenkollektoren Jürg Peter Keller
6	Regelstrategien für die Optimierung des Eigenverbrauchs von Gebäuden James Trayler, David Zogg
8	Repetitive Zustandsregelung eines Objektivs mittels Piezoaktor zur Laserfokussierung Oliver Keller, Jürg Peter Keller
12	Modellierung eines spezifischen mechatronischen Aktors und Vorschlag einer Regelung Sandro Wiedmer

Mechatronische Systeme

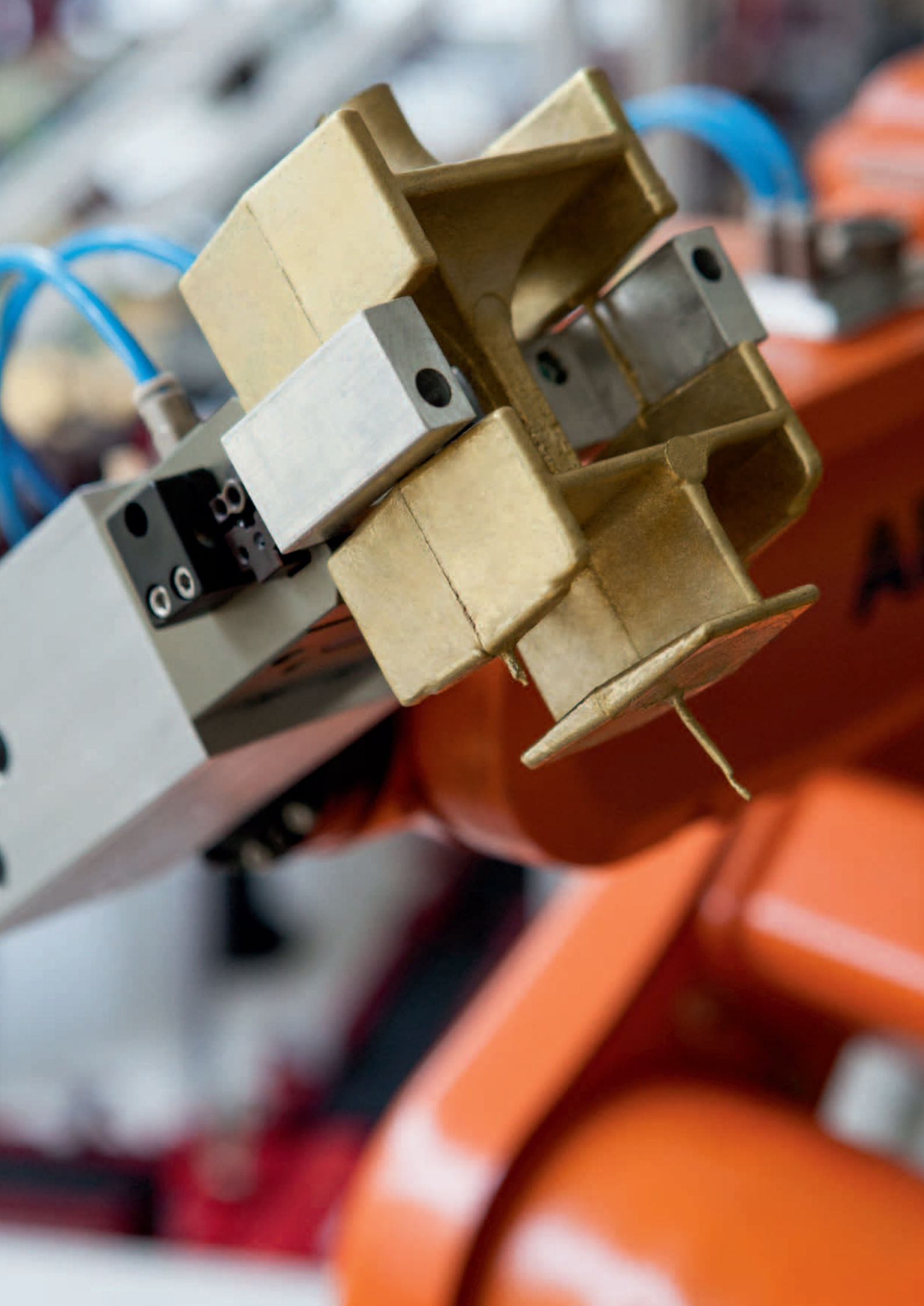
16	Mikrogravitationssimulation: Im Spannungsfeld zwischen wissenschaftlicher Anwendung und als spielerischer Eye-Catcher an Ausstellungen Jörg Sekler
18	Hochdruckwasserstrahlschneiden Lukas Kurmann, Stefan Niederberger
22	Bodenverdichter Roland Anderegg, Lukas Recher
25	Modellierung und Simulation der nichtlinearen Dynamik von Flächenbearbeitungsmaschinen Sandro Wiedmer
28	Dynamische Drehgestell-Prüfstandstechnik Claudio Birrer

Weitere Fachgebiete

32	Modellierung von robotergestützten Bandschleifanlagen am Beispiel der Armaturenherstellung Max Edelman
38	Signalverarbeitung in programmierbarer Logik Bruno Stuber
40	Induktive Erwärmung von Blechpaketen Peter Ganzmann
42	Systemunabhängiger Rezepthandler Thomas Blaser, Jürg Peter Keller

Nachwuchsförderung, Aus- und Weiterbildung

46	First™ Lego® League – Internationales Förderprogramm für Kinder und Jugendliche Jérôme Blum, Jürg Peter Keller
48	Studierendenprojekte und Bachelor-Thesen
49	Vertiefungsprojekte der Master-Studierenden



Geschätzte Leserin, geschätzter Leser

Wir freuen uns, Ihnen den Tätigkeitsbericht 2013 des Instituts für Automation der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW vorzulegen. Das über zwanzigköpfige Team erbrachte im Berichtsjahr vielfältige Leistungen in der Aus- und Weiterbildung sowie in Zusammenarbeit mit der Industrie, wo wir herausfordernde Forschungsprojekte und Dienstleistungsaufträge durchführen durften.

In der grossen Vielfalt der Projekte sticht eine Gemeinsamkeit hervor: Es ist die Anwendung der mathematischen Systemtheorie zur Modellierung, Analyse und Beeinflussung/Regelung komplexer dynamischer Systeme – dies stellt auch die Kernkompetenz des Instituts dar.

Die Beiträge veranschaulichen die vielseitigen Anwendungsgebiete, sei dies bei der Analyse der Schwingungen und Vibrationen bei Roboterarmen, in der Prüftechnik für Schienenfahrzeuge oder der Regelung einer Laserfokussierung. Wie die Industrieprojekte zeigen, wird dies nicht als akademische Übung abgehandelt. Das Institut für Automation bietet seinen Partnern anspruchsvolle, in der Praxis relevante Grundlagen für die effiziente Nutzung der zur Verfügung stehenden Energieformen und der notwendigen Ressourcen.

Die angewandte Forschung erlaubt uns, Innovationen gemeinsam mit Industriepartnern zu entwickeln und damit insbesondere unsere Master-Studierenden praxisorientiert zu hervorragenden Fachleuten auszubilden.

Das Institut für Automation engagiert sich aber auch in der Nachwuchsförderung von zukünftigen Ingenieurinnen und Ingenieuren und organisiert Veranstaltungen wie zum Beispiel die First™ Lego® League, welche Kinder und Jugendliche mit grossem Erfolg ansprechen.

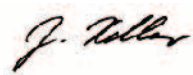
Im Rahmen der Ausbildung durfte das Institut für Automation den Unterricht in den Studiengängen Systemtechnik, Wirtschaftsingenieurwesen, Elektro- und Informationstechnik sowie Energie- und Umwelttechnik wahrnehmen. Das bewährte Weiterbildungsangebot MAS Automationsmanagement ist im vergangenen Jahr erfolgreich mit 13 Studierenden gestartet.

Wir wünschen 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!

Freundliche Grüsse



Roland Anderegg
Institutsleiter



Jürg Peter Keller
Stellvertretender Institutsleiter

Optimale Steuerung und Regelung von Solar-Parabolrinnenkollektoren

Zur optimalen Energiegewinnung müssen Parabolrinnenkollektoren sehr präzise der Sonne nachgeführt werden. In einem Studierendenprojekt wurde dazu eine kostenoptimale Lösung erarbeitet. Eine Online-Optimierung erlaubt eine präzise Nachführung der Kollektoren ohne aufwändige Inkrementalgeber sowie eine permanente Überwachung der Spiegeleffizienz.

Jürg Peter Keller



Die Parabolrinnenkollektoren müssen exakt der Sonne nachgeführt werden, damit Sonnenstrahlen durch die parabolische Rinnenform genau auf ein Absorberrohr, dem Brennpunkt, gebündelt werden. Die Wärmeenergie wird mittels eines Fluids, welches durch das Absorberrohr fließt, abgeführt. Aufgrund der erreichbaren Temperatur von 230°C können damit Dampferzeuger oder Absorptionswärmepumpen betrieben werden.

Bei den heutigen, durch die Firma Nep Solar entwickelten Anlagen wird jeder Kollektor mit Hilfe von Schrittmotoren und einer eigenen Steuerung nach der Sonne ausgerichtet. Diese Art der Positionierung ist teuer. Das Studierendenprojekt befasste sich mit der Verbesserung der Anlagensteuerung. Ein kostenoptimales Steuerungskonzept wurde erarbeitet. Zudem wurde untersucht, wie mit einem günstigen, aber dennoch robusten Scheibenwischemotor die Kollektoren ausgerichtet werden können.

Das Steuerungskonzept

Bei der Untersuchung verschiedener Steuerungsvarianten zeigte sich, dass eine Beckhoff-SPS, die über CAN-Bus mit den Servoreglern der DC-Motoren kommuniziert, eine sehr preiswerte Lösung ist. Das Systemkonzept ist in der Abbildung 1 dargestellt.

Mit CAN-Bus können bis 128 Kollektoren über die benötigten Distanzen eines Feldes gesteuert werden. In der Beckhoff-SPS steht auch die nötige Softwarebibliothek für die Berechnung der Spiegelpositionen zur Verfügung, und eine einfache, aber den Anforderungen voll genügende Visualisierung kann auf der SPS realisiert werden. Eine Kostenanalyse zeigt, dass bereits ab 3 Kollektoren die im Projekt erarbeitete Lösung kostengünstiger ist als die bestehende Lösung.

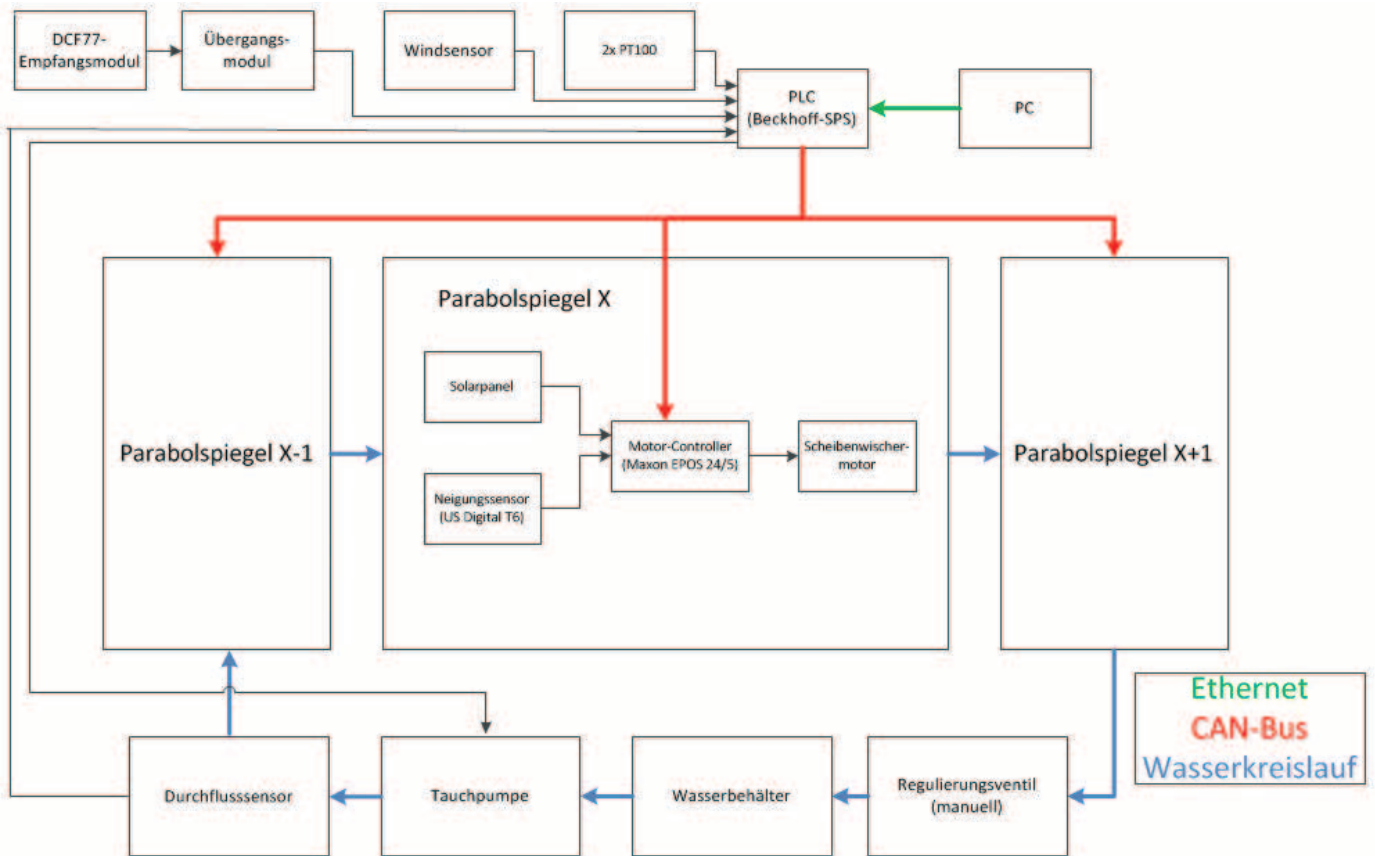


Abbildung 1: Systemkonzept mit Beckhoff-SPS

Optimale Regelung

In bestehenden Anlagen wird die Positionsregelung über Neigungssensoren oder über hoch auflösende Inkrementalgeber realisiert. Die Positioniergenauigkeit für den Neigungswinkel muss für eine optimale Fokussierung nämlich kleiner als 0.1 Grad sein. Im Projekt wurde untersucht, wie durch Online-Optimierung die optimale Spiegelposition aufgrund der thermischen Leistung des Kollektors bestimmt werden kann. In Abbildung 2 ist dargestellt, wie die thermische Leistung für eine sehr langsame Drehung über den Fokussierungspunkt aussieht. Anhand einer solchen Kurve kann sehr viel über den Zustand der Anlage diagnostiziert werden. Die gemessene Kurve zeigt, dass das Absorberrohr bei der Messung nicht im Brennpunkt des Parabolspiegels montiert war, in diesem Falle zu nahe am Spiegel. Ein Teil der Strahlung ging also am Rohr vorbei. Daher konnte der Spiegel gedreht werden, ohne dass eine signifikante Leistungsabnahme messbar war. Natürlich werden die Spiegel bei der Montage richtig eingestellt, aber Veränderungen am Fundament, Verschiebungen oder Verdrehungen durch andere Einflüsse können so aufgrund der ungünstigen Fokussierung gut erkannt werden.

Verschiedene Einflüsse, beispielsweise Wolken, welche die thermische Leistung stark reduzieren, stören eine Online-Optimierung. Dies könnte mittels einer Referenzmessung durch eine kleine Solarzelle kompensiert werden. Mehr Probleme bereitet hingegen der Wind durch das Abkühlen des Absorberrohrs. Dafür eine Lösung zu finden, bildet der Inhalt eines folgenden Studierendenprojekts.

Reflexion

Der Bau der Parabolspiegelanlage sowie die Realisierung und Programmierung der Anlagensteuerung forderten von

den Studierenden alle Fähigkeiten, über die ein angehender Systemingenieur verfügen muss. Das Projektteam hat diese Projektaufgabe sehr erfolgreich gelöst und damit gezeigt, dass Automation auch bei den erneuerbaren Energien eine zentrale Komponente bildet.

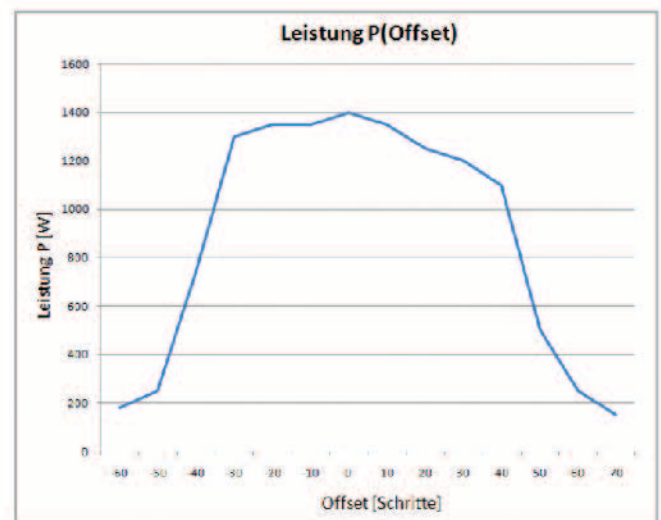


Abbildung 2: Thermische Leistung in Funktion des Drehwinkels

Projektteam

Prof. Dr. Jürg P. Keller, Advisor/Betreuer,

juerg.keller1@fhnw.ch

Bachelor-Studierende im Studiengang Systemtechnik:

Lukas Muggli, lukas.muggli@students.fhnw.ch;

Simon Wirz, simon.wirz@students.fhnw.ch

Regelstrategien für die Optimierung des Eigenverbrauchs von Gebäuden

In der Energiestrategie 2050 will der Bundesrat die Eigenverbrauchsregelung für Klein-Photovoltaikanlagen (bis 10 kW) einführen. Damit soll ein finanzieller Anreiz geschaffen werden, um den produzierten Strom zeitgleich zu verbrauchen und damit das Netz zu entlasten. In einem laufenden Projekt des Bundesamtes für Energie (BFE) werden Regelstrategien zur Optimierung des Eigenverbrauchs unter Berücksichtigung der lokalen elektrischen wie auch thermischen Produktion, der Speicherkapazität und des Verbrauchs untersucht.

James Trayler, David Zogg

Die elektrischen und thermischen Energieflüsse in einem Gebäude bzw. zwischen den Komponenten sind in Abbildung 1 dargestellt. Im Fokus des Projektes steht die Wärmepumpe als grösster Verbraucher. Die Wärmepumpe wandelt elektrische in thermische Energie, welche anschliessend thermisch im Warmwasserspeicher oder der Gebäudehülle gespeichert wird. Weitere elektrische Verbraucher wie Waschmaschine oder Geschirrspüler können ebenfalls zur Eigenverbrauchsoptimierung beitragen. In Zukunft wird die Kühlung/Klimatisierung und die Elektromobilität eine zunehmend wichtige Rolle spielen.

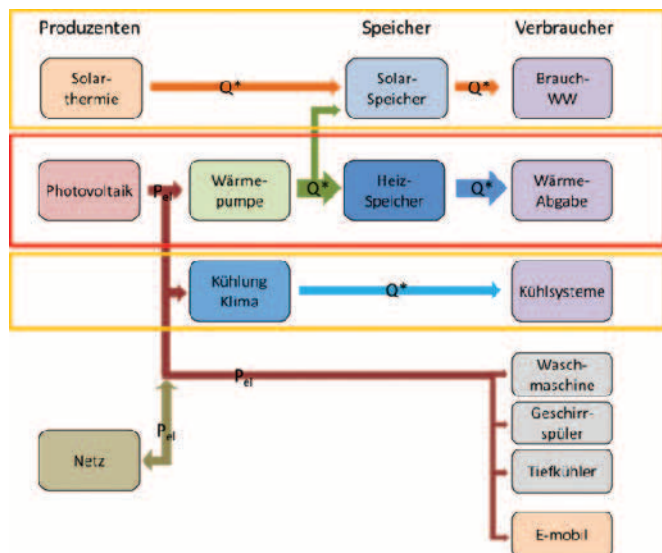


Abbildung 1: Energieflüsse im Fokus des Projektes. P_{el} elektrische Energieflüsse, Q^* thermische Energieflüsse

Virtueller Energiepreis

Zur gezielten Optimierung bezüglich Eigenverbrauch, Effizienz und Energiekosten wird als Neuheit ein virtueller Energiepreis definiert (Abbildung 2). Mit diesem können sowohl elektrische wie auch thermische Energieflüsse bewertet werden. Im virtuellen Energiepreis werden der effektive Stromtarif, die lokale Photovoltaik-Produktion und der Coefficient of Performance (COP) der Wärmepumpe berücksichtigt.

In Zukunft können damit auch variable Stromtarife einfließen. Die Regelstrategien basieren auf einer Minimierung des virtuellen Energiepreises, d.h. die Verbraucher werden zu tiefen Tarifzeiten eingeschaltet.

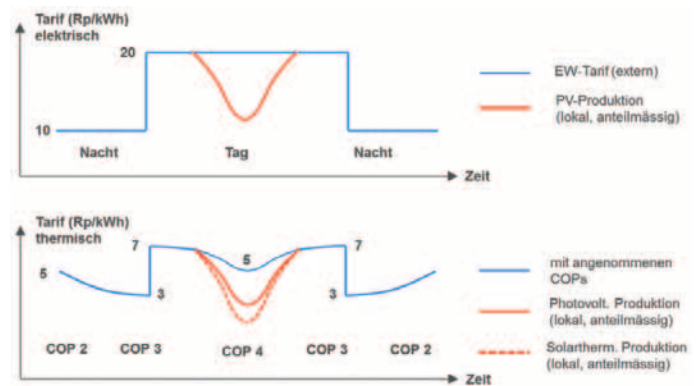


Abbildung 2: Virtueller Energiepreis zur Bewertung von elektrischer und thermischer Energie unter Berücksichtigung der lokalen Produktion und der Effizienz des Wärmeerzeugers (bei Wärmepumpe COP).

Online-Optimierung mit modellbasierter Regeltechnik

Neben klassischen Regelmethoden (Zweipunkt, PID) werden auch modellbasierte Regelmethoden untersucht. Model Predictive Control (MPC) eignet sich speziell für träge Gebäude, wobei Wetter- und Tarifprognosen berücksichtigt werden (Abbildung 3). Speziell die Tarifprognose wird in einer Zukunft mit variablen Stromtarifen eine wichtige Rolle spielen. Das Modell berücksichtigt die vorhandenen Speicher im Gebäude. Dazu gehören sowohl Puffer-/Warmwasserspeicher wie auch die Gebäudehülle als thermischer Speicher.

Beitrag des Instituts für Automation

Das Institut für Automation leitet das Projekt, welches zusammen mit Industriepartnern und dem Institut Energie am Bau der Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik FHNW durchgeführt wird. Als wesentlicher Bestandteil werden am Institut für Automation die neuen Regelkonzepte entworfen und Simulationen durchgeführt. Die Gebäudemodelle wurden vom Institut Energie am Bau entwickelt.

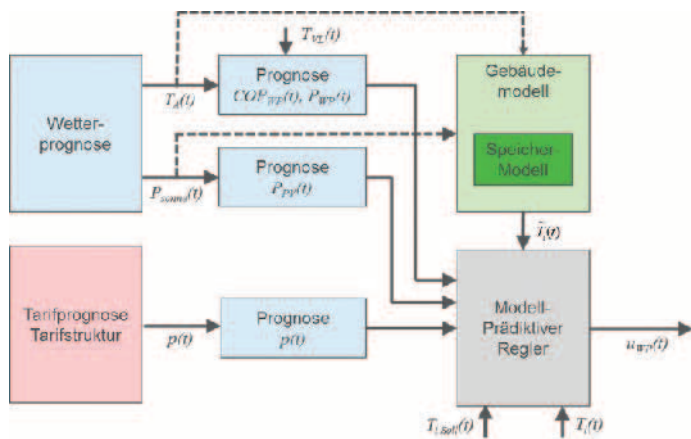


Abbildung 3: Model Predictive Control (MPC) mit Wetter- und Tarifprognose sowie Modell von Gebäude und Speicher

Fazit

Das Projekt befindet sich in der Konzeptphase. Erste Simulationen führten zu folgenden Erkenntnissen:

- Die thermische Speicherung in der Gebäudehülle hat ein erhebliches Potential, insbesondere bei gut isolierten Gebäuden mit grosser Trägheit (Massivbau).
- Eine regelungstechnische Optimierung ist unumgänglich. Bisherige Konzepte mit Leistungsgrenze oder festem Zeitprogramm sind zu wenig flexibel.
- Eine wesentlich gezieltere Regelung kann mit dem neu eingeführten virtuellen Energiepreis vorgenommen werden. Dieser ist auch für zukünftig variable Stromtarife geeignet.
- Falls die thermische Trägheit der Gebäudehülle voll ausgenutzt werden soll, wird eine Überwachung der Raumtemperatur unumgänglich, um den Komfortbereich einzuhalten.
- Eine direkte Ansteuerung der Wärmepumpe mit forciertem Ein-/Ausschalten hat klare Vorteile. Dazu eignet sich die neue Schnittstelle nach SGReady-Standard (SmartGrid Ready).

- Eine reine Eigenverbrauchsoptimierung kann auf Kosten der Effizienz gehen. Deshalb muss neben der Optimierung des Eigenverbrauchs immer auch die Effizienz des Gesamtsystems betrachtet werden (grosse Verbraucher vermeiden, energetische Sanierung durchführen, Temperaturen reduzieren).

Die Projektergebnisse werden durch das Bundesamt für Energie publiziert (www.bfe.admin.ch/dokumentation/energieforschung, Projekt "OPTREG", Nr. 810083).

Ausblick

In der nächsten Phase werden die Regelkonzepte anhand systematischer Simulationen quantitativ verglichen. Dabei werden die resultierende Eigenverbrauchsquote und die eingesparten Kosten untersucht. Später werden die Regelalgorithmen zusammen mit den Industriepartnern an einem Prüfstand umgesetzt. Der voraussichtliche Projektabschluss ist 2015.

Referenzen

Bundesamt für Energie (BFE): Regelstrategien für die Optimierung des Eigenverbrauchs von Gebäuden, Prof. Dr. D. Zogg, Jahresbericht 2013

Projektteam

Prof. Dr. David Zogg, david.zogg@fhnw.ch
James Trayler, BSc FHNW in Systemtechnik, Student Master of Science in Engineering (MSE), wissenschaftlicher Assistent, operative Leitung, james.trayler@fhnw.ch

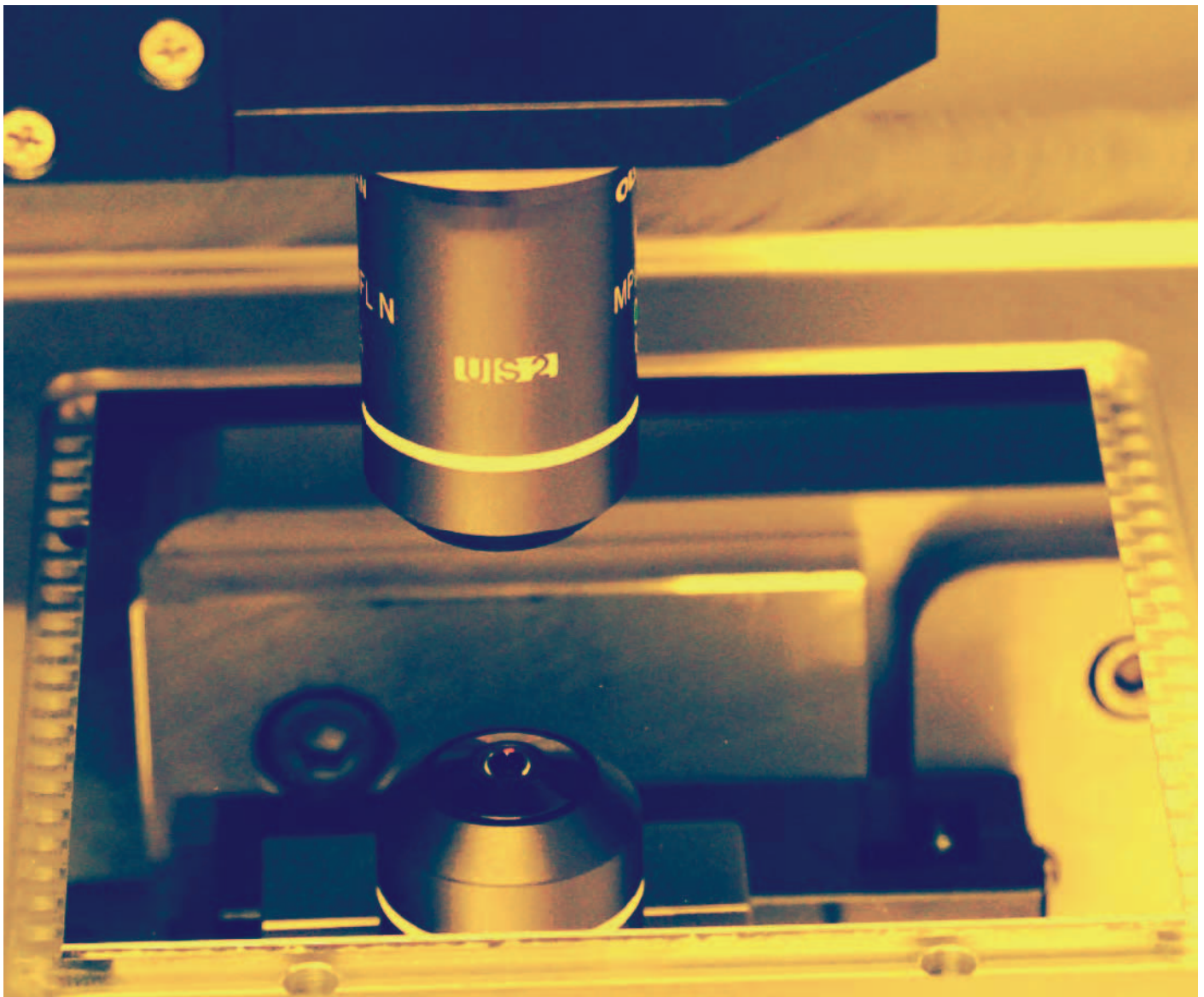
Weitere Projektpartner

Fachhochschule Nordwestschweiz: Institut Energie am Bau (IEBau), Institut für Aerosol- und Sensortechnik (IAST)
SIEMENS Building Technologies
CTA Klima Kälte Wärme AG
Ökozentrum Langenbruck

Repetitive Zustandsregelung eines Objektivs mittels Piezoaktor zur Laserfokussierung

Die resultierende Qualität, welche beim Belichten eines Substrats durch einen Laserstrahl erreicht werden kann, hängt markant von der Fokussierung ab. Um ein scharfes Bild zu generieren, muss mit Hilfe eines optischen Messsystems der Brennpunkt des Laserstrahls so geregelt werden, dass er auch einer unebenen Oberfläche folgen kann.

Oliver Keller, Jürg Peter Keller



In dieser Master-Thesis wird aufgrund der identifizierten Regelstrecke ein Zustandsregler entworfen, welcher im Vergleich zum bestehenden PI-Regler eine deutlich höhere Bandbreite erreicht und dadurch den Regelfehler besser unterdrücken kann. Die Fehlerunterdrückung wurde bei schnellen Verfahrgeschwindigkeiten um weitere 90% verbessert, indem mit Hilfe eines repetitiven Reglers der Zustandsregler entlastet wird.

Identifikation der Regelstrecke

Die Regelstrecke besteht aus einem Piezoaktor, welcher durch einen Verstärker über ein analoges Signal positioniert werden kann. Die Regelgrösse entspricht dem Fokussierfehler. Dieses Signal entsteht durch einen Laserstrahl, welcher für die Messung durch das Objektiv auf die Oberfläche fokussiert wird. Ein Detektor nimmt die reflektierte Strahlung auf und ermittelt so die Abweichung des Brennpunktes.

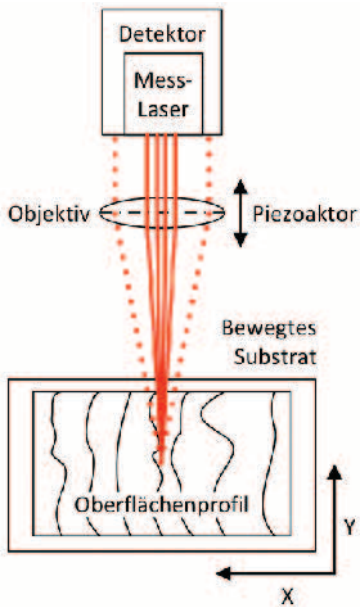


Abbildung 1: Messprinzip des Fokussierfehlers

Die Regelgröße wird null, wenn sich dieser genau auf der Oberfläche befindet.

Für die Modellierung der Regelstrecke wurde ein ein-dimensionales Feder-Dämpfer-Masse-System gewählt. Die Masse m_1 entspricht dem Objektiv, welches durch die Kraft F_m des Piezoaktors in Bewegung gebracht wird. Das Objektiv ist durch die Feder k_2 mit der Aufhängung m_2 verbunden, welche wiederum durch eine Feder k_3 an den starren Tisch gekoppelt ist. Auf die beiden Massen wirken zudem die viskosen Reibungen c_1 und c_2 .

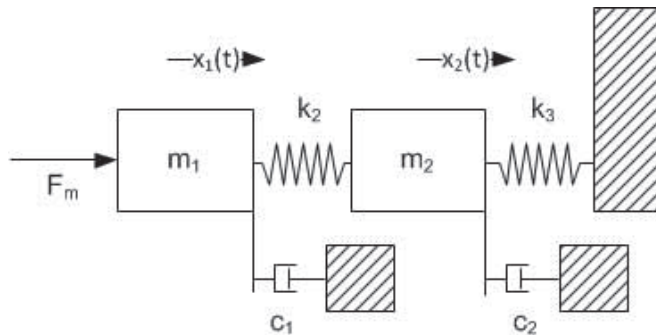


Abbildung 2: Feder-Dämpfer-Masse-System

Durch das Aufstellen der Kräftebilanz und das Einführen von zwei Zusatzvariablen, welche physikalisch den Geschwindigkeiten der beiden Massen entsprechen, entstehen vier Differentialgleichungen. Werden diese Gleichungen als Matrizen geschrieben, entsteht ein Zustandsraummodell der Regelstrecke. Es besteht die Möglichkeit, jedes Zustandsraummodell in die entsprechende Übertragungsfunktion umzuwandeln und umgekehrt. Die Zustandsraumdarstellung ist somit nichts anderes als ein praktischer Formalismus, um dynamische Systeme zu beschreiben. [Formel 1]

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_2}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & -\frac{c_1}{m_1} & 0 \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{(k_2 + k_3)}{m_2} & 0 & -\frac{c_2}{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{g}{m_1} \\ 0 \end{bmatrix} F_m$$

$$y = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \end{bmatrix}^T + [0] F_m$$

Formel 1: Zustandsraumdarstellung der Regelstrecke

Die Parametrisierung und Verifikation des Modells geschieht durch den Vergleich des Amplituden- und Phasenganges im Bodediagramm. Mit Hilfe eines Funktionsgenerators wurde die Regelstrecke durch einzelne Sinusschwingungen erregt.

Ein Lock-In-Verstärker zeichnete dann Amplitude und Phasenverschiebung des Messsignals bezogen auf das Erregungssignal auf.

Die physikalischen Parameter des Modells wurden in einem ersten Schritt abgeschätzt. Durch den direkten Vergleich der Frequenzantwort des Modells mit der Messung im Bodediagramm konnte in einem zweiten Schritt durch genaues Anpassen der Parameter das Modell ausreichend gut an den gemessenen Frequenzgang adaptiert werden.

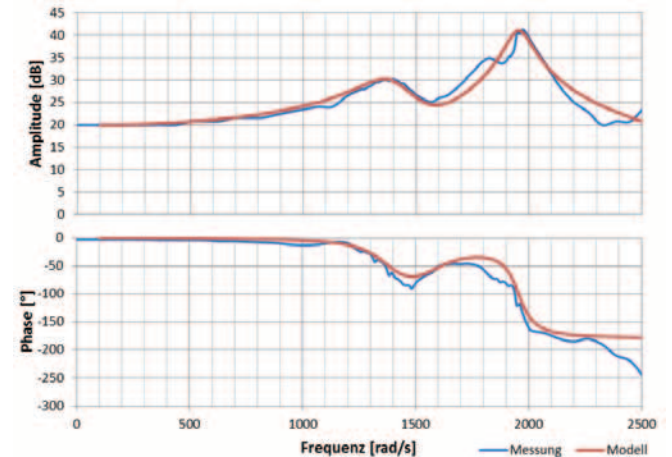


Abbildung 3: Vergleich physik. Modell mit Frequenzgangmessung

Entwurf und Implementation des Zustandsreglers

Die Reglerstruktur besteht aus einem Zustandsregler vierter Ordnung, einem Beobachter und einem zusätzlichen Integrator. Der Beobachter schätzt aufgrund des Messsignals die einzelnen Zustände, da die Position der beiden Massen sowie deren Geschwindigkeiten nicht direkt physikalisch gemessen werden. Der Integrator verhindert eine statische Regelabweichung, da die Regelstrecke dies nicht selber ermöglicht. Ein optimaler Zustandsregler wurde mit Hilfe des LQR-Algorithmus entworfen und der dazu passende Beobachter konnte durch die Anwendung der LQG/LTR-Methode gefunden werden. [2][3]

Bei der Implementation auf eine FPGA-basierte Hardware ist es von Vorteil, den Regler durch Äquivalenztransformation in eine modale Zustandsraumdarstellung zu bringen. Dies reduziert die Abhängigkeit der einzelnen Zustände voneinander, spart viele Additionen und Multiplikationen und die numerische Berechnung des Stellwerts wird robust. [4]

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix} e(k)$$

$$u(k) = [c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4 \ c_5] x(k) + [d] e(k)$$

Formel 2: Diskreter Regler in modaler Zustandsraumdarstellung

In einem ersten Test konnte der Zustandsregler sinusförmige Störungen je nach Frequenz mehr als doppelt unterdrücken im Vergleich zu einem PI-Regler (Abb. 4). Ein Grund dafür liegt in der aktiven Filterung der Resonanzüberhöhungen durch den Zustandsregler mit dem darin enthaltenen Modell der Regelstrecke. Der resultierende Frequenzgang des Reglers zeigt bei

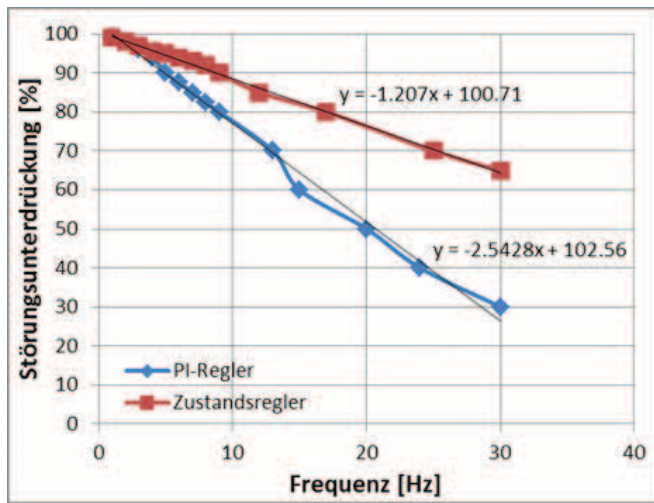


Abbildung 4: Vergleich Störungsunterdrückung

den Resonanzfrequenzen ein typisches Kerbfilter-Verhalten. Dadurch ist es möglich, die Durchtrittsfrequenz höher anzusetzen. Der Regler kann somit auf höhere Störfrequenzen reagieren und den Regelfehler besser minimieren.

Repetitiver Regler

Die Oberfläche, auf welche der Brennpunkt mit Hilfe des verstellbaren Objektivs geregelt wird, besteht bildlich gesprochen aus vielen Tälern und Bergen. Diese haben einen sanften Verlauf und reissen nicht plötzlich sehr steil ab. Aufgrund dieser Topologie sind sich zwei nahe liegende Schreiblinien sehr ähnlich. Durch den Schreibprozess bedingt, ist der Abstand von zwei benachbarten Linien immer sehr klein und somit können topologische Informationen der „alten“ Linie auf die „neue“ Linie übertragen werden. Anders formuliert sieht der Regler durch den Schreibprozess von Linie zu Linie aufgrund der Unebenheit eine Störgrösse, welche sich nach einer diskreten Anzahl Messpunkten z^{-N} zu einem grossen Teil immer wiederholt.

Der repetitive Regler generiert bei jedem harmonischen Vielfachen der periodischen Trajektorie eine unendlich grosse Verstärkung [Abb. 5]. Diese grosse Verstärkung bei der gewünschten Frequenz gibt dem repetitiven Regler die Möglichkeit, periodischen Trajektorien zu folgen. Gleichzeitig kann jedoch diese Verstärkung insbesondere bei höheren Frequenzen das System instabil werden lassen, weshalb in der praktischen Anwendung die grosse Verstärkung durch ein geeignetes Filter T_p reduziert werden muss. [Abb. 6]

Der repetitive Regler wird zwischen den Zustandsregler und der Regelstrecke eingefügt, wie in Abbildung 6 dargestellt. Er speichert den Verlauf der Stellgrösse von der vergangenen Linie und addiert den gefilterten Anteil auf die Stellgrösse der aktuellen Linie.

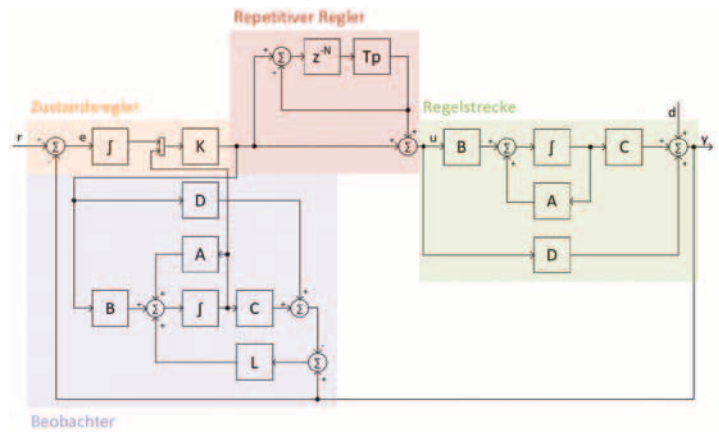


Abbildung 6: Blockdiagramm des Regelkreises

Ergebnisse

Der Vorteil des repetitiven Reglers zeigt sich sehr deutlich bei schnellen Verfahrensgeschwindigkeiten des Substrates. Der im Zustandsregler integrierte Integrator kann den Regelfehler nur mit einer begrenzten Geschwindigkeit aufsummieren und dadurch auf null bringen. Durch die Kombination aus einer Oberfläche mit tiefen Tälern und hohen Bergen und einer schnellen Bewegung des Substrats kann der Fokussierfehler nicht mehr in einen kleinen Bereich geregelt werden. Genau in dieser Situation zeigt der repetitive Regler eine hervorragende Verbesserung der Fehlerunterdrückung um über 90% im Vergleich zum reinen Zustandsregler. Dies ist in Abbildung 7 dargestellt. Durch die Vorsteuerung der Stellgrössentrajektorie mit Hilfe des repetitiven Reglers wirkt auf den Zustandsregler ein deutlich kleinerer Regelfehler, dessen Unterdrückung auch bei schnellen Geschwindigkeiten noch möglich ist.

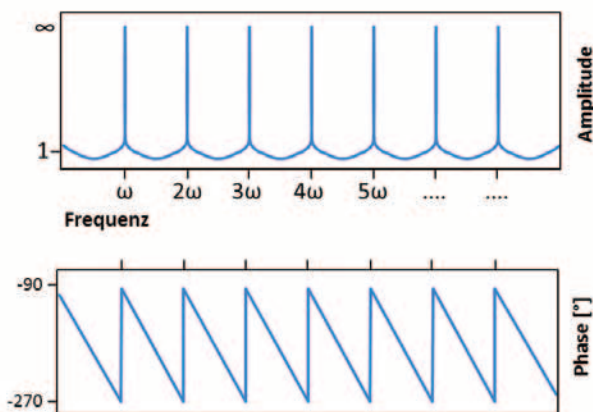


Abbildung 5: Bodediagramm des repetitiven Reglers ohne Filter

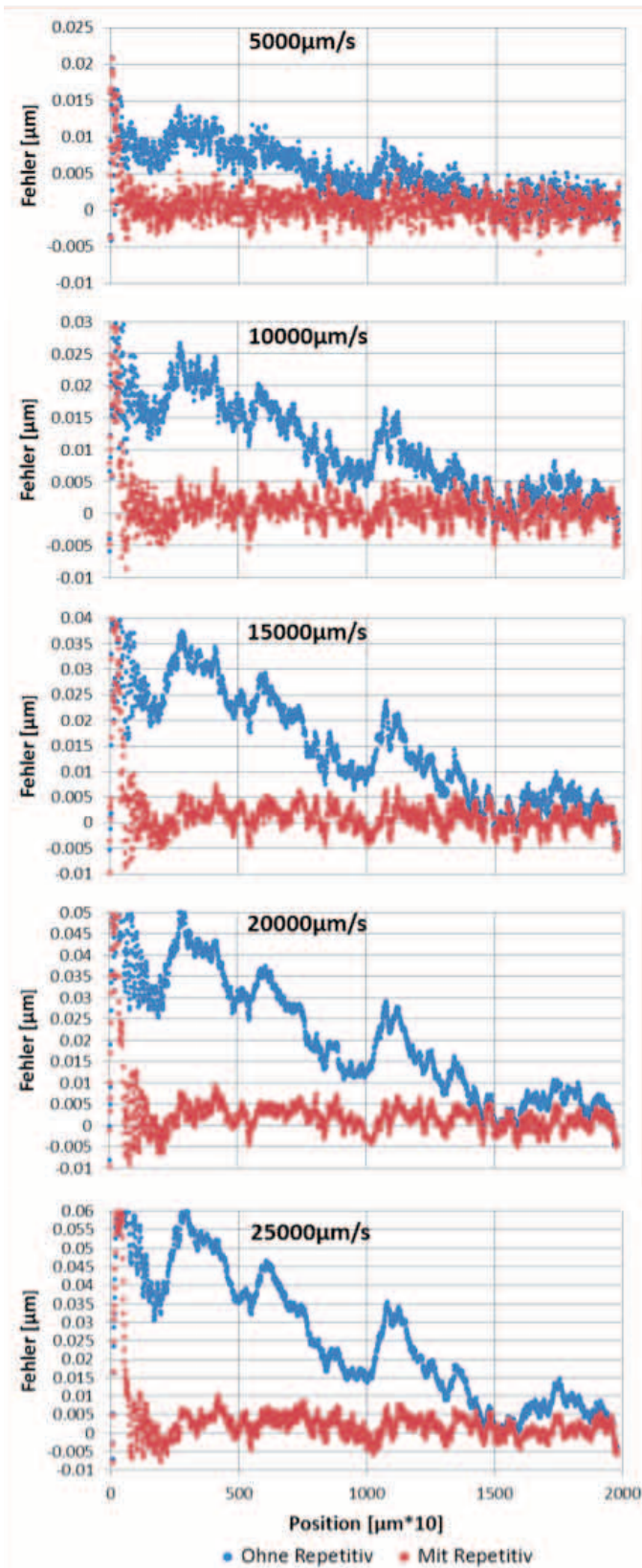


Abbildung 7: Fehlerverläufe repetitiver Regler

Projektteam

Prof. Dr. Jürg P. Keller, Advisor, juerg.keller1@fhnw.ch
 Oliver Keller, BSc FHNW in Systemtechnik, Studierender
 Master of Science in Engineering (MSE),
 oliver.keller@students.fhnw.ch

Literaturverzeichnis

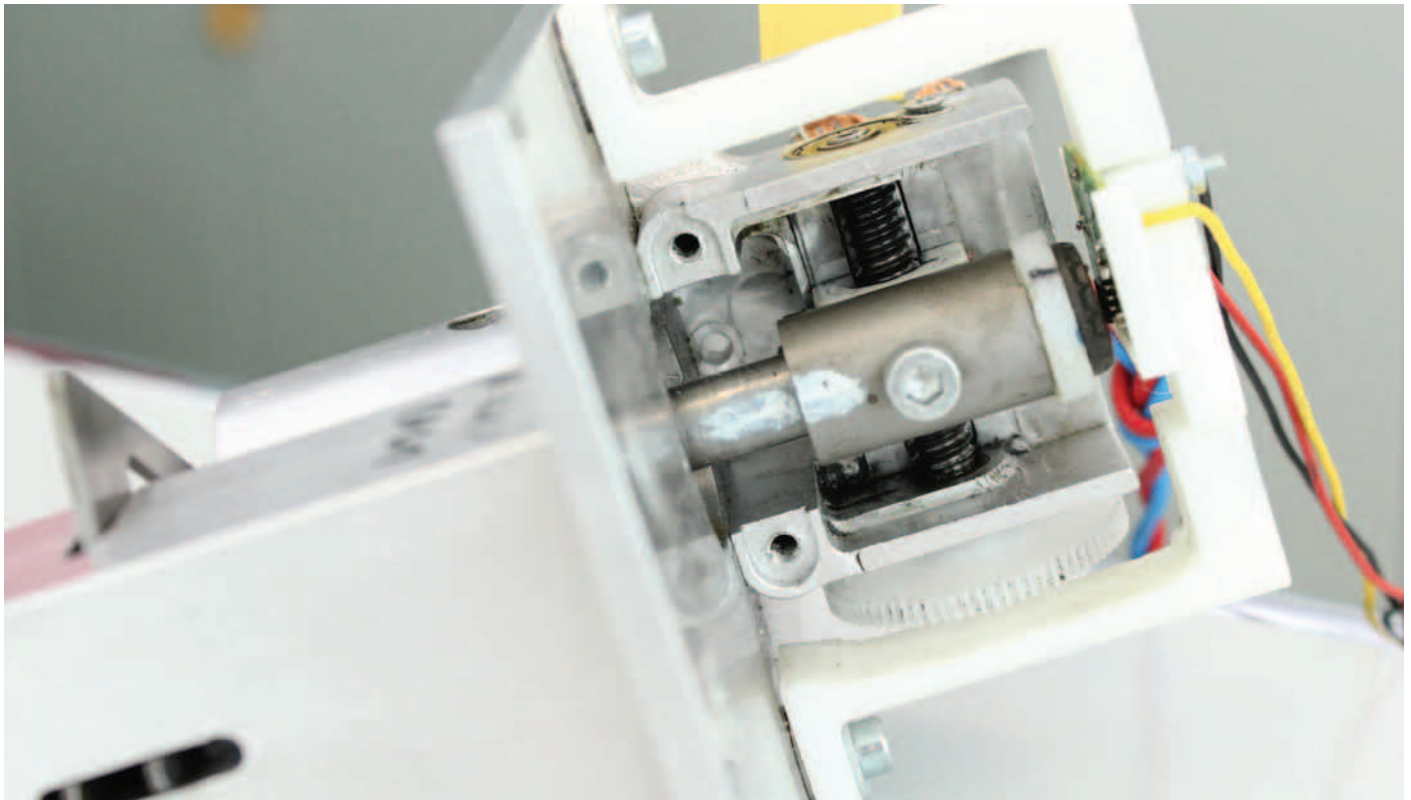
- [1] Büchi Roland, Kottmann Markus: State Space Description: MSE-Modul Advanced Control, September 2011, Seiten 1-6
- [2] Büchi Roland, Kottmann Markus: State Regulator: MSE-Modul Advanced Control, September 2011, Seiten 7-10
- [3] Büchi Roland, Kottmann Markus: State Regulator with Observer: MSE-Modul Advanced Control, September 2011, Seiten 8-10
- [4] Keller Jürg Peter: Zustandsraummethoden in der modernen Regelungstechnik: BSc-Modul Control Systems 2, Februar 2011, Seiten 51-52
- [5] Yingfeng Shan, Kam K. Leang: Design and Control for High-Speed Nanopositioning: IEEE Control Systems Magazine, Dezember 2013, Seite 7

Modellierung eines spezifischen mechatronischen Aktors und Vorschlag einer Regelung

Im Rahmen eines Dienstleistungsprojektes wurde ein Aktor untersucht und mittels Modellbildung und Simulation darauf aufbauend ein Regler ausgelegt. Bisher wurde für erste Versuche mit dem Aktor ein Dreipunktregler verwendet, dessen Verhalten jedoch nicht befriedigt.

Die Ergebnisse dieser Dienstleistung fließen direkt in die Implementierung auf einer neuen Platine für die Regelung und Leistungselektronik zur Ansteuerung des Antriebes ein. Daher muss nebst dem Regler auch die Speisung spezifiziert werden.

Sandro Wiedmer

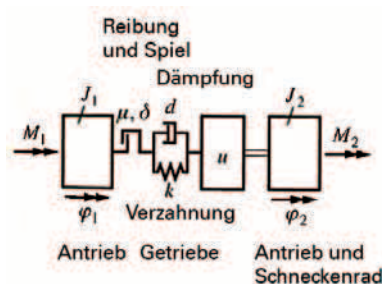


Die Herausforderungen für die Regelung dieses Systems sind das Umkehrspiel im Getriebe, die nichtlineare Reibungskurve, der grosse Bereich der Streckenparameter und das Messrauschen.

Das Resultat dieser Arbeit ist ein validiertes Modell des Systems, der Vorschlag einer Regelstruktur, getestet in Simulation und Praxis, sowie die Vorbereitungen und Spezifikation für die Implementierung.

Modellierung

Im Modell werden der Elektromotor elektrisch und mechanisch, das Getriebe als mechanisches Schwingungssystem mit Umkehrspiel, die unterschiedlichen Lasten und das Messrauschen des Hallsensors zur Winkelmessung berücksichtigt.



Die Abbildung 1 zeigt das Antriebssystem (Getriebe mit Schnecke) mit Reibung und Umkehrspiel, aus [1], sowie schematisch die berücksichtigten Elemente des Stellmechanismus.

Simulation

Aufgrund der analytischen Beschreibung des Systemverhaltens wird ein numerisches Simulationsmodell aufgebaut.

Mit demselben Simulationsmodell wurden zusätzlich Testdaten generiert, um im späteren Verlauf des Projektes die Implementierung auf dem Altera FPGA-Evaluationsboard zu verifizieren.

Validation

Das Modell wurde validiert, indem bei offenem Regelkreis der Verlauf des Eingangssignales vorgegeben und die Ausgänge aufgezeichnet wurden. Damit konnte einerseits das Modell strukturell angepasst werden (z.B. Art der Reibungskurve) und andererseits Parameter (z.B. Grösse des Umkehrspiels) identifiziert werden. So konnte das Modell in gute Übereinstimmung mit der Realität gebracht werden.

Untersuchung von Regelstrukturen in der Simulation

Für erste Versuche wurde ein Dreipunktregler implementiert. Die beiden Anschläge wurden nach dem Prinzip Trial & Error ermittelt und stimmen daher nur für einen begrenzten Bereich der Last. Mit diesem Regler besteht die Gefahr von Instabilitäten, was zu unerwünschten Schwingungen führt. Bei zu schwachem Regler wird der Regelfehler bei grosser Last zu gross. Aus diesen Gründen wird eine Verbesserung der Regelung gewünscht.

Für dieses Problem scheint eine Kaskadenregelung geeignet zu sein, denn die Verstärkungen für den Drehzahl- und Winkelloop können separat eingestellt werden, Störungen werden von innen nach aussen ausgegeregelt. Die Voraussetzung dafür ist, dass der innere Kreis genügend schneller läuft als der äussere, was mit dem vorliegenden System möglich ist aufgrund der Integration von Drehzahl zu Winkel.

Zusätzlich wird eine Vorsteuerung (Feedforward) eingebaut, um bereits auf Änderungen des Führungssignales zu reagieren, bevor ein Regelfehler entsteht. Die Vorsteuerung generiert kein zusätzliches Risiko für instabiles Verhalten aufgrund des offenen Wirkungskreises. Die Vorsteuerung lässt sich gut mit einer Regelung kombinieren, vgl. [3]: Combined Feedback and Feedforward. Die Regelung muss nur noch Fehler der Vorsteuerung und Störungen korrigieren.

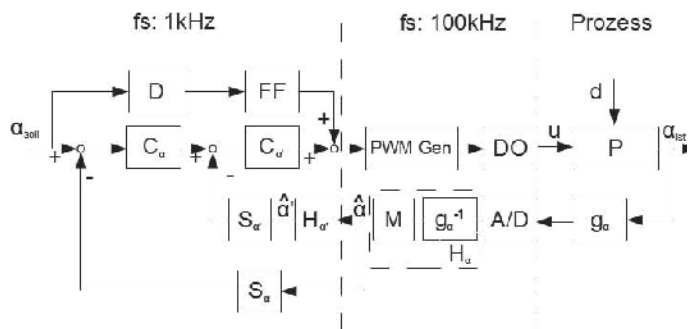


Abbildung 2: Regelstruktur, Kaskadenregelung (Winkel und Drehzahl) mit Vorsteuerung

Die Abbildung 2 zeigt die zur Implementierung auf dem FPGA vorgeschlagene Struktur zur Regelung des Stellwinkels. Die Abtastfrequenz ist um Faktor 100 höher als die Zyklusfrequenz des Reglers, damit mit der Filterung eine befriedigende Verkleinerung der Rauschleistung der Winkelmessung erreicht wird, ohne eine zusätzliche Phase im Regelkreis zu generieren.

Praktische Validation von Regelstrukturen

Die Regelstruktur wurde auf einem Single Board RIO von National Instruments implementiert, welches über einen echtzeitfähigen Prozessor und ein FPGA verfügt. Auf dem Prozessor wird der Regelalgorithmus abgearbeitet, im FPGA

wird das Sensorsignal eingelesen und vorverarbeitet, das PWM-Signal generiert und über einen digitalen Ausgang auf die H-Brücke gegeben. Durch die Möglichkeit, die Abtastung und Vorverarbeitung schneller abzuarbeiten als die Regelung, kann die Messung im schnelleren Loop gefiltert werden, ohne eine Phasenverschiebung für die langsamer laufende Regelung zu generieren. Die vorgeschlagene Regelung arbeitet bei grösserer Stabilitätsreserve ca. um den Faktor 10-mal genauer als der bisherige Regler.

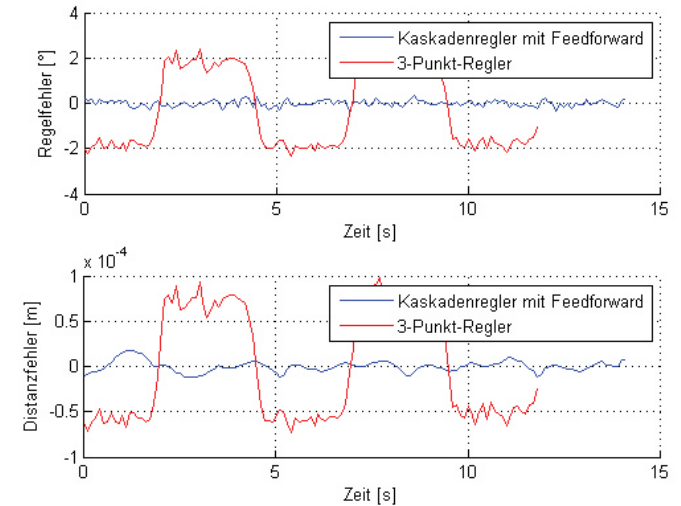


Abbildung 3: Vergleich des Regelfehlers, bisher: Dreipunktregler, Vorschlag: Kaskadenregler mit Feedforward

Spezifikation für Implementierung

Für die Implementierung des Reglers wurden die Struktur, Verstärkungen, Zykluszeiten und Auflösung von Input/Output angegeben. Zudem musste die Speisung dimensioniert werden. Diese wird so ausgelegt, dass die mittlere Leistung bei maximaler Belastung geliefert werden kann, die Leistungsspitzen werden von einem Energiespeicher gespeist, da zwischen diesen Spitzen genügend Zeit zum Aufladen des Speichers bleibt.

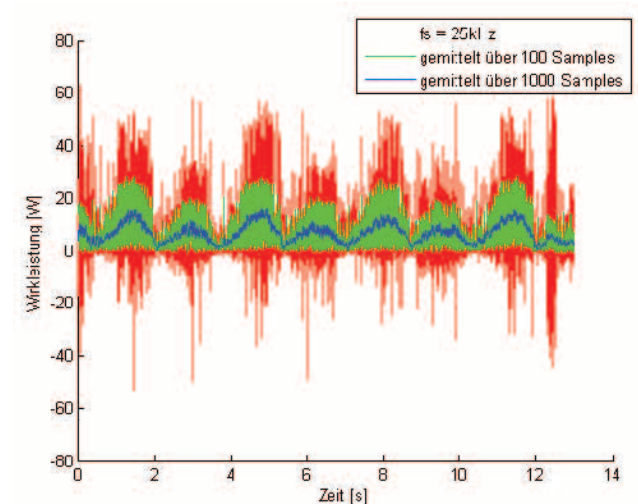


Abbildung 4: Leistung aus Spannungs- und Strommessung bei maximaler Last zur Dimensionierung der Speisung

Projektergebnis und weiteres Vorgehen

Das Dienstleistungsprojekt wurde während eines Jahres am Institut für Automation bearbeitet. Es erzielte folgende Resultate:

- Validiertes Modell des Systems
- Vorschlag einer erfolgreich getesteten Regelstruktur
- Spezifikation für Implementierung

Der vorgeschlagene Regler wird in einem FPGA-Evaluationsboard implementiert, damit anschliessend eine neue Platine entwickelt werden kann, welche Regler-HW, -SW und Leistungselektronik beinhaltet.

Projektteam

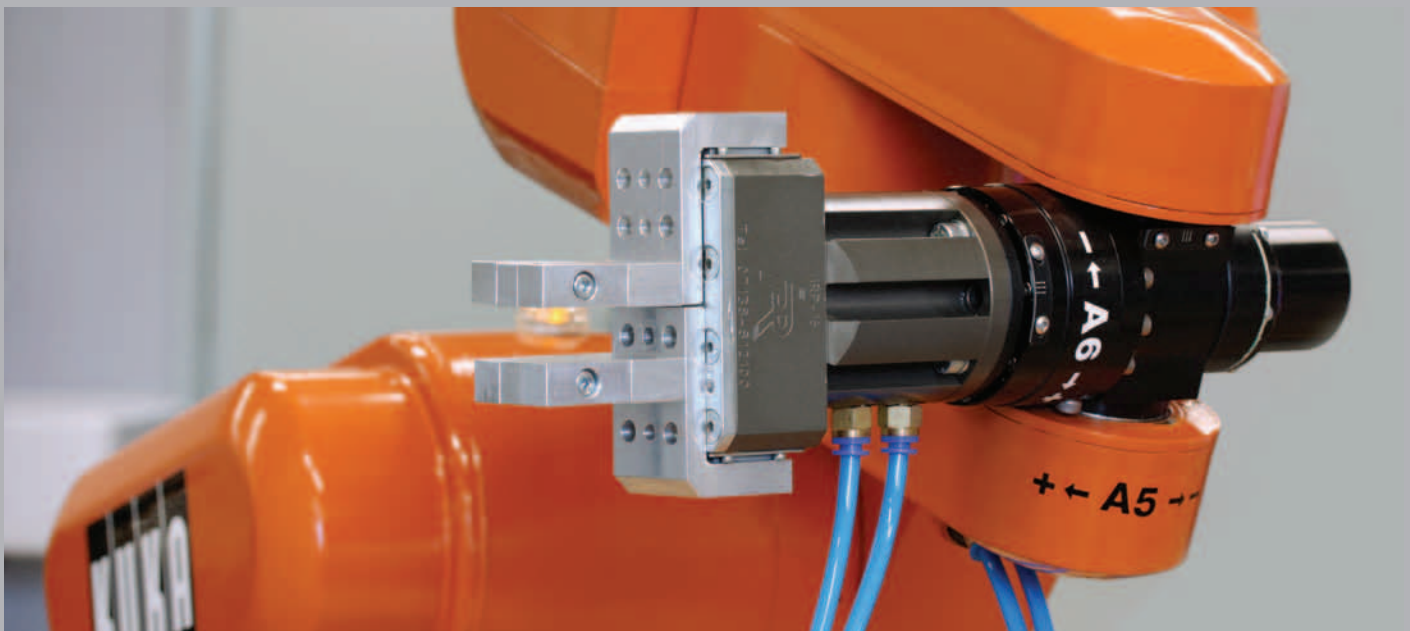
Prof. Karl Hauswirth, Leitung, karl.hauswirth@fhnw.ch
Sandro Wiedmer, MSc FHNW in Engineering, wissenschaftlicher Mitarbeiter, sandro.wiedmer@fhnw.ch
Dominik Wiss, BSc FHNW in Systemtechnik, Student Master of Science in Engineering (MSE), wissenschaftlicher Assistent, dominik.wiss@fhnw.ch

Literaturverzeichnis

- [1] H. Dresig; Schwingungen mechanischer Antriebssysteme: Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese; 2000
- [2] H. Lutz; Taschenbuch der Regelungstechnik; 2007
- [3] K. Aström; Feedforward Design; 2001
- [4] D. Wiss; Bachelor Thesis; Windisch; 2013

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: Montag, 20. April 2015

„Mit dem komplexen betrieblichen Umfeld und dem hohen Kosten- und Termindruck wird die Leitung von Automationsprojekten zu einer anspruchsvollen Managementaufgabe. Die modulare und praxisnahe Weiterbildung MAS in Automation Management vermittelt Ihnen die notwendigen Kernkompetenzen, damit Sie den heutigen und künftigen Herausforderungen in einem globalen Umfeld gewachsen sind.“

Prof. Dr. Jürg Peter Keller, Studiengangleiter MAS Automation Management

„Das breite Leistungsangebot des Studiengangs MAS Automation Management verschaffte mir einen fundierten Überblick aller wichtigen Technologie- und Management-Disziplinen der Automationstechnik. Speziell geschätzt habe ich den modularen Aufbau des Lehrganges und die Zusammenarbeit mit den verschiedenen Schweizer Fachhochschulen.“

Remo Ingold, Geschäftsführer b+i automation ag

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.

MAS Business Engineering Management

Der Master of Advanced Studies (MAS) Business Engineering Management richtet sich an Projektleiterinnen und -leiter und Führungskräfte, welche eine technische Grundausbildung haben und sich betriebswirtschaftlich weiterbilden wollen, um ihre Karriere aktiv zu fördern. Der modular aufgebaute MAS besteht aus drei Certificates of Advanced Studies (CAS), welche auch einzeln besucht werden können.

Neu: CAS Unternehmensnachfolge

Der Studiengang richtet sich sowohl an Personen, welche konkret planen, in eine Unternehmensnachfolge einzutreten oder in ihrer Lebensplanung eine Selbstständigkeit durch eine Unternehmensnachfolge in Betracht ziehen, als auch an all jene, die seit kurzem Nachfolgeunternehmerin oder -unternehmer sind.

Neu: CAS Leadership Technik

Das CAS Leadership Technik richtet sich an Personen mit Führungsaufgaben im technischen Umfeld, sei es in der Funktion als Projektleitende oder als direkte Vorgesetzte in Linienführung. Sie erhalten wertvolle Tipps von erfahrenen Führungspersonen aus technischen Betrieben und reflektieren ihr Führungsverhalten.

Neu: CAS Projektmanagement

Diese Weiterbildung richtet sich an angehende Projektleitende und Kadermitarbeitende, welche ihre Kenntnisse und Methodik im Projektmanagement, in der Gestaltung komplexer Unternehmenssysteme und in der erfolgreichen Führung von Projektteams vertiefen und ergänzen wollen.

Unser Weiterbildungsangebot umfasst auch die Fachgebiete

- Digitales Bauen
- Elektronik
- Einkauf/Beschaffung
- Giessereitechnik
- Informatik
- Kunststofftechnik
- Logistik
- Optometrie

Infoabende

- 23. Juni und 27. August 2014: Windisch (Klosterzelgstrasse 2, Gebäude 1, Audimax)
 - 3. November 2014: Basel (Peter Merian-Strasse 86)
- 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

Mikrogravitationssimulation: Im Spannungsfeld zwischen wissenschaftlicher Anwendung und als spielerischer Eye-Catcher an Ausstellungen

Initiiert durch eine enge Zusammenarbeit mit in- und ausländischen Projektpartnern, wurden am Institut für Automation seit 2009 verschiedene Schwerelosigkeitssimulatoren entwickelt. Mit unseren, im Vergleich zu kommerziellen RPM (Random-Positioning-Machines) verbesserten mechatronischen Konzepten, erbrachten zu Beginn zwei Diplomarbeiten den Machbarkeits-Nachweis der an uns herangetragenen Entwicklung. Diese Resultate ermöglichten die Realisation zweier grösserer, professioneller Varianten (Maxi-RPM) mit weltweit erstmaliger Integration eines CO₂-Inkubators als Nutzlast. Die parallele Entwicklung einer wesentlich verkleinerten Variante erlaubte zudem eine Funktionsdemonstration solcher Taumelapparaturen sowie einen Spielbetrieb als Eye-Catcher an Industrieausstellungen und Bildungsmessen.

Jörg Sekler

Schwerelosigkeitssimulation auf der Erde

Die Durchführung von Experimenten im Weltraum ist enorm kostspielig sowie ressourcen- und energieintensiv, dazu kommt eine aufwendige Vorbereitung und Durchführung. Daher äusserten die Forscher schon früh den Wunsch nach einer günstigeren Simulationsmethode in irdischen Labors. Unter Verwendung bekannter Verfahren, wie z.B. den Parabelflügen oder den Höhenforschungsraketen, können zwar reale Schwerelosigkeitsexperimente von einigen Sekunden bis wenige Minuten Dauer durchgeführt werden. Diese Expositionsdauer ist jedoch für viele wissenschaftliche Experimente zu kurz und das Kosten-Aufwandverhältnis eher unbefriedigend. Somit können nur wenige, gut selektierte Experimente im Weltraum durchgeführt werden, was die statistische Aussagekraft wesentlich schmälert.

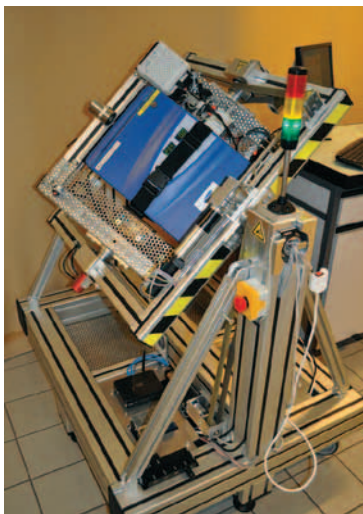


Abb. 1: Maxi-RPM Prototyp (Photo: S. Wüest)

Mit Hilfe von Schwerelosigkeitssimulatoren ist es nun möglich, Proben (zumindest biologische Zellkulturen, welche sich in speziellen Behältnissen befinden) über Stunden bis Wochen simulierter Schwerelosigkeit, vergleichbar den Bedingungen auf der Internationalen Raumstation ISS, auch auf der Erde auszusetzen. Diese simulierte Schwerelosigkeit wird dank einer be-

reits länger erprobten mechatronischen Konstruktion erreicht, bei welcher zwei kardanisches aufgehängte Rahmen unabhängig voneinander nach einem sehr speziellen Bewegungsmuster rotieren. Dabei werden die Proben in der Mitte des inneren Drehrahmens so platziert, dass die Erdanziehung aus jeder beliebigen Orientierung nach einem Zufallsprinzip auf diese einwirkt. Die Rotationsgeschwindigkeit ist vom Material der biologischen Probe abhängig und liegt in der Grössenordnung von typischerweise 60 Grad pro Sekunde. Um einerseits eine Gewöhnung der Zellen an die Erdgravitation zu vermeiden und trotzdem die Erzeugung von störenden Zentrifugalkräften zu verhindern, ist es wichtig, dass die Orientierung mit optimal geregelter Rotationsgeschwindigkeit erfolgt [1].

Integration eines Mini-Inkubators

Mittels eines speziell adaptierten und – als Weltneuheit – in den Schwerelosigkeitssimulator integrierten Mini-Inkubators, welcher sowohl mit einer sehr präzisen Temperaturregelung ausgestattet wie auch von extern mit Nährgasen angereichert werden kann, kommt unsere grosse RPM-Apparatur (Abb. 1) vorwiegend in der biologisch-medizinischen Grundlagenforschung zur Anwendung.

Durch zusätzlich eingebaute Funktionalitäten können Bedingungen, ähnlich jenen auf der ISS, von besser als 10^{-2} g erreicht werden. Damit können Altersgebrechen (wie beispielsweise Muskel- und Knochenschwund) mit alternativen Methoden erforscht und dazu wirksame Heilmittel entwickelt werden. Dank dem modernen Tissue-Engineering-Verfahren können zukünftig unter dem Schwerelosigkeitseinfluss auch verbesserte Gewebe- und Knochensubstanzen gezüchtet werden. Erstaunlicherweise sind nämlich nicht nur ältere Personen einer Muskelatrophie oder Osteoporose – als

noch nicht vollständig verstandene medizinische Phänomene – unterworfen, sondern auch sportlich fitte Astronauten nach einem Langzeitaufenthalt im Weltraum. Weltweit völlig neu ermöglicht unser Gerät die Erzeugung der simulierten partiellen Gravitation. Erste Resultate dazu werden in wissenschaftlichen Fachzeitschriften publiziert [2].

Taumelapparat als Ausstellungsobjekt

In einer 2013 abgeschlossenen Bachelor-Thesis eines FHNW-Studierenden des Studiengangs Systemtechnik wurden verschiedene Funktionen unserer Mini-Taumelapparat weiterentwickelt. Zur spielerischen Demonstration an Ausstellungen ist diese kleinere Version in erster Linie für Geschicklichkeitswettbewerbe und als Eye-Catcher zu Werbezwecken für die gezeigten Produkte vorgesehen. Mittels eines Joysticks sollen neugierige Besucher eine von Kleinmotoren der Firma MAXON angetriebene Plattform so feinfühlig bewegen, dass eine Kugel fehlerfrei durch ein Labyrinth manövriert wird. Dabei muss der Spieler darauf achten, dass die Kugel in keines der Löcher auf dem Hindernisparcours fällt. Eine industrietaugliche Kamera der Firma STEMMER erlaubt die Erfassung des Geschehens auf dem Spielfeld (siehe Video auf: www.fhnw.ch/technik/bachelor/systemtechnik/studium/studierendenprojekte/bachelor-thesis-2013/).

Diese auch Mini-RPM (Abb. 2) genannte Taumelapparat wurde ursprünglich als kleinere Variante zur Veranschaulichung der Funktionsweise der ausschliesslich für professionelle Forschungszwecke an der FHNW entwickelten Midi- bzw. Maxi-Versionen entwickelt. Der Verlauf der komplizierten Drehbewegungen zur Erzeugung einer künstlichen Schwerelosigkeit kann auf der vorliegenden Mini-RPM mithilfe eines ausgeklügelten LABVIEW-Steuerprogramms ebenso wie auf unseren grossen professionellen Apparaturen simuliert werden [3].

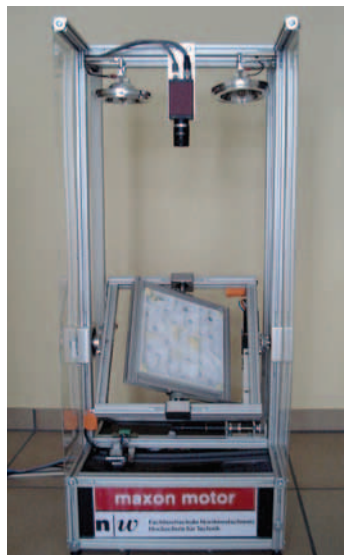


Abb. 2: Mini-RPM (Photo: Ph. Rindisbacher)

Selbstverständlich erzielt diese Mini-Apparatur nicht den Funktionsumfang der Maxi-Variante, jedoch wird dem Kunden (bzw. den Messebesuchern) durch spezielle Demonstrationsmodi das Funktionsprinzip auf eindruckliche Weise erläutert. Für eine werbewirksame Teilnahme an Produktmessen wurde in der Berichtsperiode mit dem erwähnten Hersteller von Antriebslösungen die Weiterentwicklung einer eigenen Mini-Taumelapparat vereinbart. Weitere Ausbauschritte sind ebenfalls bereits in Planung.

Fazit und Ausblick auf weitere Entwicklungsschritte

Mit unserer Miniaturversion kann die Funktionsweise von bereits im Einsatz stehenden, wesentlich grösseren und leistungsfähigeren Schwerelosigkeitssimulatoren für professionelle Mikrogravitationsexperimente (beispielsweise mit biologischen Zellkulturen) besser veranschaulicht werden. Zudem

bietet ein optionales Labyrinthspiel auch die Möglichkeit einer Vorführung an Ausstellungen, wo die Geschicklichkeit der Messebesucher herausgefordert und damit deren Aufmerksamkeit auf die beworbenen Produkte gelenkt werden soll.

Mittels dieser Apparatur wurden in den Jahren 2012/13 auch erste Abklärungen für eine geplante Masterarbeit im MSE-Studiengang angestellt. Darin soll das Verhalten von Mikropartikeln/-organismen (wie z.B. von Algen zur Biomasseproduktion) unter Schwerelosigkeitsbedingungen wissenschaftlich untersucht werden. Vielversprechend sind die ersten Resultate dieser Studie eines MSE-Studierenden zu einer Sedimentationsanalyse (Abb. 3), welche im nächsten Jahresbericht des Instituts für Automation FHNW veröffentlicht werden soll.

Aktuell wird vom MSE-Studierenden der experimentelle Versuchsaufbau auf der Mini-RPM für eine funktionell erweiterte Testeinrichtung auf eine mittlere Geräteversion (Midi-RPM) portiert. Zusammen mit einer Modellierung der Partikelsedimentation verspricht man sich dank verbesserten Auswertmöglichkeiten erweiterte Erkenntnisse über das Sedimentationsverhalten. Man vermutet, dass das Wachstum von Mikroorganismen stark durch eine (partielle) Gravitation beeinflusst werden kann, womit der Zugang zu weiteren interessanten Forschungsapplikationen eröffnet wird. Dadurch erhofft man sich die Erschliessung neuer Marktnischen.

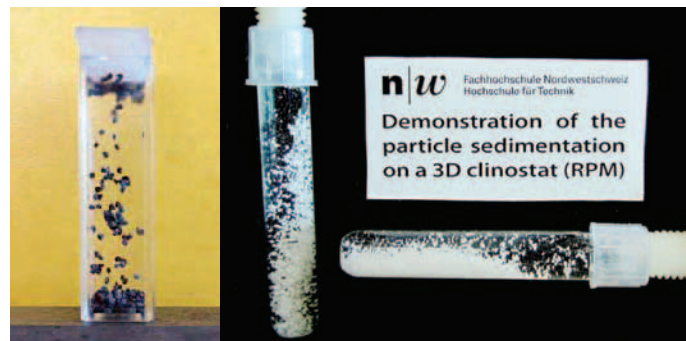


Abb. 3: Sedimentierende Partikel (Photo: R. Glünkin)

Projektteam

Prof. Jörg Sekler, Leitung, joerg.sekler@fhnw.ch
 Philipp Rindisbacher, BSc FHNW in Systemtechnik,
 Raphael Glünkin, BSc FHNW in Mechatronik Trinationale,
 Student Master of Science in Engineering (MSE),
 Simon Wüest, BSc FHNW in Systemtechnik, MSc in Biomedical Engineering, Doktorand Universität Bern/Hochschule Luzern

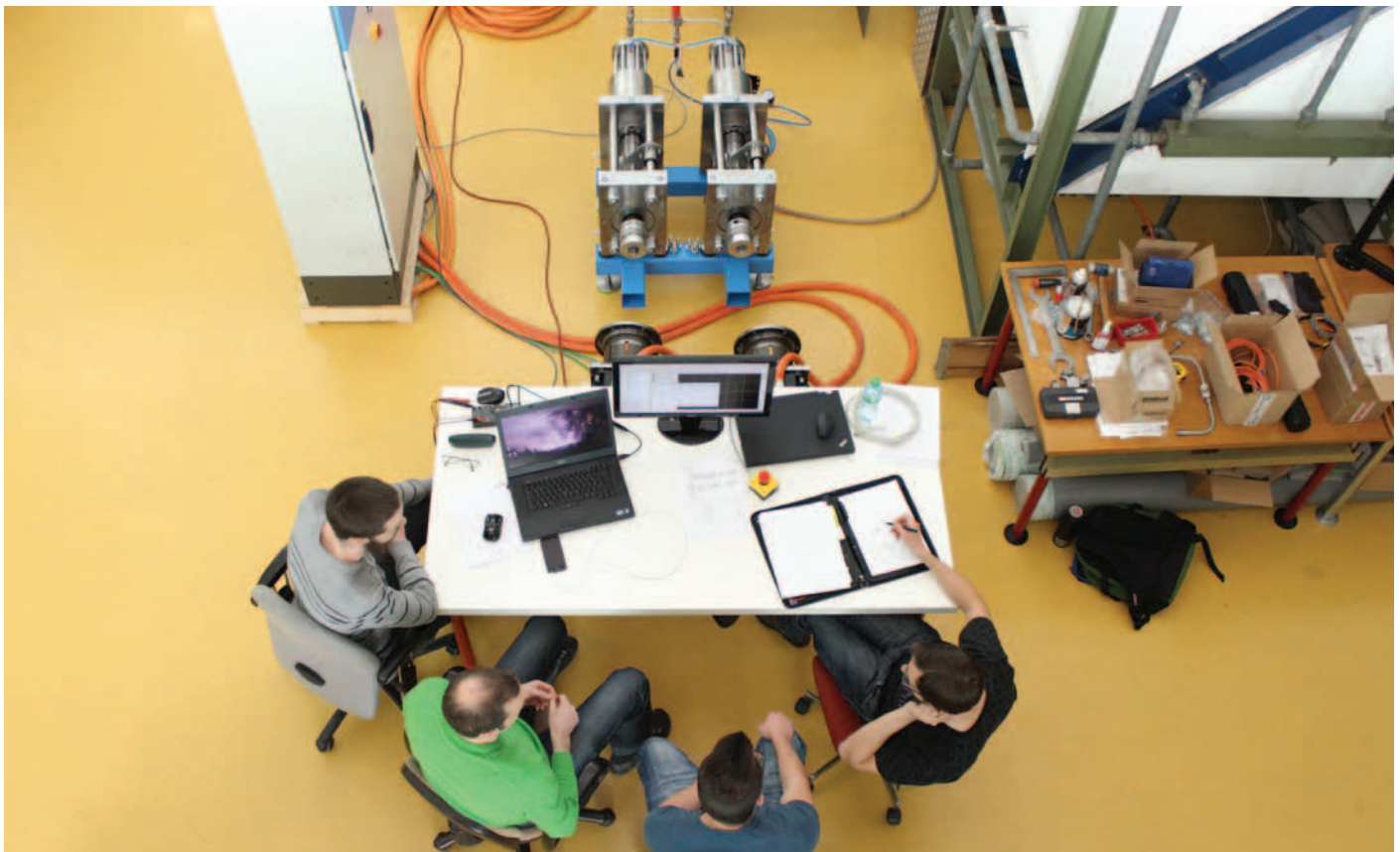
Literaturverzeichnis

- [1] "Den Weltraum auf die Erde holen", S. Wüest, J. Sekler, Hochschule für Technik FHNW (in SWISS-ENGINEERING STZ – AUTOMATE.NOW, Ausgabe August 2012)
- [2] "Cell Cultivation Under Different Gravitational Loads", T. Benavides Damm, I. Walther, S. Wüest, J. Sekler, M. Egli (in JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY & BIOENGINEERING, Wiley Verlag Dezember 2013, in print)
- [3] "Weiterentwicklung einer miniaturisierten Taumelapparat", Ph. Rindisbacher (Bachelor Thesis SG Systemtechnik, FHNW 2013)

Hochdruckwasserstrahlschneiden

Im Rahmen eines Industrieprojektes, das von der KTI unterstützt wird, hat das Institut für Automation die Forschungsaufgabe, einen Elektro-Direktantrieb eines Wasserstrahlschneidaggregates zu konzipieren und zu validieren. Dabei wurde in einer ersten Phase ein theoretisches Modell der Verhaltensweise von Wasserstrahlschneidaggregaten entwickelt, um in einer zweiten Phase mit dem gefundenen Modell das neue Elektroantriebskonzept umzusetzen. In diesem Bericht werden einige gewonnene (und zur Veröffentlichung freigegebene) Erkenntnisse wiedergegeben.

Lukas Kurmann, Stefan Niederberger



Wasserstrahlschneidaggregate werden heute in vielen Industriezweigen eingesetzt, dabei werden sie 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, welche einen Ausgangswasserdruck zwischen 3'000 - 4'000 bar erzeugt. Der 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 numerischen Werkzeugen wurde ein Modell des bestehenden Wasserstrahl-

hochdruckaggregats 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 Projektes 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 (Abbildung 1) ersetzt werden – die bisher verwendeten Medien Öl und Luft fallen komplett weg, nur noch die Medien Wasser und Elektrizität bleiben erhalten.

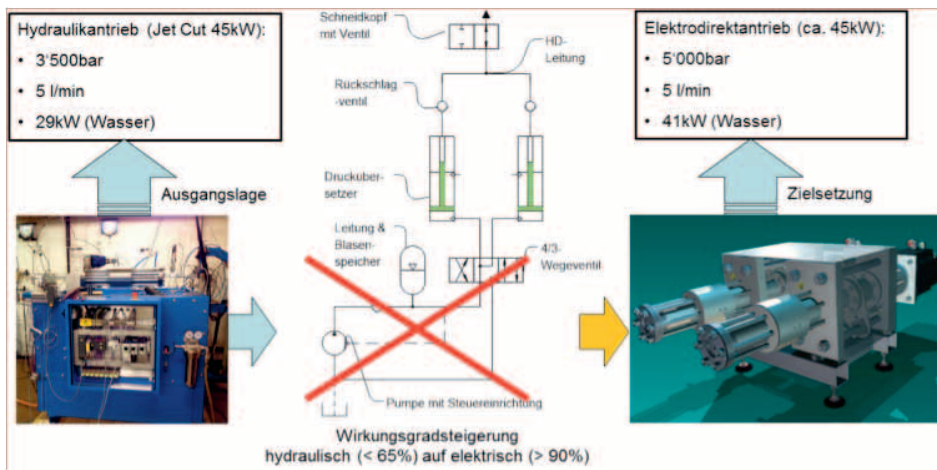


Abbildung 1: Hochdruckwasserstrahlschneidaggregat mit Hydraulikantrieb (links), welches durch einen Elektroantrieb ersetzt werden soll (rechts)

Die zwei Druckübersetzer (Abbildungen 1 und 2) sind die zentralen Elemente einer Hochdruckpumpe. Bisher erzeugt eine Axialkolbenpumpe einen Hydraulikdruck, welcher über die beiden Druckübersetzer eine Wassersäule auf den gewünschten Druck verdichtet (bis maximal 4000 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.

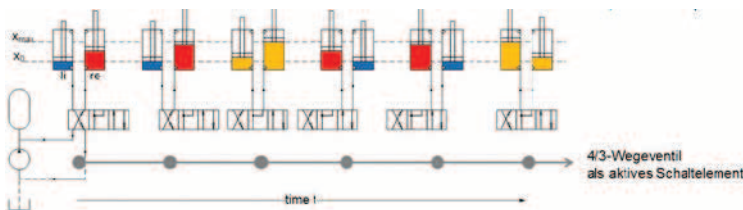


Abbildung 2: Funktionsprinzip der bestehenden Anlage

Modellierung und Validation

Mit Hilfe einer bestehenden Pumpen-Anlage konnte das numerische Modell (Abbildung 3) validiert werden. Die nicht-linearen 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.

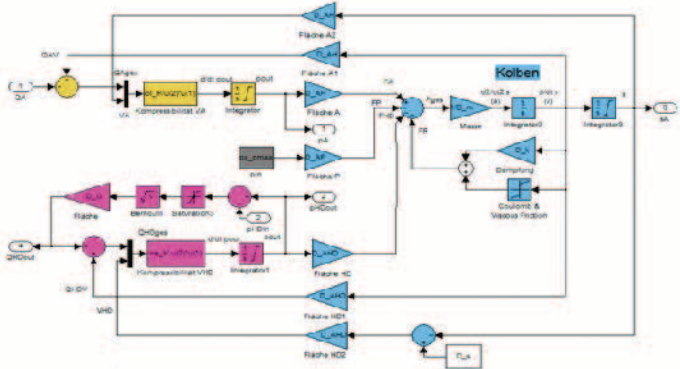


Abbildung 3: Auszug aus dem numerischen Modell

Anhand Herstellerangaben und in 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 gefahren.

Die Auswertung zeigt (Abbildung 4), dass die gemessene Dynamik (das Einschwingverhalten des erzeugten Hochdrucks), von der Trägheit der Hydraulikpumpe abhängt. Beim Schaltvorgang 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.

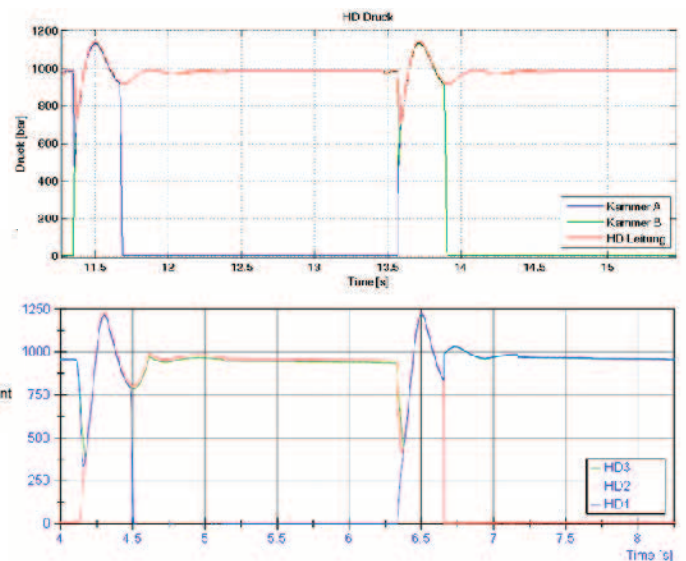


Abbildung 4: Vergleich von Simulation (oben) und Messung (unten) des Hochdrucksystems

Prozess der Hochdruckerzeugung

Um den Prozess der Druckerzeugung mit zwei phasenverschobenen Plungern zu verstehen, sind an dieser Stelle drei Betriebszustände einzuführen. Jeder der Plunger befindet sich stets in einem dieser Zustände. Die Betriebsfälle fordern eine unterschiedliche Dynamik des Antriebsstranges (siehe dazu auch Abbildung 5):

- 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.

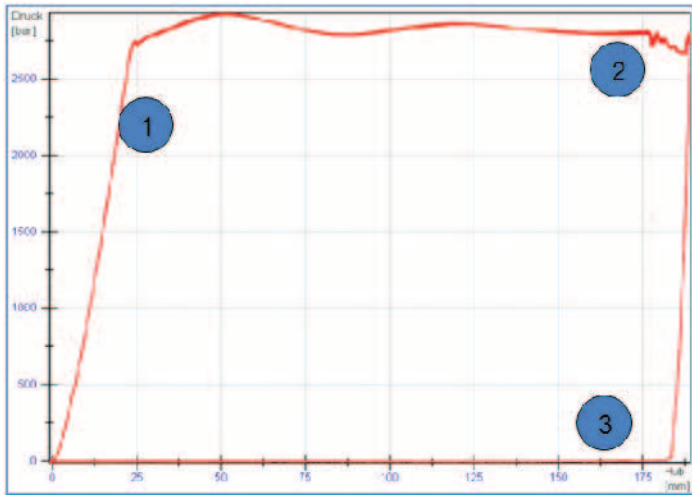


Abbildung 5: Druckaufbau (1), Förderphase (2) und Zurückfahren (3)

Gewähltes Lösungskonzept mit Elektroantrieb

Die Pumpe besteht aus zwei unabhängigen, identischen Pumpeneinheiten. Eine solche Einheit besteht je aus einem Servomotor mit Servo-Drive, der über eine Lineareinheit einen Plunger bewegt. Der Plunger ist die Schnittstelle zwischen Aktuator und Umgebung. Die beiden Einheiten sind mit Rückschlagventilen (über die Umgebung) passiv gekoppelt.

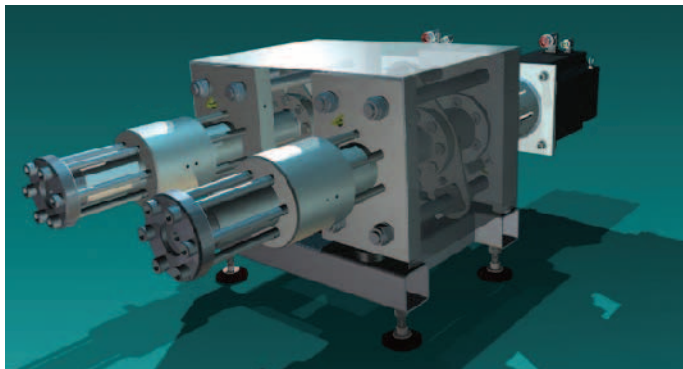


Abbildung 6: Bild aus der CAD Animation der Hochdruckpumpe (Semestearbeit HS13, Beck und Oegerli) mit Hochdruck-Nassteil (vorne) und Elektromotoren (hinten)

Abbildung 6 zeigt ein Bild aus der CAD Animation der Hochdruckpumpe. Diese enthält folgende Kernkomponenten:

1. Synchron Servomotoren mit Servo-Drives
2. Lineareinheit mit Spindel, Mutter und der Linearführung zur Verdrehssicherung
3. Hochdrucknassteil der Firma Jet Cut Power GmbH

Für die Gesamtkonstruktion wurde eine Studierendenarbeit durchgeführt (zwei Bachelorstudierende im Studiengang Systemtechnik). Zur Arbeit gehört unter anderem die Definition der Spindelenden (Lagerzapfen) und deren Lagerung, sowie die Kraftführung an der Mutter und das Anflanschen von Hochdruckzylinder und Servomotor.

Um die grosse axiale Last (Grösser 50kN) zu tragen und die geforderte Lebensdauer des Systems (>8000h) garantieren zu können, wurde eine massive Spindel mit 80mm Durchmesser dimensioniert. Dabei wurde die Steigung der Spindel so gewählt, dass die Übersetzung der Linearbewegung in eine Rotationsbewegung in einem annähernd idealen Arbeitsbereich des Servomotors fällt.

Das Regelungskonzept wurde als Projektarbeit eines Masterstudierenden erarbeitet. Dabei wurde auch untersucht, inwiefern sich ein Antriebsstrang mit (1:2) und ohne (1:1) Getriebe verhält. Die Abbildung 7 zeigt das simulierte Motorenmoment und den Drehzahlverlauf.

Ergebnisse, Stand der Arbeiten und weiteres Vorgehen – Ausblick

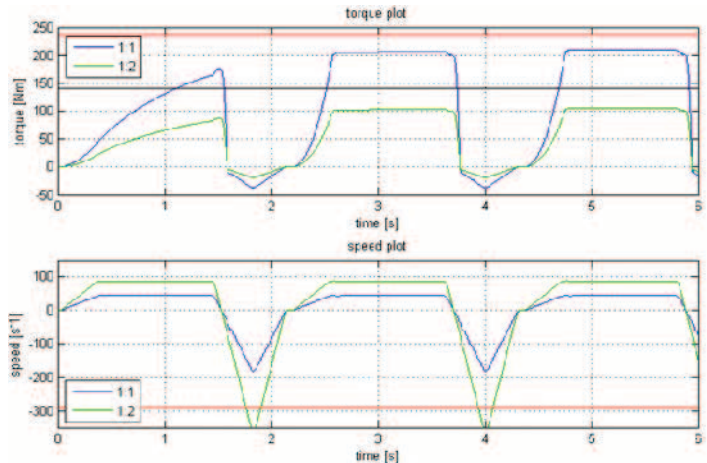


Abbildung 7: Simuliertes Motorenmoment und Drehzahl mit (grün) und ohne Getriebe (blau)

Neben den diskutierten theoretischen Resultaten und den gemachten Validationen wurden ausführliche Evaluationen zum Elektroantrieb gemacht. Dabei wurde der Elektroantrieb mit einem qualitativen Modell beschrieben. Mit diesem wurden die dynamischen Prozesse bei der Druckerzeugung mit Druckübersetzern dargestellt. So konnte das Modell anhand Messungen im Pumpenlabor der Firma Jet Cut Power validiert werden. Mit diesem validierten Modell konnten die Anforderungen an die Antriebs- und Regelungstechnik formuliert werden und so ein geeigneter Elektroantrieb evaluiert werden.

Zurzeit wird die Pumpeneinheit an der FHNW aufgebaut, um die gemachten Simulationen zu verifizieren und diese neue Technologie als Funktionsmuster unseren Industriepartnern übergeben zu können. Abbildung 8 zeigt den jetzigen Stand (anfangs März 2014) der gemachten Arbeiten.

Gemäss Zeitplan dieses KTI-Projektes wurden nun der Aufbau des Prototyps und die Inbetriebnahme der Servomotoren in Angriff genommen. Sobald der Antrieb in Betrieb ist, lassen sich Versuche zum Validieren des neuen Simulationsmodells starten. Es wird wieder eine Studierendenarbeit ausgeschrieben. Dabei geht es um die Planung und Programmierung des eigentlichen Steuerungskonzeptes auf der SPS, dabei wird es auch möglich sein, den übergeordneten Regelalgorithmus in die SPS zu implementieren. Sobald der Prototyp wie geplant läuft, werden Funktionstests und Leistungsmessungen durchgeführt.

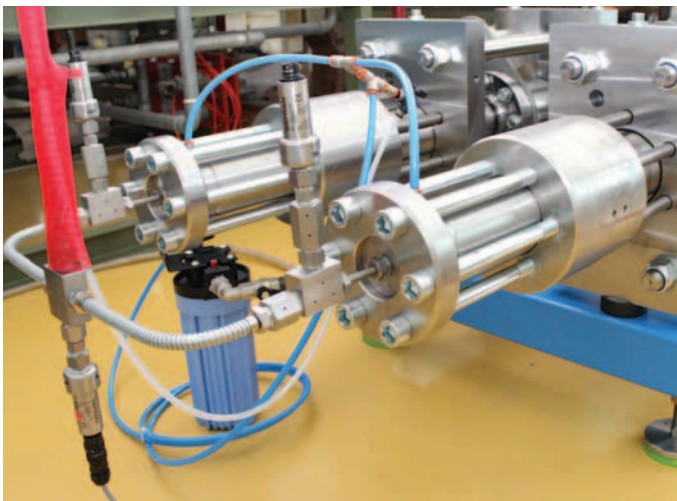
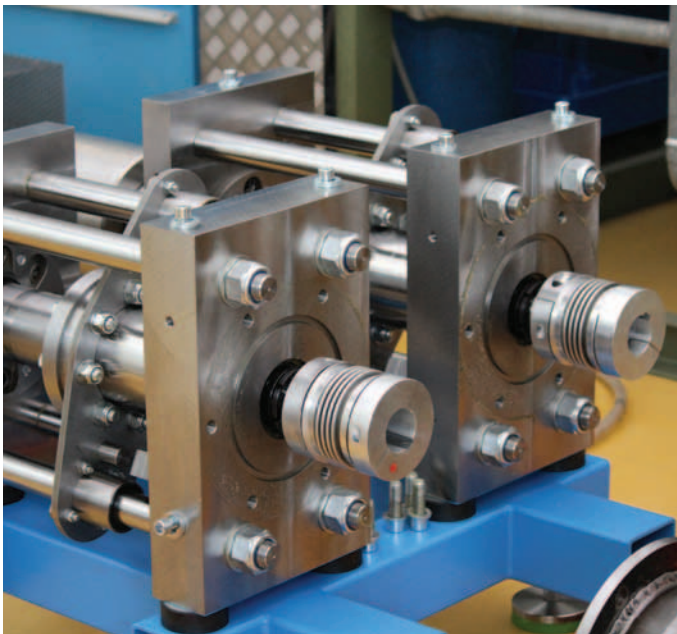
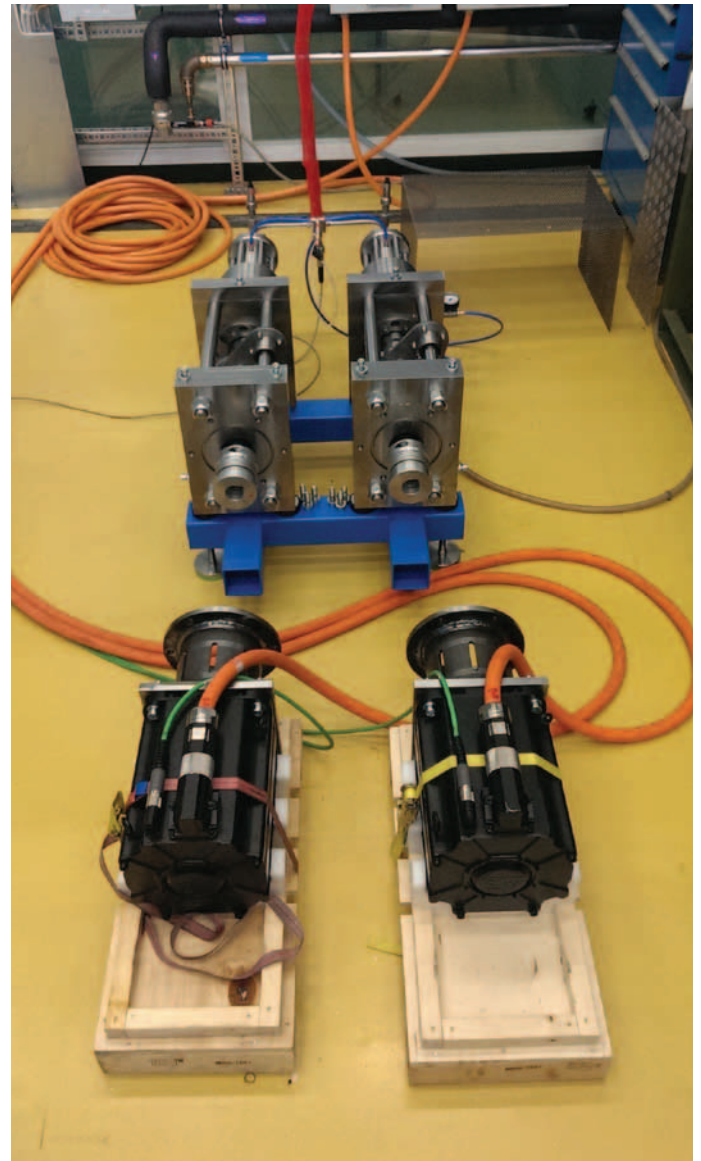


Abbildung 8: Stand der mechanischen Arbeiten

Das Projektteam dankt den Industriepartnern Jet Cut Power GmbH, Zaugg Maschinenfabrik AG und Saphirwerk Industrieprodukte AG sowie allen weiteren involvierten Firmen für die gute und effiziente Zusammenarbeit.

Projektteam

Lukas Kurmann, Dipl. El. Ing., wissenschaftlicher Mitarbeiter, lukas.kurmann@fhnw.ch



Stefan Niederberger, BSc FHNW in Systems Engineering, Student Master of Science in Engineering (MSE), wissenschaftlicher Assistent, stefan.niederberger@fhnw.ch
Studierende im Bachelor-Studiengang Systemtechnik:
Ismael Beck, ismael.beck@students.fhnw.ch;
und Kevin Oegerli, kevin.oegerli@students.fhnw.ch

Bodenverdichter

Für die Verdichtungstechnik herkömmlicher dynamischer Bodenverdichter kann mit Hilfe optimal ausgelegter oder geregelter Maschinen ein Maximum der erzeugten Energie der Maschine in den Boden eingeleitet werden. In der Praxis wird damit der Leistungstransfer zwischen Maschine und Boden um einen Faktor 2 bis 4 erhöht. Der folgende Bericht beschreibt die wesentlichen Ergebnisse aus dem zugehörigen abgeschlossenen KTI-Projekt.

Roland Anderegg, Lukas Recher



Im Rahmen des Projektes wurde der Nachweis geführt, dass unter Verwendung einer Zusatzmasse eine wesentlich höhere Verdichtungsenergie von einer Maschine auf die zu verdichtende Unterlage übertragen werden kann, als dies mit herkömmlicher Technik möglich ist. Bei dieser Technologie wird die zusätzliche Tilgermasse an die Dynamik des schwingenden Walzenrades angekoppelt.

Ansatz der Maximierung des Energietransfers zwischen Maschine und Boden

Mittels der Parameteroptimierung ermöglicht die entstehende nichtlineare Dynamik einen maximalen Energietransfer zwischen Maschine und Boden. Dies bedeutet in der Praxis, dass eine 500 kg schwere Vibrationsplatte dieselbe Verdichtungswirkung hat wie ein 11 t schwerer Walzenzug (Messung siehe Abbildung 3). Die Leistungssteigerung gegenüber herkömmlichen Verdichtungsgeräten beträgt das 5-7 fache.

In der Praxis werden dadurch massiv leistungsfähigere und ressourcenschonendere Verdichtungsgeräte Einzug halten. So verbraucht ein Verdichtungsgerät eine zu seiner Masse proportionale Treibstoffmenge. Das heisst, dass der Verbrauch einer 2 t schweren Walze nach dem neu entwickelten Verdichtungsverfahren nur 20 – 30 % der Treibstoffmenge eines 11 t schweren, nach dem herkömmlichen Prinzip arbeitenden Walzenzugs beträgt! Die praktischen Versuchsergebnisse wurden durch eine numerische Simulation der Regelstrecke eines dynamischen Bodenverdichters vorhergesagt. Diese Simulation weist die erforderlichen Resonanzzustände des schwingenden Systems „Maschine-Boden“ nach. Diese Simulationsergebnisse stehen im Einklang mit den theoretischen Betrachtungen der Regelstrecke.

Die praktische Validation der theoretischen Ergebnisse im Feld wurde mit Hilfe eines Systems, bestehend aus Verdichtungsgerät und Messtechnik, durchgeführt, welches sämtliche relevan-

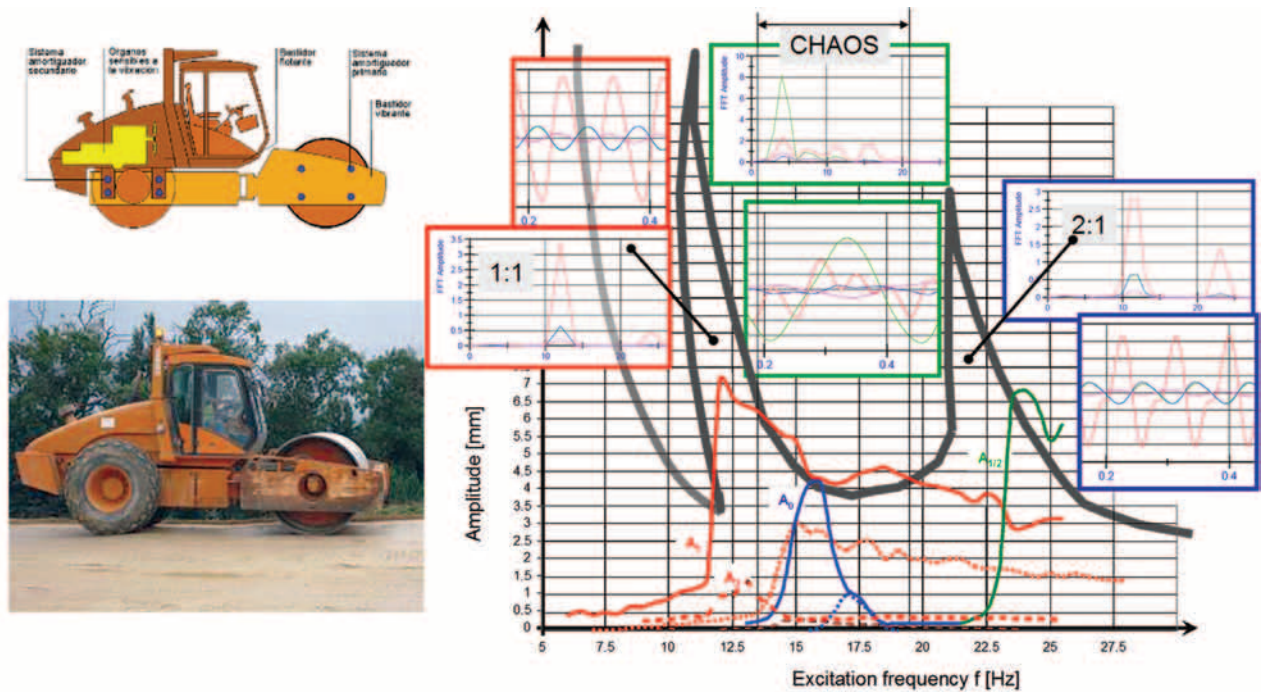


Abbildung 1: Gemessene Schwingungsdynamik eines schweren Walzenzugs mit nichtlinearem Schwingungstilger

ten Grössen in situ messen kann. Die Messergebnisse wurden anschliessend ausgewertet, alle Freiheitsgrade der Maschine (Oberwagen, Unterwagen, rotierende Unwucht, d. h. Phasenwinkel zwischen Erregung und Schwingungsantwort) konnten erfasst werden. Parallel dazu wurden die in den Boden transmittierten Beschleunigungskräfte gemessen. Damit ist das Schwingungssystem vollständig erfasst und ausgemessen, alle Freiheitsgrade des Simulationsmodells konnten in der Praxis gemessen werden. Die Signale wurden sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich ausgewertet. Die Abbildung 2 zeigt den praktischen Messaufbau für den Nachweis der theoretischen Analyse.

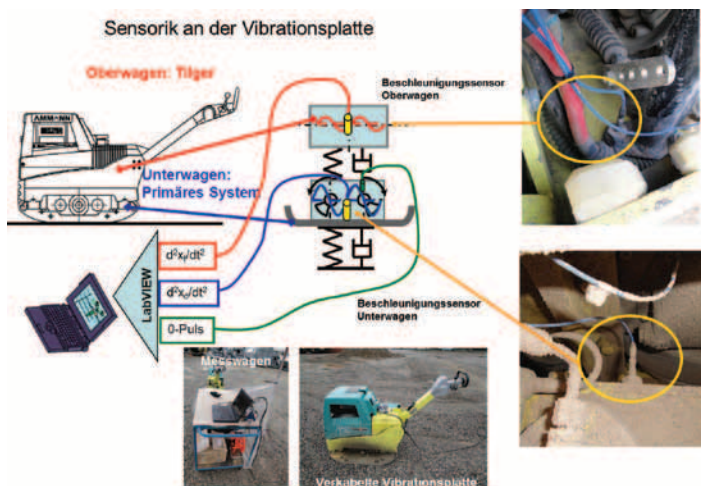


Abbildung 2: Messtechnik basierend auf LabVIEW, zum Nachweis der Effizienz nichtlinearer Schwingungen

In der Praxis konnte am Beispiel eines Vibrationswalzenzugs mit 15 t Einsatzgewicht nachgewiesen werden, dass das Walzenrad gemeinsam mit einer zusätzlichen, nichtlinearen Tilgermasse zwei verschiedene Schwingungszustände besitzt. Diese Zustände sind zum einen von der Erregerfrequenz der Maschine abhängig, zum anderen von den Eigenschaften des Verdichtungsgutes. Grundsätzlich stehen die Schwingungsfrequenzen des Erregers und der Zusatzmasse im Verhältnis 1:1 (1:1 Resonanz) oder aber im Verhältnis 2:1 (2:1 Resonanz). Im

letzteren Fall spricht man von subharmonischer Resonanz der Zusatzmasse: diese schwingt mit der halben Erregerfrequenz.

Die Messergebnisse im Einzelnen:

1:1-Resonanz: bei 12.5 Hz tritt eine stabile Maximalamplitude von 7 mm auf, im Vergleich zu 2-2.5 mm Amplituden herkömmlich arbeitender Walzenzüge.

2:1-Resonanz: bei Frequenzen > 22.5 Hz treten eine harmonische Schwingung und eine zusätzliche subharmonische Schwingung gleichzeitig und stabil auf. Die harmonische Amplitude erreicht Maxima von rund 3 mm, die subharmonische, welche sich der harmonischen überlagert, weist eine Amplitude von 6.5 mm auf, zusammen treten also Schwingwegmaxima von bis zu 10 mm auf!

In Kombination mit den Bodenmessungen wurde weiter verifiziert, dass die gewählte Konfiguration von Maschine, Tilgermasse und verdichtetem Boden in der Lage ist, eine Verdichtungsdynamik im Untergrund zu erzeugen, welche sonst nur von wesentlich grösseren und schwereren Maschinen erzeugt wird. Insbesondere die effektive Schwingungsamplitude von bis zu 10 mm bei einer Anregung (theoretische Amplitude) von rund 2.5 mm zeigt exemplarisch die Leistungsfähigkeit der Methode auf.

Die theoretische Grundlage der genutzten nichtlinearen Dynamik nennt man autparametrische Resonanz. Dabei mutiert eine lineare Zusatzmasse zu einem parametererregten Freiheitsgrad. Diese Mutation wird ermöglicht, indem die Zusatzmasse, bzw. der Tilger an ein nichtlineares Schwingungssystem angekoppelt wird. Die Kopplung steht dabei im Zentrum der Untersuchungen.

In Abbildung 3 wurde die Bodendynamik einer Vibrationsplatte mit Zusatztilgermasse mit der Wirkung eines klassischen Walzenzugs verglichen. Auch hier zeigte sich die grosse Effektivität der entwickelten dynamischen Verdichtungsmethode! Aufgrund der praktischen Messungen und der theoretischen Analyse lassen sich zwei unterschiedliche Regelstrategien

für die Nutzung der leistungsstarken Verdichtungsverfahrens definieren:

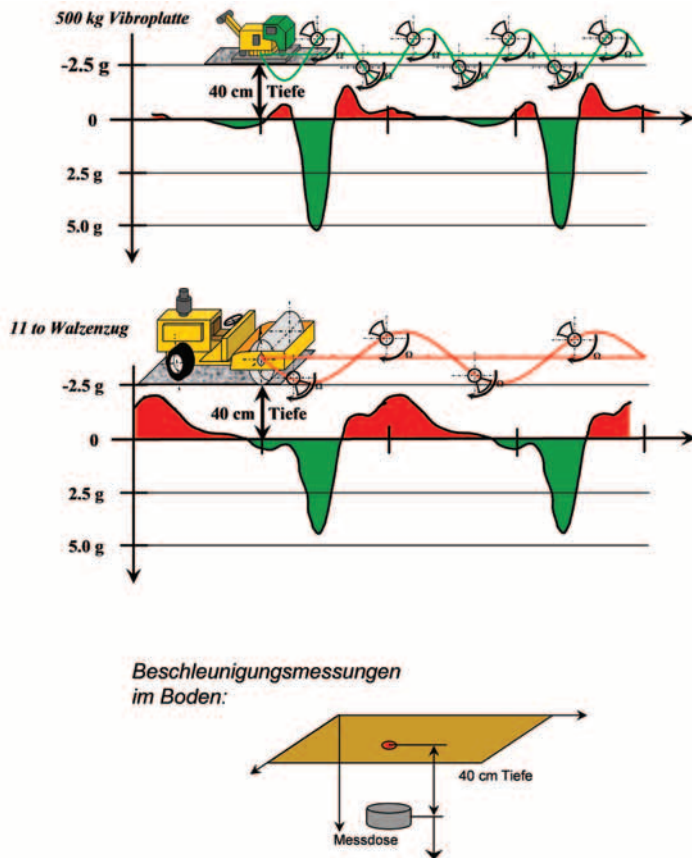


Abbildung 3: Vergleich der Bodenbeschleunigung als Mass für die erreichte Verdichtung – oben: nichtlinear arbeitende Vibrationsplatte – unten: klassischer Walzenzug

1. Messen und Regeln des stark nichtlinearen Gesamtschwingungssystems, Beeinflussen des schwingenden Systems durch Regelung der Parameter des stark nichtlinearen Freiheitsgrads, d. h. der erregenden Bandage (Walzenrad). Da das System dem Periodenverdoppelungsszenario gehorcht (Effekt der Chaostheorie), werden keine klassischen Regelungsverfahren verwendet, sondern Ansätze aus der Theorie ereignisdiskreter Prozesse.
2. Messen und Regeln des linearen Zusatzsystems „Tilger“, Beeinflussen der Parameter des mit dem stark nichtlinearen Freiheitsgrad gekoppelten, ebenfalls dynamisch erregten Zusatzgewichts. Diese Methode eröffnet eine neue Möglichkeit der Beherrschung stark nichtlinearer Systeme durch Ankopplung eines zusätzlichen, passiven linearen Schwingungssystems. Dessen Synchronisation mit dem stark nichtlinearen Primärsystem (Walzenrad) wird über die Theorie der Stabilität parametererregter Schwingungen ermöglicht. Die Grundlagen der Mess- und Regelungstechnik schwach nichtlinearer Systeme können hierbei angewendet werden.

Die Abbildung 4 zeigt eine Darstellung der möglichen technischen Umsetzungen:

Fazit des Projektes, praktische Umsetzung

Die erreichten Projektergebnisse zeigen auf, dass es dem Industriepartner dank des im Rahmen des Projekts entwickelten Simulationsmodells der Dynamik gelungen ist, eine bestehende Verdichtungsplatte deutlich zu optimieren. Bei gleichmässiger Verdichtung weist das verbesserte Gerät eine um 30% höhere Geschwindigkeit auf als jene des Vorgängermodells. Die für den

Bediener lästige Handarmvibration wurde zugleich um 20% vermindert.

Neben diesem direkten, praktischen Gewinn wird das entstandene Simulationsmodell für die Auslegung aller künftiger Maschinengenerationen verwendet. Mit Hilfe dieses Modells

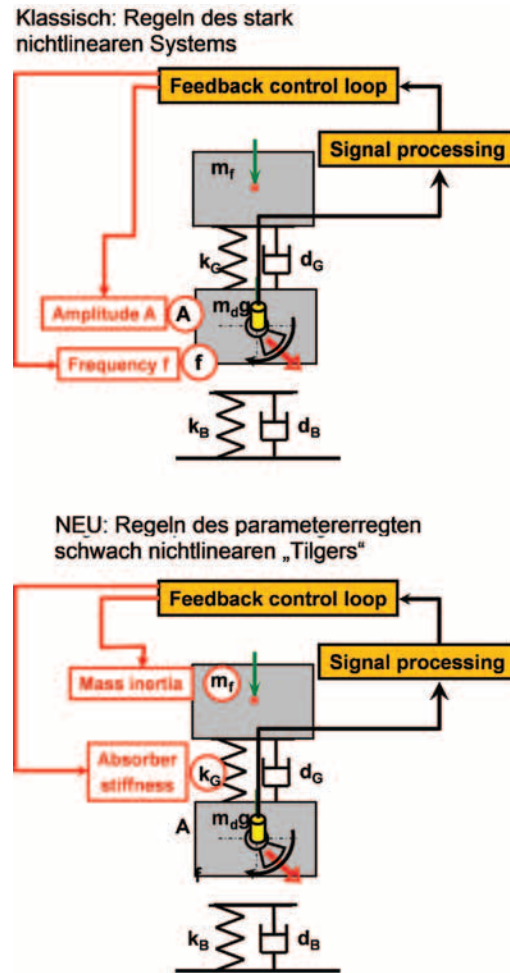


Abbildung 4: Möglichkeiten aktiver und passiver Systeme zur Optimierung des Energietransfers zwischen Maschine und Verdichtungsmaterial

werden künftige Maschinengenerationen bereits im Entwicklungsstadium dynamisch optimiert, die Entwicklungszeit wird dadurch massiv verringert, teure und langwierige Versuchsreihen mit Prototypmaschinen entfallen künftig [Abb. 5].

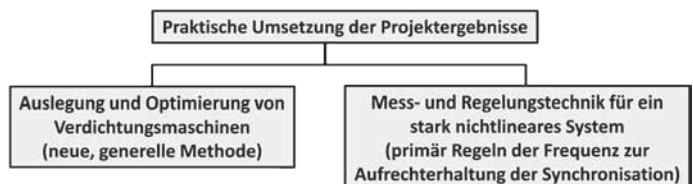


Abbildung 5: Praktische Umsetzung der Projektergebnisse

Daneben wurde ein erstes Funktionsmuster eines geregelten Verdichtungsgerätes mit implementiertem Algorithmus aufgebaut und getestet. Die Umsetzung in ein neues, innovatives Serienprodukt ist derzeit im Gange.

Projektteam

Prof. Dr. Roland Anderegg, Leiter Institut für Automation FHNW, roland.anderegg@fhnw.ch
Lukas Recher, MSc FHNW in Engineering, lukas.recher@ammann-group.com

Modellierung und Simulation der nichtlinearen Dynamik von Flächenbearbeitungsmaschinen

Der vorliegende Beitrag beschreibt Resultate der Untersuchungen zu handgeführten Bodenbearbeitungsmaschinen. Dieses Thema ist Teil eines übergeordneten Projektes der angewandten Forschung und Entwicklung zum Abtrag von Beton und ähnlichen Materialien.

Sandro Wiedmer

Handgeführte Bodenbearbeitungsmaschinen werden eingesetzt zum Abtragen von dünnen Schichten verschiedener Materialien wie beispielsweise Beton. Diese Maschinen haben eine rotierende Frästrommel, welche auf mehreren Wellen mit losen Lamellen bestückt ist. Durch die daraus resultierende Schlagbewegung werden die Maximalkräfte zwischen Maschine und Material erhöht und somit die Fräsleistung gesteigert. Die daraus resultierende Dynamik ist stark nichtlinear aufgrund des möglichen Kontaktverlustes zwischen Maschine und Material.

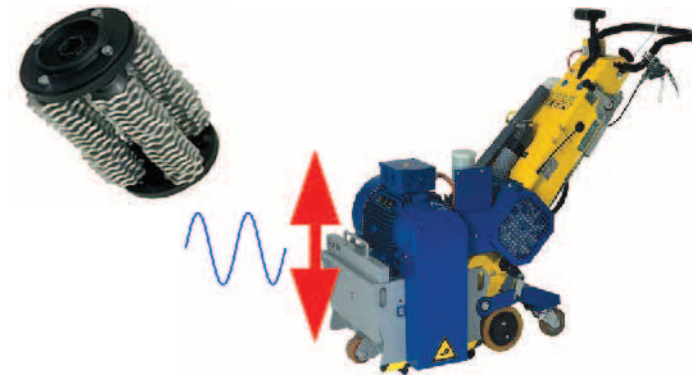


Abbildung 1: Handgeführte Flächenbearbeitungsmaschine: Der vertikale Freiheitsgrad trägt wesentlich zur Schlagbewegung bei. Die Frästrommel ist in diesem Beispiel mit Lamellen auf vier Wellen bestückt. Durch die Rotation der Frästrommel entsteht eine Schlagbewegung bei jedem Aufprall der Lamellen auf das Material

Die nachfolgende Abbildung zeigt eine handgeführte Flächenbearbeitungsmaschine zum schlagenden Abtrag des Materials. Im Inneren der Maschine ist eine rotierende Frästrommel im Einsatz, welche das Material abträgt.

Die Dynamik dieses schlagenden Materialabtrags wird nachfolgend genauer untersucht.

Modellierung

Wie Initialmessungen gezeigt haben, ist der vertikale Freiheitsgrad der Maschine am aktivsten am Prozess beteiligt. Somit wird das Modell auf diesen Freiheitsgrad reduziert. Der mögliche Kontaktverlust zwischen Maschine und Material wird in der unten gezeigten Systembeschreibung als Schaltbedingung formuliert: Dies ist eine starke Nichtlinearität und muss in das Modell einbezogen werden. Die Kraft F pro Schnitttiefe δ wird als Proportionalität angenommen und als virtuelle Feder modelliert, was in der folgenden Darstellung angedeutet ist [Abb. 2].

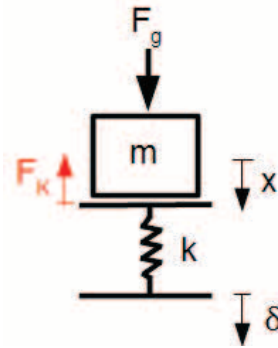


Abbildung 2: Darstellung des vereinfachten Modells der nichtlinearen Dynamik

Mithilfe des Impulssatzes kann folgende Differentialgleichung zur Systembeschreibung aufgestellt werden:

$$m\ddot{x} = mg - k(x - \delta)$$

Wird die einseitige Bindung berücksichtigt, was bedeutet, dass nur Druck- und keine Zugkräfte übertragen werden, erhält man:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= mg - k(x - \delta) & \text{für } F_k = k(x - \delta) > 0 \\ m\ddot{x} &= mg & \text{für } F_k = k(x - \delta) \leq 0 \end{aligned}$$

Die Weg-gesteuerte Anregung δ resultiert aus dem Schnittmuster, welches wiederum aus der Kinematik folgt. Im Wesentlichen ist die Trommeldrehzahl mal Anzahl Lamellenwellen als Grundfrequenz der Anregung relevant, hier 52 Hz, was in Abbildung 3 zu sehen ist. Die Amplitude der Anregung wird von der Frästiefe und der Vorwärtsgeschwindigkeit beeinflusst. Das Konzept dieser Modellierung wurde in [2] vorgestellt.

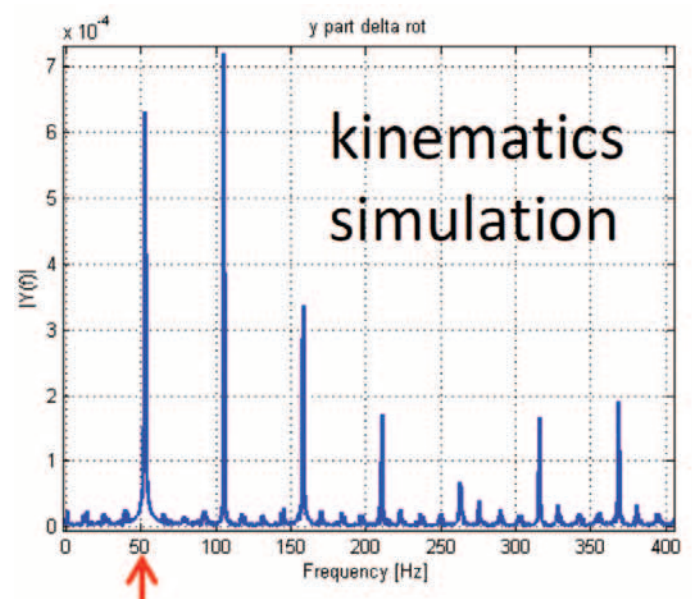


Abbildung 3: Amplitudenspektrum der simulierten vertikalen Summenschnitttiefe, mit rotem Pfeil gekennzeichnet: 52Hz Grundfrequenz aus 13Hz Trommeldrehzahl mal 4 Lamellenwellen

Simulation

Bereits mit diesem nur aus wenigen Elementen bestehenden Modell der nichtlinearen Dynamik kann eine grosse Zahl von verschiedenen Betriebszuständen simuliert werden. Das Schwingungsbild ändert sich stark in Abhängigkeit der Erregerfrequenz und –amplitude, was die Abbildung 4 aufzeigt.

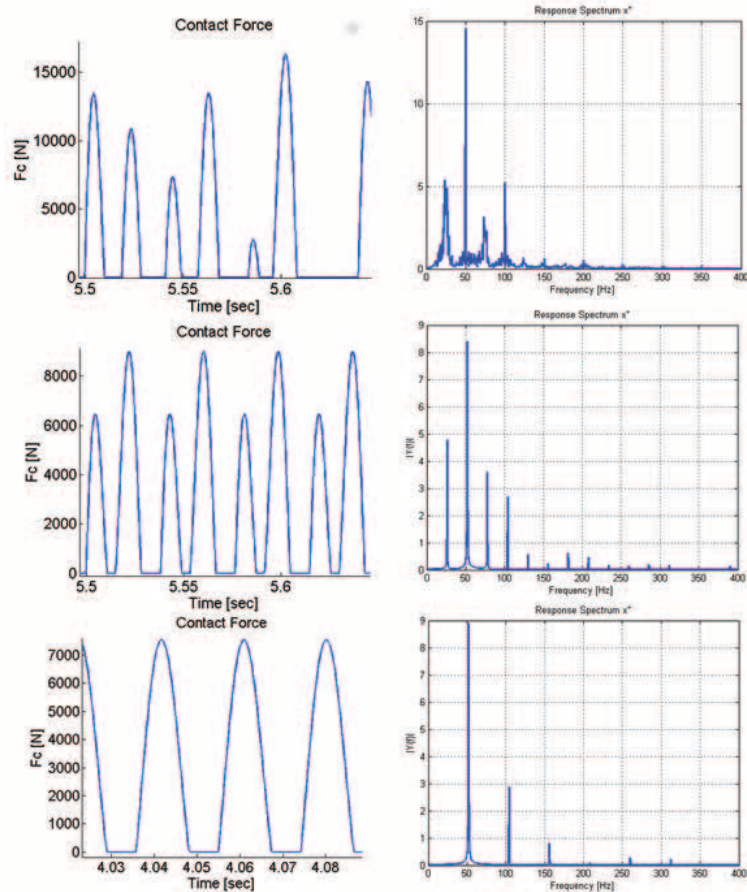


Abbildung 4: Auftretende Zustände im resonanten Bereich, bei Vergrößerung der Fräsleistung verstärkt sich der Grad der Nichtlinearität

Bei Vergrößerung der Anregung innerhalb des resonanten Bereichs, hier ca. 50Hz, kann das Periodenverdoppelungsszenario als einer der Wege ins Chaos beobachtet werden. In

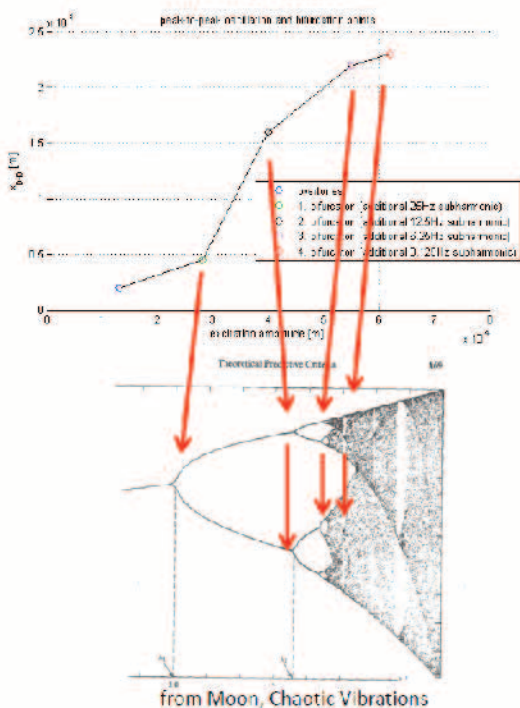


Abbildung 5: Verzweigungspunkte und Vergleich Bifurkationsdiagramm

Abbildung 5 sind die Verzweigungspunkte abhängig von der Erregeramplitude abgebildet.

Wird die Anregungsfrequenz genügend vergrößert, wird der überresonante Bereich erreicht. Hier nimmt die Schwingungsintensität, unten mit der kinetischen Energie als Mass, überproportional im Vergleich zur maximalen Kontaktkraft ab.

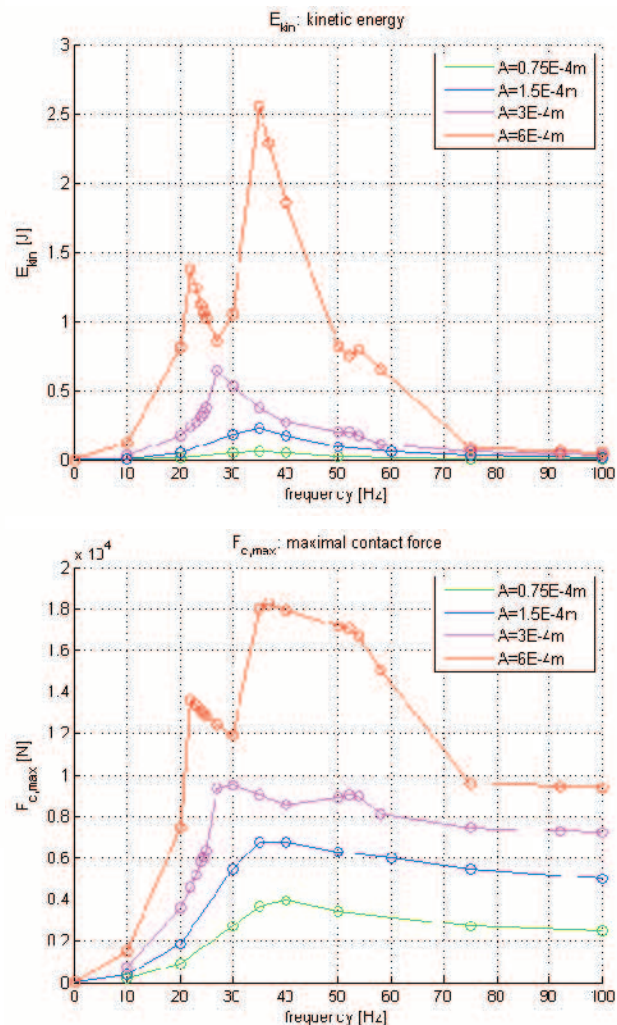
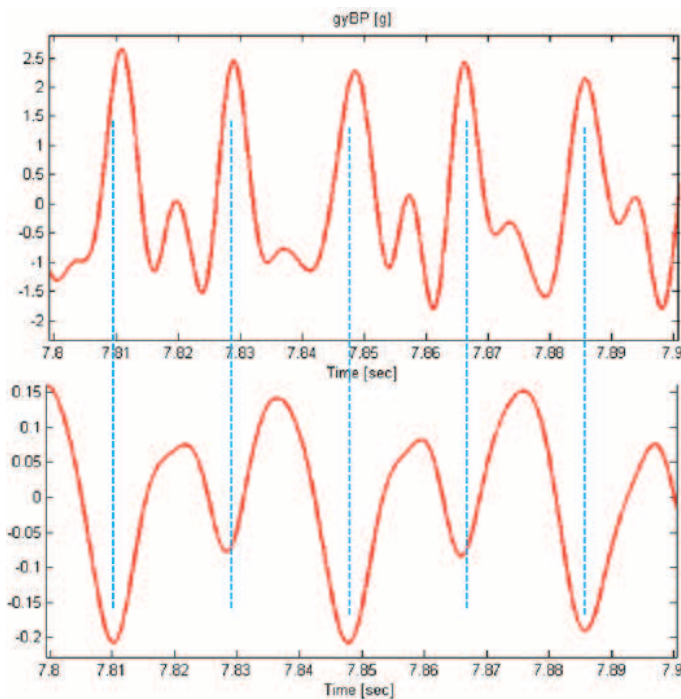


Abbildung 6: Kinetische Energie (links) und maximale Kontaktkraft (rechts), je als Funktion von der Erregerfrequenz bei vier Stufen der Fräsleistung

In der Abbildung 6 können die Skelettlinien [3] erkannt werden, eine typische Eigenschaft von nichtlinearen Systemen: Die 1. Resonanz wandert bei Vergrößerung der Anregungsamplitude (Grad der Nichtlinearität) von den ca. 30Hz in Richtung 20Hz ab. Bei genügend starker Nichtlinearität entstehen weitere Resonanzen bei höheren Anregungsfrequenzen.

Messungen

Um die Modellannahmen zu überprüfen, wurden Vibrationsmessungen an den verschiedenen Typen von Maschinen durchgeführt: Schlagende Maschine mit Erregergrundfrequenz von ca. 52Hz und ca. 92Hz. Die Versuche mit 52Hz zeigen die subharmonischen Schwingungen (Abbildung 7), was eine Bestätigung für die hier vorliegende stark nichtlineare Dynamik des Systems ist. Wird mit 92 Hz erregt und die restlichen Einflüsse bleiben unverändert, sind lediglich Oberwellen sichtbar und keine Subharmonischen: Der Prozess verläuft stabil bei Fräsleistungen, welche bei tieferen Frequenzen stark nichtlineares und teilweise instabiles Verhalten zur Folge haben.



vertical
acceleration

vertical
position

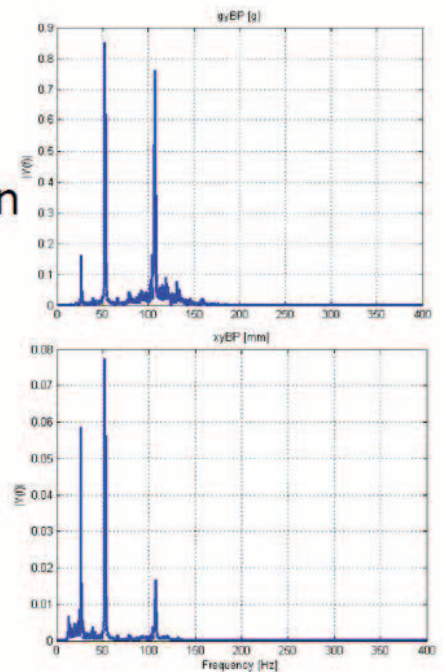


Abbildung 7: Auftreten der subharmonischen Schwingung in der Praxis gemessen, die Periodenverdoppelung ist im Zeit- und Frequenzbereich sichtbar, die hellblauen Striche in den linken Plots zeigen die Periodendauer der Anregung $4 \times 13 \text{ Hz} = 52 \text{ Hz}$ an

Nachfolgend wird der Vergleich zur Erregung mit 92Hz Grundfrequenz (Trommeldrehzahl: 18.3Hz, Anzahl Lamellenwellen: 5) aufgezeigt.

stabilen Zustände auftreten, da diese ineffizient sind und die Maschine an die Belastungsgrenze führen können.

Projektteam

Sandro Wiedmer, MSc FHNW in Engineering, wissenschaftlicher Mitarbeiter, sandro.wiedmer@fhnw.ch
Prof. Dr. Roland Anderegg, Leiter Institut für Automation FHNW, roland.anderegg@fhnw.ch

Literaturverzeichnis

- [1] H. Dresig; Schwingungen mechanischer Antriebssysteme: Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese; 2000
- [2] R. Anderegg, L. Kurmann, S. Wiedmer; Mechatronics of dynamical milling process for industrial applications; Linz, 2012
- [3] F. Moon; Chaotic Vibrations: An Introduction for applied scientists and engineers; 2004

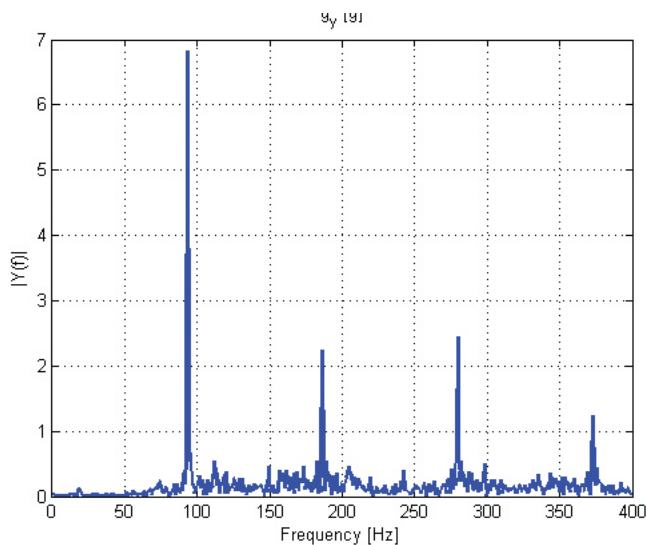


Abbildung 8: Im Amplitudenspektrum der gemessenen Schwingung ist lediglich die Grundfrequenz 92Hz mit Oberwellen sichtbar

Die Schwingung mit der Anregung im überresonanten Bereich enthält nur die Grundfrequenz 92Hz und Oberwellen, obwohl die Schwingung in der Grundfrequenz ca. 7 mal grösser ist als im Fall mit 52Hz Anregungsfrequenz.

Fazit

Sofern die Möglichkeit besteht, die Grundfrequenz der Erregung oberhalb der resonanten Zone zu platzieren, ist dies von Vorteil: Die Dynamik bleibt stabil auch bei grossen Fräsleistungen. Die Leistungsfähigkeit im resonanten Bereich ist zwar höher als im überresonanten Bereich, im Gegenzug besteht aber das Risiko für instabiles Verhalten. Falls die Anregung im resonanten Bereich liegt, muss die Fräsleistung soweit zurück gehalten werden, dass keine in-

Dynamische Drehgestell-Prüfstandstechnik

Die weltweit stark wachsenden Transportleistungen und Höchstgeschwindigkeiten des schienengebundenen Verkehrs führen zu steigenden Bedürfnissen bezüglich der Mess- und Prüftechnik von Eisenbahnfahrzeugen, insbesondere deren Drehgestellen (Fahrwerken). Heutige Drehgestellprüfstände arbeiten entweder statisch oder sind äusserst komplexe dynamische Prüfstände, welche das Fahren simulieren. Im Rahmen eines KTI-Projektes gelang die Weiterentwicklung der statischen Prüfstände.

Claudio Birrer

Das nachfolgend beschriebene KTI-Projekt liefert eine Weiterentwicklung statischer Prüfstände durch Verwendung dynamischer, periodischer Weg- und Kräfteerregungen, um sowohl geometrische Abweichungen eines Drehgestells als auch ungleiche Feder- und Dämpfungseigenschaften eindeutig feststellen und unterscheiden zu können. Das heutige, aufwändige Einstellen der Prüfstände auf jedes einzelne Rad soll entfallen und eine automatische Prüfung die rasche und prozesssichere Kontrolle der Eigenschaften der Drehgestelle ermöglichen.

Herausfordernde Prüftechnik

Eine der primären Herausforderungen der Drehgestell-Prüfstandstechnik ist die nachvollziehbare und wiederholbare Positionierung des Rollmaterials. Zusätzlich werden die Fahrwerke während des Betriebs nicht nur statisch belastet. Selbst kleine Unregelmässigkeiten führen zu ungleichen Kräften im Rad-Schiene Kontakt und somit zu falschen mechanischen Parametern. Abweichungen im Streckenprofil oder abgenutzte Schienenstösse stellen dynamische Anregungen in horizontaler und vertikaler Richtung dar. Somit ist es auch logisch, dass Parameter wie beispielsweise Dämpfungsfaktoren und Eigenfrequenzen für die Laufeigenschaften und das Vibrationsverhalten entscheidend sind. Eine neue dynamische Prüfstandstechnik soll jetzt mit kleinerem Aufwand mehr detaillierte Informationen über das System liefern [Abb. 1]. Dieses Vorhaben wird mit der Firma Nencki AG in Langenthal im Rahmen eines durch die Kommission für Technologie und Innovation KTI geförderten Projekts durchgeführt.



Abbildung 1: Drehgestellprüfstand der Firma Nencki

Modellierung des Systems

Berechnungen für den dynamisch erregten Prüfstand werden sowohl auf theoretischer Ebene als auch mithilfe moderner Simulationstools durchgeführt. 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 und die dynamischen Eigenschaften des Prüfstands inklusive Drehgestell mit Hilfe von n nichtlinearen gekoppelten Differentialgleichungen für das n -DOF System bestimmt. [1][2]

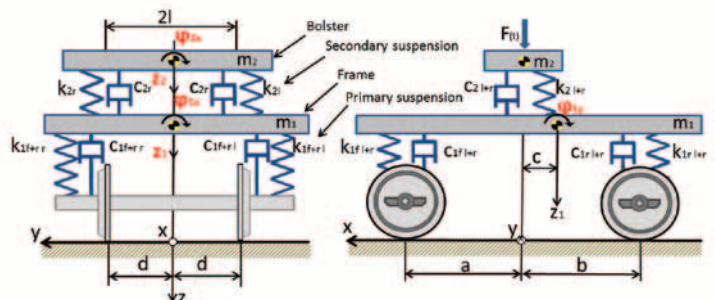


Abbildung 2: Vereinfachtes Modell mit fünf Freiheitsgraden

Das analytische Modell basiert auf einem Zweimassen-Feder-Dämpfer-System, welches die Grundlage der neuen Technologie darstellt. In einem ersten Schritt wird die Dynamik des Rad-Schiene-Kontakts vernachlässigt und der Fokus auf die Primär- und Sekundärfederung gerichtet. Somit besteht das Modell aus fünf Freiheitsgraden: Die Translationen des Drehgestellrahmens und der Wiege z_1 und z_2 , beide Rotationen um die x -Achse ϕ_{1x} und ϕ_{2x} sowie die Rotation um die y -Achse ϕ_{1y} . Der Einfachheit halber liegen die Schwerpunkte zentriert gegenüber der x -Achse (Abb. 2). Unter Verwendung von Impuls- und Drallsatz können so fünf Differentialgleichungen aufgestellt werden. Die Anregungskraft wird jeweils direkt auf die Wiege eingeleitet.

Mehrkörpersimulation

Das komplexe Mehrkörpermodell mit 18 Freiheitsgraden [Abb. 3] bietet die Möglichkeit einer präzisen Simulation des nichtlinearen Rad-Schiene-Kontakts sowie verschiedener Feder- und Dämpfercharakteristiken.

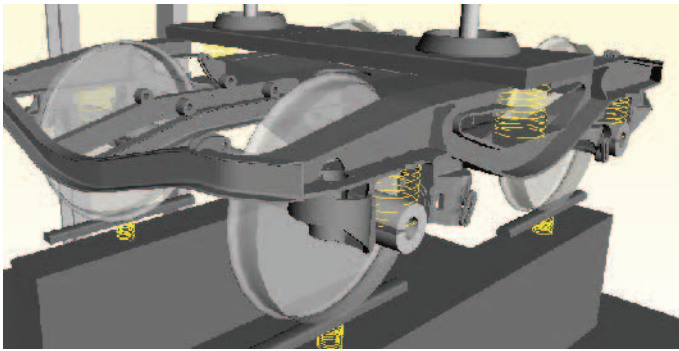


Abbildung 3: Mehrkörper-Simulationsmodell mit 18 Freiheitsgraden

Es kann gezeigt werden, dass die verschiedenen Modelle übereinstimmen und zwei Eigenfrequenzen im Bereich von 5-20Hz aufweisen, während die Dynamik des Rad-Schiene-Kontakts vernachlässigt werden kann.

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- 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.

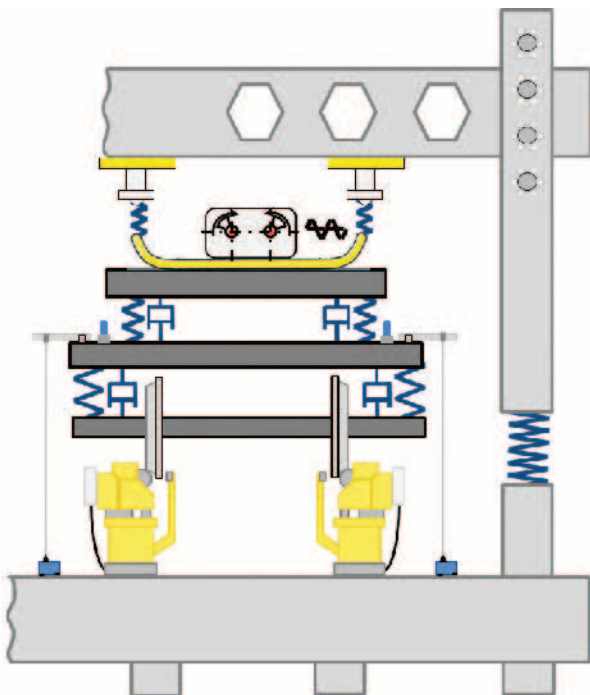


Abbildung 4: Prüfstands Aufbau für Validationsmessungen

Validation des theoretischen Modells

Erste Tests und Validationsmessungen konnten mit einem ausrangierten Schmalspurdrehgestell der Oberaargau-Jura-Bahn (OJB) auf einem Nencki Prüfstand durchgeführt werden. Eine hydraulisch angetriebene exzentrische Masse (Unwucht) aus der Bodenverdichtungstechnik ist als Anregung direkt auf der Wiege und mit Gummidämpferelementen an den hydraulischen Zylindern montiert, wie in Abb. 4 dargestellt. Die Messung von Beschleunigungskräften an verschiedenen Punkten am Drehgestell, 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 liegt, während die gemessenen Kontaktkräfte sinusförmig oszillieren.

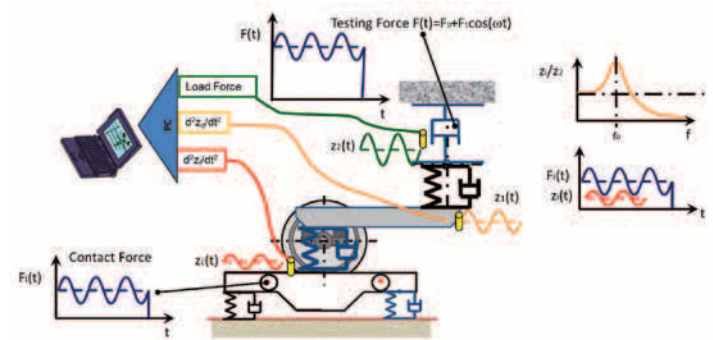


Abbildung 5: Dynamisches Messprinzip

Eine doppelte Integration des Beschleunigungssignals wie in Abbildung 5 dargestellt, führt zur relativen Auslenkung an den Messpunkten. In einem ersten Schritt wurden verschiedene zusätzliche Messungen am Prüfstand selber durchgeführt, um den dynamischen Einfluss des Jochs zu minimieren.



Abbildung 6: Validationsprozess

Für die Bestimmung der Lateraldynamik wurde während des Validationsprozesses [Abb. 6] neben der vertikalen auch eine horizontale Anregung getestet. Richtet man die beiden Unwuchten 180° gegeneinander aus, erzeugt dies neben der horizontalen Anregung ein zusätzliches Torsionsmoment um die x-Achse, was in einer Erregung in beiden Richtungen resultiert.

Der Vergleich von verschiedenen Systemparametern aus Messung und Simulation zeigt, dass die Rad-Schiene-Kinematik

keinen Einfluss auf diese Art von Erregung hat. Somit können die Achsen als starr angesehen werden. Dies erlaubt eine Interpretation der dynamischen Auslenkung an den Rahmen- Eckpunkten als direkter Weg der jeweiligen Primärfeder. Das Schwingungsverhalten des Drehgestells ist in Abb. 7 dargestellt.

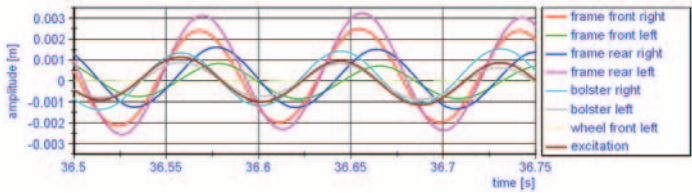


Abbildung 7: Auslenkungen am Drehgestell

Durch den jahrzehntelangen Einsatz des OJB-Drehgestells weichen die mechanischen Parameter von den Herstellerdaten ab und müssen im Simulationstool angepasst werden. (siehe Abb. 8)

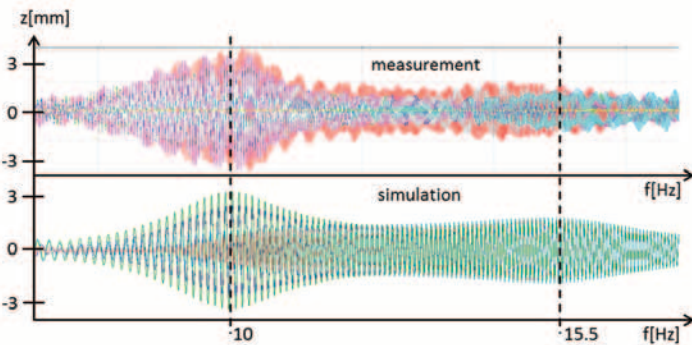


Abbildung 8: Vergleich von Frequenzsweeps

Algorithmus für die Identifikation der Systemparameter

Mit den zusätzlichen Systeminformationen durch die dynamische Anregung können verschiedene Parameter automatisch berechnet werden:

- Die Masse der Wiege und des Rahmens
- Steifigkeitskoeffizienten und Dämpfungsfaktoren von Primär- und Sekundärfederung
- Schwerpunkt des Drehgestells

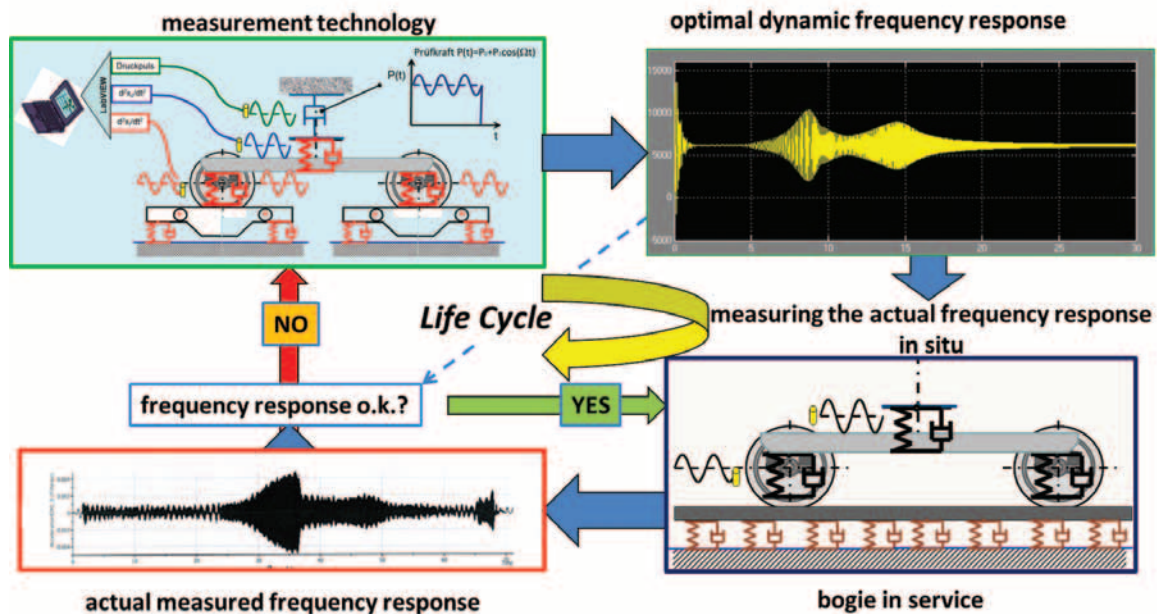


Abbildung 10: In-situ Überwachung am Drehgestell

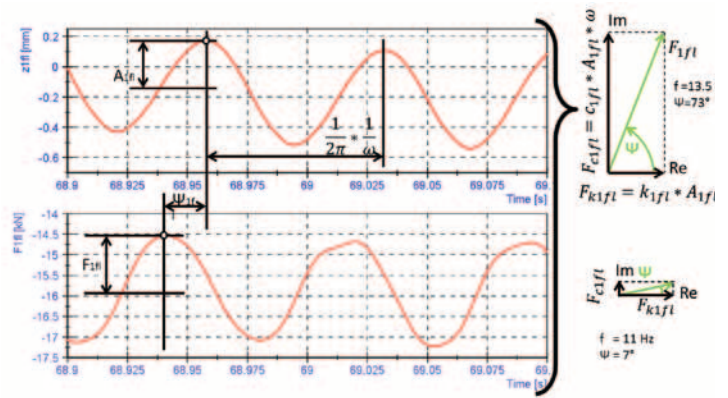


Abbildung 9: Grafische Berechnung der Primärfederung

Vergleichbar mit anderen Prüftechnologien, welche dynamische Erreger verwenden [4], ist es möglich, fast alle mechanischen Systemparameter des Drehgestells zu bestimmen. Das Konzept basiert auf einer zu der statischen Kraft zusätzlichen, kleinen, dynamischen Testkraft, welche das System erregt, und der gleichzeitigen Messung der Systemantwort.

Als Beispiel kann die Primärfedersteifigkeit der Feder vorne links grafisch berechnet werden (Abb. 9). Zwei verschiedene Anregungsfrequenzen wurden gewählt, um den hohen Einfluss der Dämpfung oberhalb der Resonanzfrequenz darzustellen, welche sich auch in der Phasenverschiebung ψ zeigt. Trotz verschiedener Anregungsfrequenzen bleibt die statische Federsteifigkeit gleich und kann schnell und zuverlässig ohne den Einfluss von Haftreibungseffekten bestimmt werden.

Zukünftige Technologien

Der dynamische Prüfansatz führt zu anderen interessanten Anwendungen im Bereich der Schienenfahrzeugtechnik. Wenn die Frequenzantwort des Drehgestells nach einer Revision bekannt ist, kann diese mit der aktuellen in-situ Frequenzantwort, welche durch verschiedene Beschleunigungssensoren gemessen wird, verglichen werden. Eine Änderung der Resonanzfrequenz oder eine andere grobe Abweichung hat einen Alarm auf dem Board-Computer zur Folge. So kann die Verfügbarkeit und Sicherheit des Rollmaterials erhöht werden.

Zudem können auch Frequenzspektren von realen Bahnfahrten aufgenommen und am Prüfstand auf das Drehgestell aufgebracht werden, um eine Belastung zu simulieren.

Ergebnisse und Ausblick

Im Bereich der Drehgestellprüfstandstechnik können mithilfe von dynamischer Anregung wesentlich mehr Informationen über das System gewonnen werden. Algorithmen, welche direkt, ohne den Einfluss von Haftreibung und geometrischen Abweichungen, auf Massen, Steifigkeiten und Dämpfungen schliessen, liefern den Mehrwert dieser Technologie. Frequenzantworten in vertikaler sowie horizontaler Richtung können genutzt werden, um Komfort und Sicherheit zu erhöhen, und garantieren nicht nur statische, sondern auch realistische dynamische Informationen über das Rollmaterial.

Projektverantwortlicher

Claudio Birrer, BSc FHNW in Systemtechnik, Student Master of Science in Engineering (MSE), wissenschaftlicher Assistent, claudio.birrer@fhnw.ch

Literaturverzeichnis

- [1] Knothe Klaus, Stichel Sebastian: Schienenfahrzeugdynamik: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003. (p.79-103)
- [2] Hanneforth Wolfgang, Fischer Werner: Laufwerke: VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin, 1986
- [3] Iwnicki Simon: Handbook of Railway Vehicle Dynamics: Taylor & Francis, Boca Raton FL, 2006, Chapter 14: roller rigs, pp. 457
- [4] Anderegg Roland, Kaufmann Kuno: Intelligent Compaction with Vibratory Rollers: Journal of the Transportation Research Board No 1868, TRB, Washington DC, 2004. (p.124-134)

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

Modellierung von robotergestützten Bandschleifanlagen am Beispiel der Armaturenherstellung

Mit der Firma KWC, einem regionalen Armaturenhersteller, untersucht das Institut für Automation den Prozess des robotergestützten Bandschleifens von Designwerkstücken mit komplexen Freiformgeometrien. Die hohen Qualitätsanforderungen und Prozessunsicherheiten erfordern ein regelmässiges Eingreifen. Ziel ist es, eine Lösung zu entwerfen, mit der Armaturen nach einmaligem Einrichten vollautomatisch produziert werden.

Max Edelmann

Der Einrichtaufwand für den robotergestützten Bandschleifprozess in der Armaturenherstellung ist hoch und muss regelmässig wiederholt werden, um die Qualitätsanforderungen erfüllen zu können. Armaturen für Küche und Bad sind in der Regel Designprodukte und zeichnen sich durch eine komplexe Geometrie aus. Es ist mit vielen verschiedenen Oberflächensegmenten mit unterschiedlichen konvexen und konkaven Radien zu rechnen. Dieser Fertigungsschritt erfordert deshalb eine exakte Programmierung des Roboters durch geschulte Facharbeiter.

Dieser Beitrag beschreibt die typischen Schwierigkeiten, die im Schleifprozess auftreten können, und leitet daraus eine analytische Beschreibung des robotergestützten Bandschleifprozesses ab. Für die Modellierung sind die Bandschleifmaschine mit Kontaktrolle und ein Industrieroboter, der das Werkstück während dem Fertigungsprozess führt, berücksichtigt. Im Detail wird das gesamte Mehrkörpersystem, bestehend aus einem planaren Zweigelenkbogen für den Roboter, und eine Schleifmaschine mit Feder-, Masse- und Dämpferelementen, beschrieben.

Als grösste Prozessschwierigkeit zur dynamischen Betrachtung des Problems werden die sich stark ändernden Robotereigenschaften angesehen. Das Werkstück wird zum Bearbeiten von Flächensegmenten an das Schleifband geführt und muss anschliessend, ohne Kontakt zum Schleifband, vom Roboter neu orientiert werden, um das nächste Segment zu bearbeiten. Diese schnellen Kontaktwechsel sind als eigene Nichtlinearität zu betrachten. Zudem hat der Industrieroboter bei jedem zu schleifendem Segment eine andere Stellung und dadurch unterschiedliche statische und dynamische Eigenschaften. Dies äussert sich im Modell durch eine stark ändernde Nachgiebigkeit des Roboters zu den jeweiligen Schleifsegmenten. Diese variable Roboternachgiebigkeit ist wesentlich vom Robotertyp, der aktuellen Position, der Orientierung und des Bahnverlaufs abhängig. Im vereinfachten Prozessmodell kann das mit zeitvarianten Parametern berücksichtigt werden.

Messungen an einem Testaufbau bei KWC haben die dynamischen Eigenschaften des Modells qualitativ bestätigt. Die richtigen Modellparameter lassen sich zu einer spezifischen Schleifanlage mit Industrieroboter durch Identifikationsverfahren bestimmen. Mit dem Wissen der Modellierung und

den neu gewonnenen Prozesskenntnissen wird im Rahmen der weiteren Zusammenarbeit eine Lösung geschaffen. Diese soll alle Unsicherheiten automatisch kompensieren und in der Lage sein, den kostspieligen und zeitaufwendigen Einrichtaufwand zu minimieren.

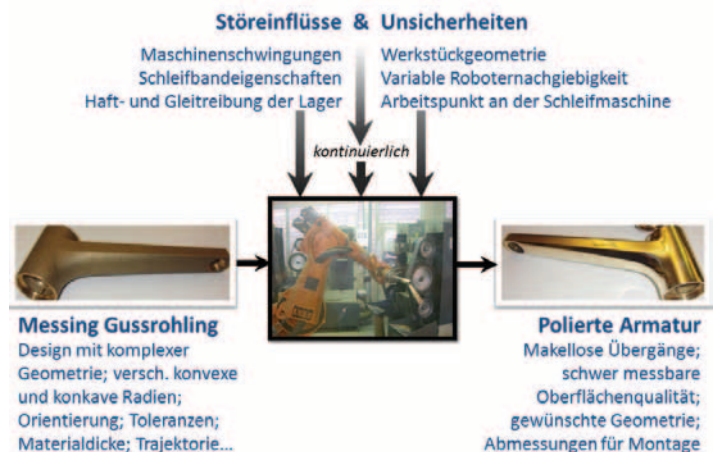


Abbildung 1: Black-Box Modell [1]

Einführung

Bezogen auf den gesamten Herstellungsprozess einer Armatur, vom Gussroling bis zum fertig montierten und verpackten Produkt, wird die erzielte Geometrie wesentlich durch den Schleifprozess geprägt. Typischerweise werden die inneren Partien der Armatur konventionell auf Werkzeugmaschinen bearbeitet. Der Schleifprozess an sich benötigt jedoch volle 6 Freiheitsgrade (engl. Degrees of Freedom DoF), um die gesamte Oberfläche bearbeiten zu können. Bevor sich der Industrieroboter auch in diesem Bereich als Standardwerkzeug etablierte, wurde diese Arbeit von Hand durchgeführt. Heutzutage wird der Industrieroboter von erfahrenen Facharbeitern mit ausgewiesener Schleiferfahrung programmiert. Dabei sind die Arbeiter für die Qualität des Prozesses verantwortlich und müssen alle auftretenden Störungen und Unsicherheiten ausgleichen. Weil sich die Störungen und Unsicherheiten kontinuierlich und plötzlich ändern können (s. Abb. 1) ist ein regelmässiges Finetuning erforderlich.

Forschungen und Entwicklungen in diesem Bereich versuchen beispielsweise, selbstlernende Algorithmen einzusetzen. Dabei wird der Spanabtrag gemessen und die Roboterbahn nach jedem Werkstück entsprechend korrigiert. Dies erfordert jedoch umfangreiche Losgrößen und strenge Toleranzfelder für die Gussrohlinge und ist deshalb nur bedingt empfehlenswert [2]. Bekannt ist eine weitere Arbeit, bei der mit bildverarbeitenden Systemen aus dem Schleifergebnis die Fehler ermittelt werden, um eine korrigierende Roboterbahn zu generieren. Dies eignet sich vorrangig für gut detektierbare Defekte der Oberfläche. Nachteilig ist, dass ein Werkstück mehrmals geschliffen werden kann, bevor es zum Ausschuss gelangt. Dieser Ansatz ist zudem mit hohen Investitionskosten verbunden [3]. Weitere Ansätze konzentrieren sich auf Softwarelösungen und sind somit als eine Prozessvorbereitung anzusehen und nur bedingt in der Lage, den erforderlichen Einrichtaufwand zu verhindern [4, 5].

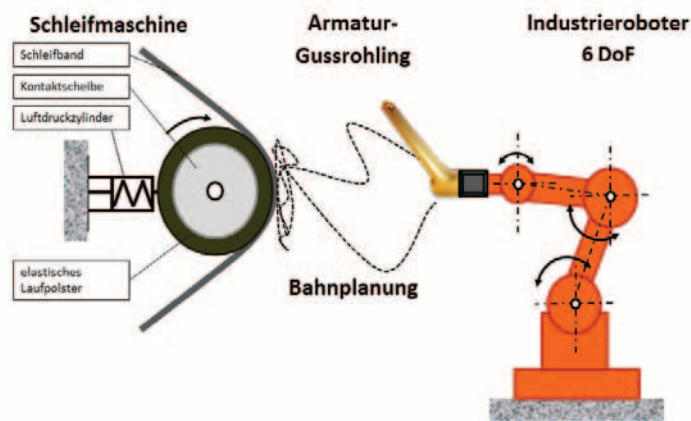


Abbildung 2: Systemgrenzen

Analytische Modellierung des Problems

Der Rahmen der Modellierungsarbeit ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Der Industrieroboter führt das Werkstück entlang einer vorprogrammierten Bahn und schleift die Armatur durch Kontakt mit der bandführenden Kontaktrolle der Bandschleifmaschine.

Die Fertigungszelle reduziert sich für die Modellierung auf den Roboter mit Werkstück und eine Schleifmaschine mit Schleifband, Kontaktscheibe und einem nachgebenden Zylinder als Verbindung zum Bezugssystem. Während dem Schleifprozess sind beide Systeme zu einer kinematischen Kette geschlossen. Die statischen und dynamischen Eigenschaften des Kontaktzustandes stehen im Zentrum der Modellierungsarbeit.

Das analytische Modell beschreibt die Mechanik beider Systeme separat, wenn die Armatur nicht geschliffen wird, und gemeinsam, wenn die Armatur am Schleifband geschliffen wird. Die resultierende Schleifkraft $S(t)$ als Funktion der Prozesszeit t kann sowohl statisch als auch dynamisch anhand des Modells berechnet werden und stellt die wichtigste Prozessgröße dar.

1 Modellierung des Subsystems Roboter

Der Industrieroboter wird der Einfachheit halber abstrahiert zu einem Zweigelenkbogen. Die beiden Armschwingen des Roboters, die im wesentlichen die Reichweite bestimmen, bilden die beiden Glieder des Zweigelenkbogens. Das Problem reduziert sich von 6-DoF, der sechs Drehantriebe des Roboters, auf 2-DoF, den Drehwinkeln Θ_1, Θ_2 vom Zweigelenkbogen. Wegen den fehlenden 4-DoF im Modell kann vorerst nur in der Ebene statt im dreidimensionalen Raum gearbeitet werden. Daher ist auch keine Orientierung der Armatur möglich.

Die Roboternachgiebigkeit kann modelliert werden durch eine lineare und in den Gelenken konzentrierte Flexibilität bestehend aus Feder und Dämpfer [Abb. 3]. Unter Verwendung von Parametern wie Steifigkeit k_i , Dämpfung d_i , Masse m_i , Gliedlänge l_i , Drehwinkel Θ_i , Drehmoment M_i , Trägheitsmoment J_i , Abstand zum Masseschwerpunkt s_i und Index i zum Referenzieren des entsprechenden Gliedes können die folgenden Gleichungen hergeleitet werden.

Zum Beschreiben der rotativen Freiheitsgrade Θ_1 und Θ_2 der Drehgelenke und dessen Dynamik werden die statischen und dynamischen Anteile, basierend auf der Störungsrechnung, in zwei Komponenten gegliedert:

- I. schnelle Vibrationsdynamik $\Delta\Theta_i, \Delta M_i$
- II. langsame Bahndynamik als quasistatischer Anteil Θ_{i0} , entsprechend dem programmierten Pfad. Es wird vorausgesetzt, dass die Antriebe am Roboter das Drehmoment M_i aufbringen, um die geforderte Bewegung zu vollziehen.

$$\Theta_i \rightarrow \Theta_{i0} + \Delta\Theta_i; \Delta\Theta_i \ll \Theta_{i0} \quad (1)$$

Man beachte, dass die effektive Schleifkraft $S(t)$ demzufolge als statische und dynamische Störgröße auf das Robotersystem einwirkt [Abb. 3] und eine Auslenkung in Form von $\Delta\Theta_i$ bewirkt, dabei ändert sich auch das erforderliche Drehmoment mit ΔM_i . Es folgt, dass die Schleifkraft eine sich schnell ändernde Komponente ist:

$$S(t) \rightarrow \Delta S(t) \quad (2)$$

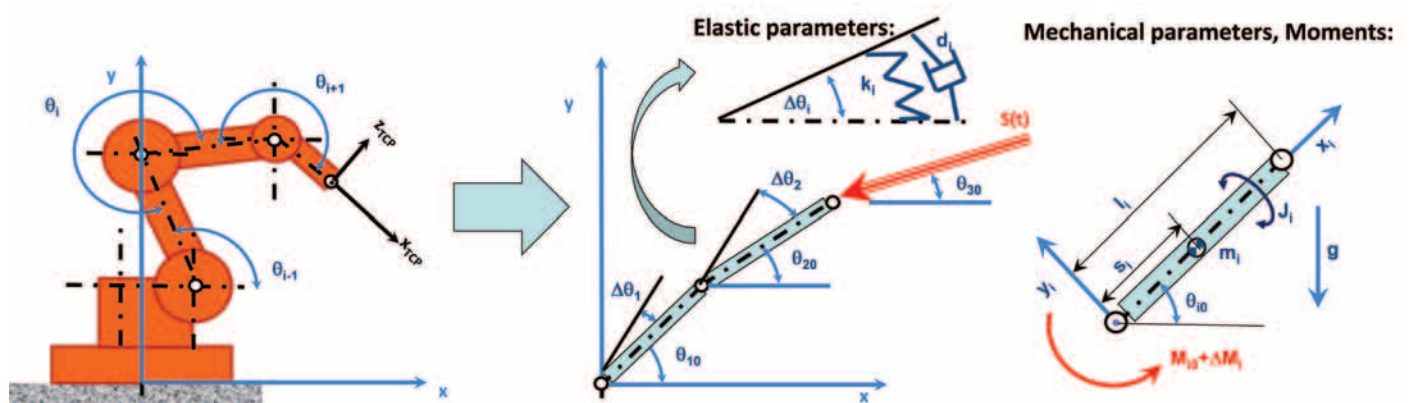


Abbildung 3: Robotermodell als planarer Zweigelenkbogen mit Elastizitäten in den Gelenken

Unter Anwendung der Mittelungsmethode [6] und Modellierungspraktiken der Roboterdynamik [7] kann eine Matrizendarstellung des Problems hergeleitet werden:

$$[M] \begin{Bmatrix} \Delta \ddot{\theta}_1 \\ \Delta \ddot{\theta}_2 \end{Bmatrix} + [D] \begin{Bmatrix} \Delta \dot{\theta}_1 \\ \Delta \dot{\theta}_2 \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \end{Bmatrix} = \underline{\Delta T} + \underline{\Delta S(t)} \quad (3)$$

mit

$$[M] = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} m_{11} &= m_1 s_1^2 + m_2 l_2^2 + J_{z1} \\ m_{12} &= m_2 s_2 l_1 \cos(\theta_{20} - \theta_{10}) \\ m_{21} &= m_2 s_2 l_1 \cos(\theta_{20} - \theta_{10}) \\ m_{22} &= m_2 l_2^2 + J_{z2} \end{aligned}$$

und

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} d_{11} &= 2\dot{\theta}_{10} m_2 s_2 l_1 \sin(\theta_{20} - \theta_{10}) + d_1 + d_2 \\ d_{12} &= -d_2 \\ d_{21} &= -d_2 \\ d_{22} &= 2\dot{\theta}_{20} m_2 s_2 l_1 \sin(\theta_{20} - \theta_{10}) + d_2 \end{aligned}$$

und

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} k_{11} &= -\ddot{\theta}_{20} m_2 s_2 l_1 \cos(\theta_{20} - \theta_{10}) + (m_1 + m_2) g s_1 \sin(\theta_{10}) - m_2 s_2 l_1 \ddot{\theta}_{20} \sin(\theta_{10} - \theta_{20}) + k_1 \\ k_{12} &= \dot{\theta}_{20}^2 m_2 s_2 l_1 \cos(\theta_{20} - \theta_{10}) - m_2 s_2 l_1 \ddot{\theta}_{20} \sin(\theta_{10} - \theta_{20}) - k_2 \\ k_{21} &= -\ddot{\theta}_{10} m_2 s_2 l_1 \cos(\theta_{20} - \theta_{10}) - m_2 s_2 l_1 \ddot{\theta}_{10} \sin(\theta_{10} - \theta_{20}) - k_2 \\ k_{22} &= \dot{\theta}_{10}^2 m_2 s_2 l_1 \cos(\theta_{20} - \theta_{10}) + m_2 g s_1 \sin(\theta_{20}) - m_2 s_2 l_1 \ddot{\theta}_{10} \sin(\theta_{10} - \theta_{20}) + k_2 \end{aligned}$$

und

$$\underline{\Delta T} = \begin{Bmatrix} \Delta M_1 - \Delta M_2 \\ \Delta M_2 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$\underline{\Delta S(t)} = \begin{Bmatrix} \Delta S(t) l_1 \sin(\theta_{10} - \theta_{30}) \\ \Delta S(t) l_2 \sin(\theta_{20} - \theta_{30}) \end{Bmatrix}$$

Anhand der Gleichung (3) zeigt sich die mathematische Natur der linearisierten infinitesimalen Drehwinkel $\Delta\theta_i$. Zum Lösen dieses Problems kann die folgende Ansatzfunktion herangezogen werden:

$$\Delta\theta_i = A_i(t) \cos \omega t + B_i(t) \sin \omega t \quad (8)$$

Aufgrund der nichtlinearen Kontaktbedingung zwischen Roboter und Schleifmaschine, die durch $S(t)$ beschrieben wird, sind die Koeffizienten A_i und B_i Funktionen in Abhängigkeit der Zeit t . Um die Mittelungsmethode anwenden zu dürfen, muss angenommen werden, dass mindestens zwei Zeitskalen vorliegen. Auf dieses Problem bezogen wird vorausgesetzt, dass die Drehgeschwindigkeit der Bahnplanung viel kleiner ist als die Drehgeschwindigkeit der dynamischen Komponente:

$$\dot{\theta}_{i0} \ll \Delta \dot{\theta}_i.$$

2 Modellierung des Subsystems Schleifmaschine

Die Schleifmaschine wird abstrahiert und kann als rotierende Kontaktrolle mit linearer horizontaler Führung und einem Feder-Dämpfer-Element zum Bezugssystem, dem Schleifmaschinenaufbau, modelliert werden. Die Kontaktscheibe erfährt über einen Antrieb mit Getriebe direkt oder indirekt über das gespannte Band ein Drehmoment M . Mit diesem kann auf die geforderte Drehzahl geregelt werden, aber darauf soll hier nicht weiter eingegangen werden. Die zugehörigen Modellparameter für Steifigkeit und Dämpfung zum Bezugssystem lauten k_s , d_s . In Abbildung 4 ist das elastische Laufpolster der Kontaktrolle als ein Kraftelement mit Steifigkeit k_t und Dämpfung d_t modelliert. Die Exzentrizität e der Kontaktscheibe ist sowohl durch nicht-ideales Auswuchten als

auch durch die einseitige Kraftwirkung S_0 des gespannten Schleifbandes bedingt. Zusammen mit der Masse m_s hat diese Exzentrizität eine Unwuchtkraftwirkung $F_u = m_s e \omega^2$, die das gesamte gekoppelte System „Roboter-Schleifmaschine“ mit der Frequenz f anregt. Die dominierende Systemfrequenz f ist gegeben durch

die Drehgeschwindigkeit der Kontaktrolle, mit Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi f$. Der Schaumstoff des Laufpolsters ist als m_t modelliert und erfährt eine Zentripetalkraft, die wiederum eine Dehnung des Materials zur Folge hat. Der Kontaktrollenradius nimmt deshalb mit steigender Drehzahl zu. Der Radius ist als eine Funktion der Frequenz, d.h. $r(f)$ zu betrachten. Basierend auf dem Newton-Euler-Formalismus kann folgendes Gleichungssystem für die modellierte Schleifmaschine hergeleitet werden:

$$\begin{aligned} m_s \ddot{x}_s + d_s \dot{x}_s + k_s x_s &= S \cos \theta_{30} + m_s e \omega^2 \sin \omega t + S_0 \\ J_s \dot{\omega} &= -r(f) S \sin(\theta_{30} - \alpha) + M \end{aligned} \quad (9)$$

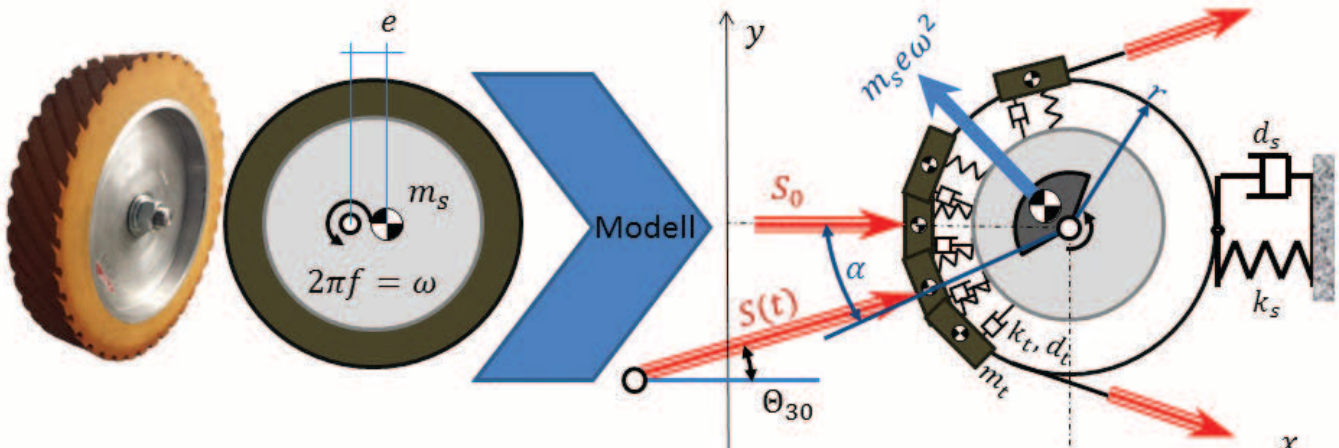


Abbildung 4: Schleifmaschinen- und Kontaktrollenmodell [8]

In x-Richtung kann die Unwucht bei konstanter Drehzahl als eigener Schleifmaschinenkraftanteil $f_{md1} = m_s e \omega^2 \sin \omega t$ zusammengefasst werden. In Messungen an realen Maschinen hat sich jedoch gezeigt, dass hier vernachlässigte Effekte eine zusätzliche schwingungsförmige dynamische Kraftwirkung haben. So sind z. B. die Schwingungen der Antriebsrolle und aller Umlenkrollen sowie Schleifbandvibrationen messbar. Diese Abweichungen können als Residuen aufsummiert und in R zusammengefasst werden, es ergibt sich somit ein Ausdruck für die dynamische Kraft der Maschine zu:

$$f_{md2} = m_s e \omega^2 \sin \omega t + \underbrace{\sum_i \rho_i \sin \omega_i t + \phi_i}_R \quad (10)$$

3 Modellierung der Kontaktrollen-Roboter-Interaktion

Im Prinzip wird für den Schleifprozess die kinematische Kette über das Werkstück am Endeffektor des Roboters und die Lauffläche der Kontaktrolle geschlossen, beide Systeme interagieren miteinander. Die wirkende Kontaktkraft $S(t)$ wird im wesentlichen über die Position des Endeffektors und der geometrischen Überschneidung mit der Kontaktrolle beschrieben. Berücksichtigt werden müssen dazu die beiden Winkel Θ_{30} und α , um die geometrische Beziehung zu komplettieren. Die Distanz u_0 ist konstant und beschreibt den Ausgangswert, hinzu kommt $u(t)$ als geometrisches Mass für die Distanz zwischen beiden Systemen während dem Prozess [Abb. 5]:

$$u(t) = l_1 \cos \Theta_{10} + l_2 \cos \Theta_{20} + r(f) \cos \alpha + x_s - \Delta \Theta_1 l_1 \sin \Theta_{10} - \Delta \Theta_2 l_2 \sin \Theta_{20} \quad (11)$$

Der Spanabtrag des Bearbeitungsprozesses kann mit dem Coulomb'sche Reibgesetz erklärt werden. Bandschleifen erfordert kein Kühlschmiermittel und das Schleifband ist immer in Relativbewegung zum Werkstück, d.h. es liegt trockene Gleitreibung vor [9]. Der Abtrag ist proportional zur Reibkraft F_R , diese ist relativ zur normalen Kontaktkraft N_t und über den Reibungskoeffizienten μ berechenbar:

$$F_R = \mu * N_t \quad (12)$$

die normale Kontaktkraft wird für diesen Fall zu:

$$N_t = S(t) \cos(\Theta_{30} - \alpha) \quad (13)$$

und der Reibungskoeffizient als zeitlich variabel:

$$\mu = \mu(t); \text{ abhängig vom Schleifbandverschleiss} \quad (14)$$

Der Reibungskoeffizient μ muss während dem Prozess gemessen werden, weil er vom Schleifbandverschleiss abhängig ist und sich stetig verändert. Zudem ist die Kontaktbedingung sowohl kraft- als auch wegbestimmt. Das kann analytisch wie folgt unterschieden werden (s. auch Abb. 5 rechts):

$$N_t = S(t) \cos(\Theta_{30} - \alpha) = \begin{cases} d_t \delta + k_t \delta & \text{if } \delta = u(t) - u_0 > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (15)$$

Die normal wirkende Kontaktkraft N_t bzw. Schleifkraft $S(t)$ wird in Gleichung (15) über die Variable δ bestimmt, einem Mass für die geometrische Überschneidung beider Systeme. Diese Fallunterscheidung bestimmt die Kontaktsituation im Modell und hilft, die Kontaktkraft auszuweisen. Das Spanabtragsvolumen kann über die Kontaktkraft, den Reibungskoeffizienten und die Kontaktfläche in Abhängigkeit zur Schleifzeit berechnet werden.

4 Systematische Modellvereinfachung

Die bisherigen Gleichungen beschreiben die nichtlineare Roboter-Kontaktrollen-Dynamik und können unter bestimmten Voraussetzungen weiter vereinfacht und sogar in ein äquivalentes translatorisches Modell überführt werden.

Während des Schleifband-Werkstück-Kontakts ändert der Roboter nur geringfügig und relativ langsam seine Achspositionen, im Gegensatz zu den Zeitabschnitten, in denen nicht geschliffen wird. Abbildung 6 zeigt die Hauptcharakteristik dazu. Der Roboter muss das Werkstück regelmässig umorientieren, um die nächste Oberflächenpartie schleifen zu können. Während diesen Manövern besteht kein Kontakt, die Drehwinkel $\Theta_{10}, \Theta_{20}, \Theta_{30}$ ändern sich stark und die Überschneidung ist Null: $\delta=0$. Anders im Kontaktfall, die Drehwinkel $\Theta_{10}, \Theta_{20}, \Theta_{30}$ ändern sich nur geringfügig und die Überschneidung ist grösser Null: $\delta>0$. Weil für die schnellen Manöver kein Kontakt mit dem Schleifband besteht, dürfen die Formeln für den Roboter stark vereinfacht werden. Weiter ist der Einfluss des Spanabtrages auf die Überschneidungsvariable δ als sehr gering anzunehmen, da das Werkstück immer in Bewegung ist und somit konstant Material zugeführt wird.

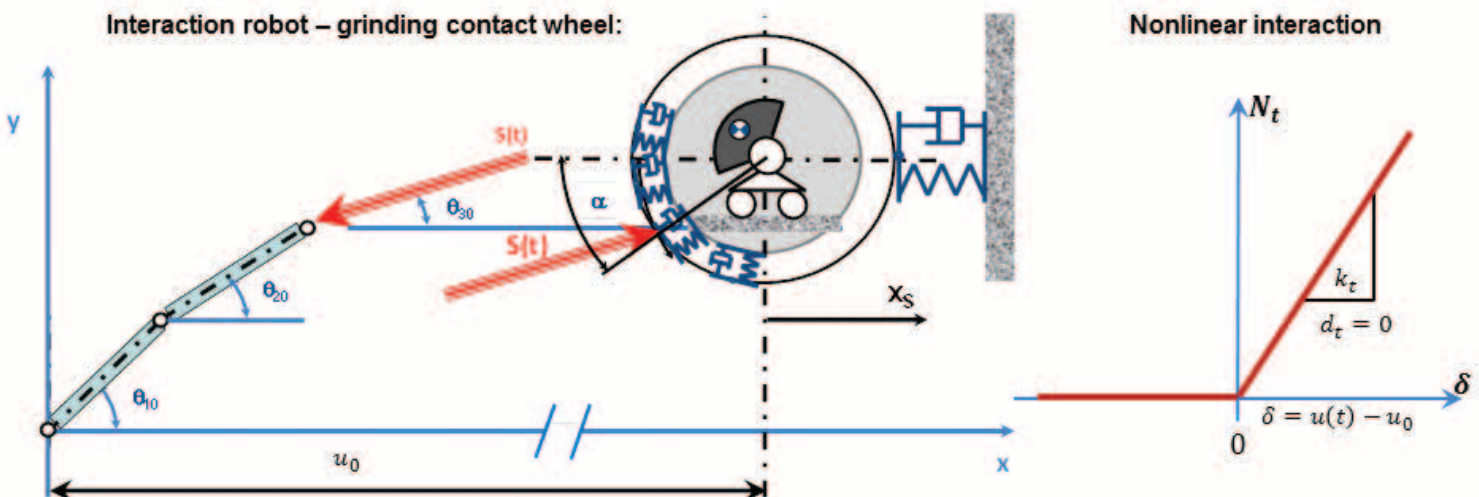


Abbildung 5: Darstellung zur Kontaktmodellierung

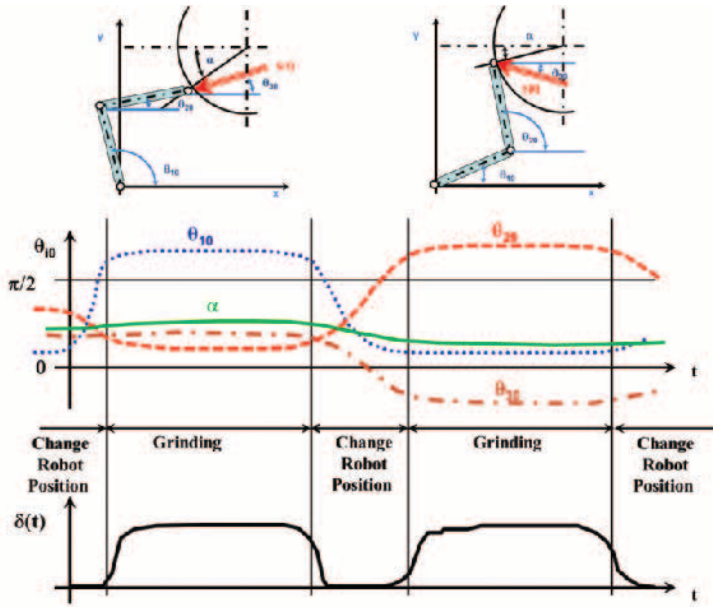


Abbildung 6: Hauptcharakteristik der Roboterbewegung und der Auswirkungen

Zwischen zwei Schleifabschnitten wird das Werkstück umorientiert. Gemäss der Störungsrechnung werden folgende Annahmen formuliert:

- Die geometrische Überschneidung $\delta(t)$ beider Systeme ist die Steuervariable des vereinfachten Modells:

Annahme $\dot{\theta}_{10} \ll 1, \ddot{\theta}_{10} \ll 1$

Daraus folgt $\dot{\theta}_{10} \ll \Delta\dot{\theta}_i, \ddot{\theta}_{10} \ll \Delta\ddot{\theta}_i$

- Die Differenz der beiden Drehgelenkwinkel ist

$$|\theta_{10} - \theta_{20}| \approx \frac{\pi}{2}$$

Zusätzlich wird der Momentenvektor mit den Gravitationskräften gleichgesetzt:

$$\underline{\Delta L'} = \begin{Bmatrix} \Delta M_1 - \Delta M_2 \\ \Delta M_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (m_1 + m_2)g s_1 \sin \theta_{10} \\ m_2 g s_2 \sin \theta_{20} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

Konsequenterweise führen diese Annahmen mit den bisherigen Gleichungen (4-6) zu vereinfachten Matrixformen für den Roboter:

$$\begin{aligned} [M] &= \begin{bmatrix} m_1 s_1^2 + m_2 l_2^2 + J_{z1} & 0 \\ 0 & m_2 l_2^2 + J_{z2} \end{bmatrix} \\ [D] &= \begin{bmatrix} d_1 + d_2 & -d_2 \\ -d_2 & d_2 \end{bmatrix} \\ [K] &= \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

Die gesamte Systemdynamik kann in ein translatorisches System mit drei Freiheitsgraden überführt werden, indem mit einer frei wählbaren charakteristischen Länge λ der aktuelle Drehwinkel in eine Distanz transformiert wird. Dazu wird $x_i := \Delta\theta_i \lambda$ eingeführt. Für die transformierten mechanischen Parameter des Roboters gilt:

$$\tilde{m}_i := \frac{m_i}{\lambda}, \quad \tilde{d}_i = \frac{d_i}{\lambda}, \quad \tilde{k}_i = \frac{k_i}{\lambda} \quad (18)$$

Schlussendlich erhalten wir die folgende vereinfachte Differentialgleichung beider Systeme im Kontaktfall:

$$\begin{aligned} [M]\ddot{x} + [D]\dot{x} + [K]x &= \underline{S} \\ \begin{bmatrix} \tilde{m}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{m}_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{d}_1 + \tilde{d}_2 & -\tilde{d}_2 & 0 \\ -\tilde{d}_2 & \tilde{d}_2 & 0 \\ 0 & 0 & d_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{k}_1 + \tilde{k}_2 & -\tilde{k}_2 & 0 \\ -\tilde{k}_2 & \tilde{k}_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_s \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S(t) \cos \theta_{30} + f_m + S_0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

Diese Matrixform stellt einen äquivalenten Dreimassenschwinger mit Kontaktbedingung dar [Abb. 7], wobei die Parameter mit $\sim$ stark variieren können. Diese dürfen nur für einen kurzen Kontaktzeitraum, in dem der Roboter seine Achswerte nur geringfügig ändert und keine Singularität aufweist, um einen Arbeitspunkt als konstant angenommen werden. Die dynamischen Eigenschaften des Systems lassen sich durch dieses Vorgehen für verschiedene Arbeitspunkte und unterschiedliche Roboterstellungen ermitteln.

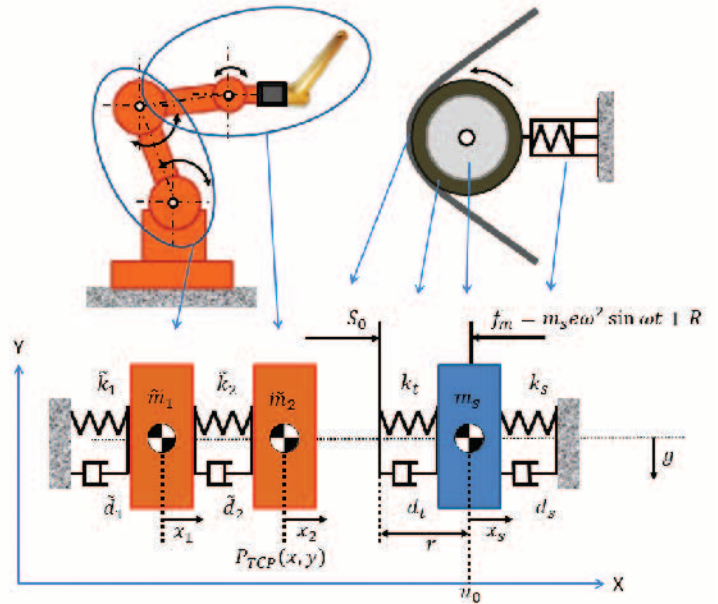


Abbildung 7: Modellvereinfachung zum Dreimassenschwinger mit Kontaktbedingung

Validation

Diese analytische Prozessbeschreibung ist als numerisches Simulationsmodell in Matlab Simulink implementiert und konnte mit mehreren Testmessungen validiert werden. Für diesen Vorgang ist eine gute Identifikation des Roboters und der herstellereigenen Eigenschaften notwendig. Weiter sind wesentliche Parameter nur unzureichend bekannt und müssen experimentell gemessen, beziehungsweise abgeschätzt werden. Die Simulationsergebnisse zeigen bezüglich der Dynamik trotz starken Modellreduktionen, 6-rotative-DoF des Roboters auf 2-translative-DoF, und vorliegenden Modellunsicherheiten eine Übereinstimmung mit den durchgeführten Messungen [Abb. 8].

Fazit

Das Problem ist mit allen bisherigen Prozesskenntnissen modelliert und in der Lage, die dynamischen Verhaltensweisen abzubilden. Das gewonnene Prozessmodell kann durch Identifikation der Parameter auf eine spezifische, bestehende Ro-

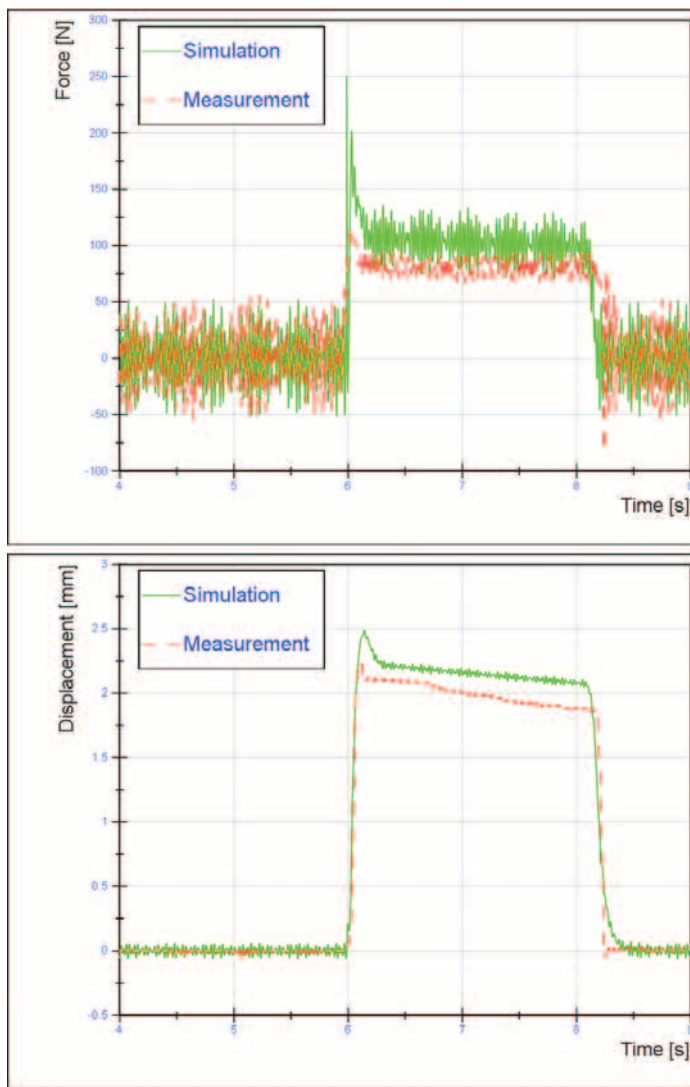


Abbildung 8: Modellvalidation

boterschleifanlage angepasst werden und ermöglicht so neue Einblicke in die vorliegende Prozessdynamik.

Ausblick

Mit den Ergebnissen der Modellierung können neue Ansätze für die robotergestützte Fertigung an Bandschleifmaschinen entwickelt werden, ohne die Produktion zu beeinträchtigen oder eine Versuchsanlage bereitstellen zu müssen. Die zu entwickelnde Lösung kann anschliessend in eine Schleifanlage integriert werden und ist nach einem Vergleich mit dem bekannten Simulationsverhalten einsatzbereit.

Projektteam

Max Edlmann, wissenschaftlicher Assistent, MSc FHNW in Engineering (Industrial Technologies),
max.edlmann@fhnw.ch

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

Referenzen und Literaturverzeichnis

- [1] Abgebildete Armaturen und Roboterzelle Eigentum der Fa. KWC AG in Unterkulm
- [2] Song, Y.; Lv, H. und Jia, P: An Adaptive Modeling Approach Based on ESN for Robotic Belt Grinding. Proceedings of the 2010 IEEE, International Conference on Information and Automation. China, Harbin: IEEE. 2010
- [3] Kuhlenkötter, Bernd und Krewet, Carsten: Gemeinsamer

FuE-Abschlussbericht zum Verbundvorhaben ePo, Verfahren zur effizienten Optimierung von robotergestützten Schleif- und Polierprozessen. Durchgeführt im Förderprogramm „Fertigung für die Produktion von morgen“. 2005

- [4] Čabaravdić, Malik: Beitrag zur Optimierung des Spanvolumens beim industrierobotergetstützten Bandschleifen freigeformter Werkstücke. Bonn: Dissertation, Technische Universität Dortmund. 2008
- [5] Schüppstuhl, Thorsten: Beitrag zum Bandschleifen komplexer Freiformgeometrien mit Industrierobotern. Aachen: Shaker Verlag. 2003
- [6] Sanders, J.; Verhulst, F. und Murdock, J.: Averaging Methods in Nonlinear Dynamical Systems. Springer, London. 2007
- [7] Siciliano, B. und Khatib, O.: Springer Handbook of Robotics. Springer, London. 2008
- [8] Abgebildete Kontaktrolle, Fa. C. Hilzinger-Thum GmbH & Co KG
- [9] Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik, 19. Auflage. Fachbuchverlag, Leipzig. 2007

Signalverarbeitung in programmierbarer Logik

Wo Prozessoren in ihrer Leistungsfähigkeit nicht mehr ausreichen, wird programmierbare Logik in Form von FPGA (Field Programmable Gate Arrays) eingesetzt. Hunderte von Rechenoperationen können damit in zwei, drei Clockzyklen erledigt werden. Typische Anwendungsbeispiele finden sich in der Bildverarbeitung, der Kommunikations- und Übertragungstechnik, im Bereich schneller Regleralgorithmen sowie der Signalanalyse. Im letzteren Bereich ist es vor allem die breitbandige Spektralanalyse, die in Forschungsgebieten wie der Atmosphärenphysik oder der Radioastronomie zur Anwendung kommt.

Bruno Stuber

Die Leistungsgrenze wird im Bereich der Spektralanalyse stetig nach oben geschoben: Mit einem einzelnen FPGA lassen sich heute in Echtzeit kontinuierlich Bandbreiten von etwa 2 GHz bei Abtastraten von 4 GS/s (bei 10 Bit) mit einer Auflösung von ca. 32'000 Kanälen spektral analysieren.

Schlüsseltechnologie FPGA

Die Leistungsfähigkeit der FPGA beruht auf dem „parallel processing“, den auf höchste Performance getrimmten Funktionseinheiten („Logikzellen“), der flexiblen Konfigurierbarkeit der Logik, in Verbindung mit den fortschrittlichsten und dichtesten Halbleitertechnologien. Die prominentesten Hersteller sind Xilinx und Altera.

Stichwort „Logikzellen“: Für die Signalverarbeitung sind die internen RAM-Blöcke und die (fixed-point) Multiplizierer die Schlüssel-Elemente. Zusammen mit Addieren, Multiplexern und Steuerlogik lassen sich damit praktisch alle Signalverarbeitungs-Aufgaben lösen. Die grössten Bausteine weisen bis zu tausend Multiplizierer auf (Wortbreite der beiden Operanden: 18x24 Bit) und mehrere Megabyte Dual Port RAM, die in kleineren Blöcken zur Verfügung stehen. An der Peripherie steht eine Vielzahl von Interface-Funktionsblöcken zur Verfügung, beispielsweise ultraschnelle serielle Ports, die eine Datenübertragung von mehreren Gigabit pro Sekunde erlauben. Auch Anbindungen zu externen DDR RAM oder zu Bussystemen wie PCIe sind ohne weiteres möglich. Die grösseren Bausteine enthalten zudem 1 oder mehrere Prozessor-Kerne, welche flexibel konfiguriert und mit einem Programm-Code geladen werden können. Während die Logikzellen die Daten in einer Pipeline-Architektur kontinuierlich verarbeiten, kann der Prozessor Steuerungsaufgaben erledigen oder kompliziertere, kontextabhängige Rechenschritte übernehmen.

Die Programmierung der Logik erfolgt mittels der Beschreibungssprache VHDL. Um die höchste Performance bezüglich Datendurchsatz zu erreichen, muss die logische Funktion auf einem elementaren Niveau beschrieben werden, gleichzeitig muss auch die optimale logische Struktur genügend genau vorgegeben werden. Nur so wird die anschliessende Logiksynthese die bestmögliche Abbildung auf die FPGA Zellen erzeugen.

Das Projekt: Spektralanalyse am technologischen Limit

Im Rahmen eines KTI-Projekts wird die FPGA basierte Spektralanalyse bezüglich Funktion und Performance erweitert und auf Höchstleistung getrimmt. Die Key Features der Entwicklung sind:

- 1) Konfigurierbare Architektur des Berechnungs-Kerns (FFT Core), zugeschnitten auf die verschiedenen sogenannten Digitizer Hardware Plattformen des Industriepartners: Die HW Versionen unterscheiden sich vor allem bezüglich Anzahl Signal-Eingänge, Abtastraten bzw. den damit verbunden Bandbreiten und ADC Wortbreiten. Die Palette reicht von 2-Kanal 500 MS/s, 16 Bit ADC bis hin zu 2x4 GS/s mit 10 Bit ADC.
- 2) Erweiterung der konventionellen FFT (Fast Fourier Transform) zur Digitalen Filterbank:

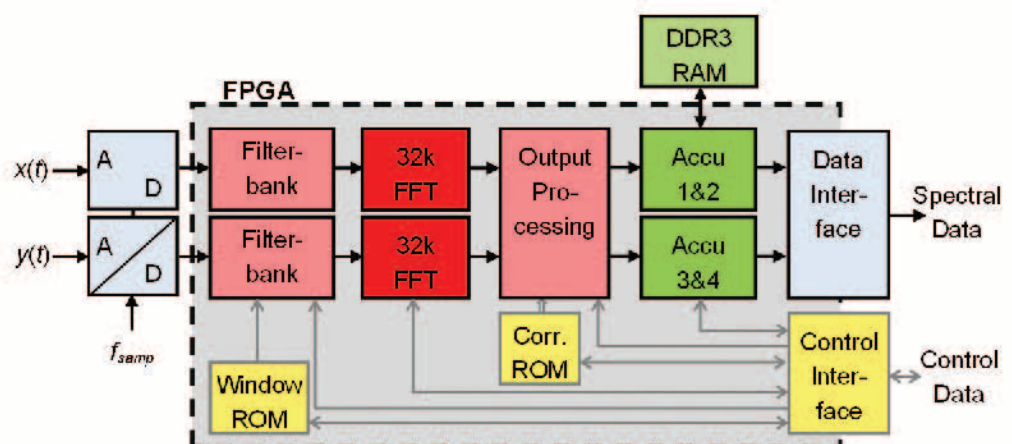


Abbildung 1: Struktur der 2-Kanal Version des FFT-Cores im FPGA

Die spektrale Auflösung bzw. Separation der Frequenzkanäle wird damit erheblich verbessert. Implementiert ist eine 32k FFT (2^{15} Kanäle).

- 3) Ein- oder zwei-kanaliger Betrieb des Spektrometers, selektierbar im Betrieb, mit erweitertem back end processing: Das klassische Spektrometer (beispielsweise in der Radioastronomie) benötigt einen Kanal und akkumuliert das Power-Spektrum fortlaufend, um das Rauschen auszumitteln. Neu kann parallel dazu auch das Quadrat des Power-Spektrums akkumuliert werden, um damit Störquellen in einzelnen Frequenzkanälen zu detektieren (-> Curtosis Analysis), weiter ist auch das komplexe Spektrum verfügbar.

Im Zweikanal-Betrieb halbiert sich die Abtastrate, dafür stehen für viele Anwendungen sehr interessante Ausgangsfunktionen zur Verfügung: Nebst den Power-Spektren kann das Kreuzleistungs-Spektrum P_{xy} gerechnet werden. Weiter stehen die Summe und die Differenz der Spektren zur Verfügung, womit die beiden Seitenbänder (oberes und unteres) separiert werden können. Phasen- oder Amplitudenfehler der beiden Eingangskanäle können mittels einer programmierbaren Korrekturtabelle reduziert werden.

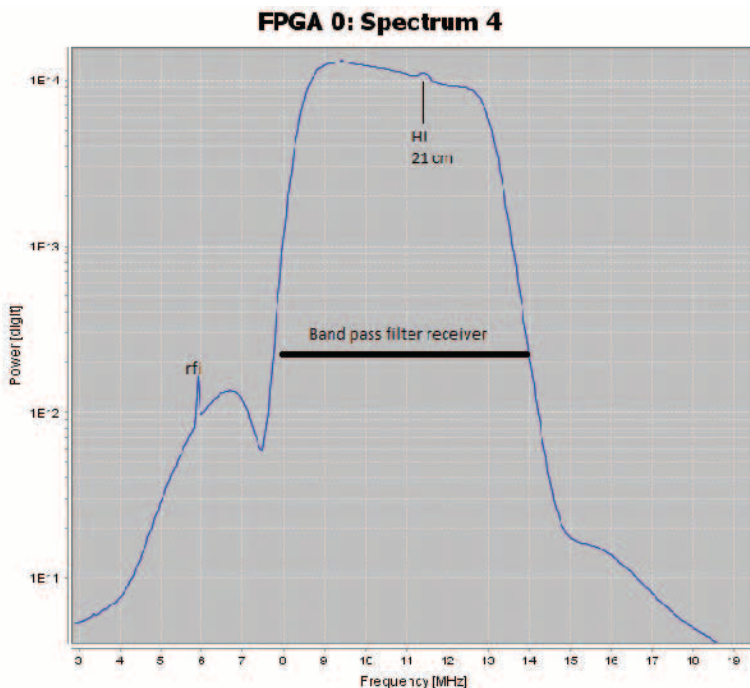


Abbildung 2: Messung der Wasserstofflinie einer galaktischen Quelle der Milchstrasse auf 21cm Wellenlänge: Peak bei 1420.4 MHz, heruntergemischt auf 10.7 MHz. (Quelle: Ch. Monstein, ETHZ, Messung auf Diavolezza).

Herausforderung Arithmetik

Alle Rechnungen im FPGA erfolgen in Fixed-Point-Arithmetik (analog zur Integer-Rechnung in Prozessoren), meist mit Wortbreiten von etwa 16 bis 24 Bit. In der FFT-Pipeline durchlaufen die Datenwerte etwa zwei Dutzend Multiplikationsstufen und ebenso viele Additionen. Jede Operation vergrössert die Wortbreite: Während die Addition ein Carry-Bit benötigt, addieren sich bei der Multiplikation die Wortbreiten. Es ist somit unumgänglich, die Wortbreiten entlang des Verarbeitungspfad systematisch zu kürzen. Ausgehend von der Wortbreite des AD-Wandlers kann zwar eine gewisse Erweiterung entlang der Pipeline-Stufen erfolgen, dies erfordert aber mehr RAM-Blöcke zur Zwischenspeicherung oder auch breitere Multiplizierer ($> 18 \times 24$ Bit).

Das Begrenzen und Kürzen der Wortbreiten ist im Hinblick auf das akkumulierte Spektrum eine äusserst subtile Angelegenheit: Jede „unausgewogene“ Massnahme kann sich sofort im Spektrum zeigen durch Effekte wie: Treppen (platforming effect), Sprungstellen, Feinstrukturen wie beispielsweise die Erhöhung jeder vierten Linie, generell ein erhöhter Rauschpegel im Spektrum oder ein unebener, eventuell badewannenförmiger Verlauf des Spektrums - alles Effekte, die sich in den typischen Anwendungsbereichen negativ auswirken. Im Rahmen des Projekts wurden diese Effekte systematisch untersucht und mittels Matlab und bitgenauer fixed-point Rechnung analysiert. Jede Arithmetik-Stufe wurde optimiert, in einzelnen Stufen wird gar ein convergent rounding angewendet, da auch das übliche nearest Rundungsverfahren noch einen minimalen Offset erzeugt.

Fazit

Mit diesem Projekt wurde die Leistungsfähigkeit der FPGA basierten Spektralanalyse erneut nach oben, an die vordere Front geschoben. Der Funktionsumfang im 1- und 2-Kanal Betrieb wurde erheblich erweitert und ist konfigurierbar im Betrieb (on the fly). Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten für ein breites Feld von Anwendungen, insbesondere in der Radioastronomie und der Atmosphärenphysik.

Projektteam

Prof. Bruno Stuber, Dozent, bruno.stuber@fhnw.ch
 Daniel Treyer, MSc FHNW in Engineering, wissenschaftlicher Mitarbeiter, daniel.treyer@fhnw.ch
 Dino Zardet, wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Mikroelektronik, dino.zardet@fhnw.ch
 Michael Roth, MSc in Engineering (MSE)

Projektpartner im KTI-Projekt

Industriepartner und Hersteller der Digitizer Produktlinie: Agilent Technologies, Genf
 Anwender: Institute of Applied Physics, Universität Bern; Institute for Astronomy, ETH Zürich

Induktive Erwärmung von Blechpaketen

Im vorliegenden Projekt konnte anhand von theoretischen Überlegungen, Berechnungen, Simulationen sowie Versuchsaufbauten gezeigt werden, dass es möglich ist, Blechpakete in kurzer Zeit aufzuheizen und danach auf einer konstanten Temperatur zu halten. Der Aufheizprozess konnte hiermit um etwa den Faktor 5 bis 10 gegenüber der bisherigen Methode beschleunigt werden.

Peter Ganzmann

In diesem Projekt geht es darum, den Backprozess, d.h. das Verkleben von Blechpaketen zu beschleunigen. Blechpakete bestehen aus etwa 50 bis 200 einzelnen Blechen von ca. 200 mm² und einer Dicke von ca. 0.3 mm. Zwischen den einzelnen Blechen befindet sich ein spezieller Klebstoff, der bei einer Temperatur von ca. 200° C vernetzt. Das Blechpaket soll nun in möglichst kurzer Zeit auf diese Temperatur aufgeheizt werden und anschliessend bis zur kompletten Vernetzung des Klebstoffes konstant gehalten werden.

Bisher wurde das Aufheizen in speziellen Öfen durchgeführt, was einen hohen Zeitaufwand zur Folge hatte. Somit kam die Idee, die Hitze nicht von aussen zuzuführen, sondern in den Blechpaketen selbst zu erzeugen. Dies ist nur mittels über Induktion erzeugte Wirbelströme in den einzelnen Blechen möglich. Dank dem Ohmschen Widerstand des Materials entsteht im Inneren der Bleche die zur Erhitzung benötigte Heizleistung.

Theoretische Betrachtungen

Geschichtete Blechpakete werden in Transformatoren und Elektromotoren verwendet, um möglichst wenig Verlustleistung durch Wirbelströme zu erzeugen. Die Feldlinien des magnetischen Feldes verlaufen in Richtung der Bleche. In der vorliegenden Anwendung sollen jedoch Wirbelströme erzeugt werden, um eine möglichst hohe Verlustleistung d.h. Heizleistung zu erhalten. Daher müssen die Bleche rechtwinklig zur Richtung der Feldlinien angeordnet werden.

Dank der Simulationsmethode mittels Finiten Elementen (FEM) konnte schon relativ rasch gezeigt werden, dass es möglich ist, Blechpakete induktiv aufzuheizen. Als erste Näherung und zur Bestätigung der Annahme, dass die Methode funktionieren könnte, wurde mit einer 2D-Simulation begonnen.

• 2D-Simulation

Zu Beginn wurde mit der 2D-Simulation abgeklärt, ob es überhaupt möglich ist, die zum Aufheizen eines geschichteten Blechpaketes benötigte Energie magnetisch einzukoppeln. Die ersten Resultate waren ermutigend – trotz anfänglicher Skepsis. Es zeigte sich, dass die Stromdichte in der Nähe der Spule grösser ist als zur Mitte hin, so dass der dadurch entstehende Wärmefluss einen zeitlichen Einfluss haben wird. Homogen lässt sich also das Blechpaket nicht aufheizen.

Daraus konnten einige Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Die Frequenz des eingekoppelten Stromes spielt eine fundamentale Rolle, was nicht weiter erstaunt, da der Skin-Effekt, d.h. die Verminderung der Eindringtiefe der Wirbelströme bereits ab etwa 5kHz stark zum Tragen kommt. Bei 5 kHz ist der wirksame Querschnitt auf ca. 40% verringert. Eine Erhöhung der Frequenz bringt keine Verbesserung der Heizleistung zustande.

- Am Rand, nahe der Spule, ist die Stromdichte wesentlich grösser als im Inneren eines Bleches. Damit der Temperaturunterschied von aussen nach innen ein gewisses Mass nicht übersteigt, muss die Zeitdauer für den Wärmeaustausch berücksichtigt werden. Aus diesem Grund darf die momentane Leistung nicht zu gross gewählt werden. Somit lässt sich die Aufheizzeit nicht beliebig verkürzen.

- Die obersten sowie die untersten Bleche eines Paketes werden um einiges stärker erwärmt als die Bleche im Inneren des Pakets. Somit ist es sinnvoll, jeweils ein Abschlussstück, welches nicht zum eigentlichen Paket gehört, anzufügen. Dadurch wird gewährleistet, dass jedes Blech des Paketes etwa dieselbe Heizleistung erfährt.

• 3D-Simulation

Die 3D-Simulationen wurden mit dem Programm Multi-Physics der Firma Comsol durchgeführt. Ziel dieser Simulationen war, die Resultate der 2D-Simulationen zu überprüfen. Es hat sich gezeigt, dass die wichtigsten Aussagen aus der 2D-Simulation mit der 3D-Simulation bestätigt werden konnten.

Realisierung

• Spule und Temperaturmessung

Die Spule, die zur Generierung des für die Erhitzung des Blechpaketes benötigten Magnetfeldes dient, ist sehr einfach aufgebaut: Sie besteht aus insgesamt 234 Windungen in 3 Lagen. Ihr Innendurchmesser ist knapp grösser als das Blechpaket. Die Länge der Spule soll so gross sein, dass das Blechpaket mit den beiden Abschlussstücken vollständig umgeben ist. Dies führt zu einer homogenen Feldverteilung. Die Induktivität der Spule liegt bei ca. 5 mH. In der Mitte der Spule befindet sich ein Loch für die Aufnahme eines Thermopiles zur Messung der Paket-Temperatur. Ein Thermopile misst die Temperatur über die IR-Strahlung eines Körpers. Die Temperaturmessung ermöglicht die Steuerung der Leistung während der gesamten Zeitdauer sowie den Ausschaltzeitpunkt bei Erreichen der Endtemperatur.

• Steuerungs- und Leistungsteil

Die im Institut für Automation entwickelte Steuerung besteht im Wesentlichen aus einer von einem Mikroprozessor gesteuerten H-Brücke, in deren Mitte die Spule angeordnet ist. Als Parameter lassen sich die Schaltfrequenz sowie das Tastverhältnis (PWM) über Drucktasten einstellen. Die Leistung ist sowohl zur Frequenz als auch zum Tastverhältnis proportional. Zu Beginn des Aufheizens wird das Tastverhältnis maximal eingestellt und ab einer bestimmten Temperatur reduziert. Diese beiden Parameter lassen sich über Bedientasten einstellen, um somit die Temperatur, bei der die Vernetzung beginnt, möglichst rasch zu erreichen. Danach wird nur noch die Leistung eingekoppelt, die für die Konstanthaltung der Temperatur benötigt wird. Allerdings ist die Temperaturmessung nicht sehr präzise, was auf das IR-Messprinzip mit einem Thermopile zurückzuführen ist. Die stark reflektierende Oberfläche des Blechpaketes ist die hauptsächliche Ursache dieser Ungenauigkeit.

• Messungen

Die Messungen am realen Aufbau zeigen, dass die Simulationen grösstenteils korrekt sind. Sie verweisen jedoch auch auf zusätzliche Probleme. Die Abbildung 1 stellt die simulierte Stromdichte in drei Blechen (1, 2 und 17) eines aus 33 Blechen bestehenden Blechpaketes bei einer Frequenz von 2 kHz dar: Blech 1 weist die grösste Stromdichte auf und wirkt somit als magnetische Abschirmung für die weiteren Bleche. Bleche 2 und 17 zeigen, dass sich ab hier die Stromdichte der Bleche im Inneren nicht mehr stark unterscheidet.

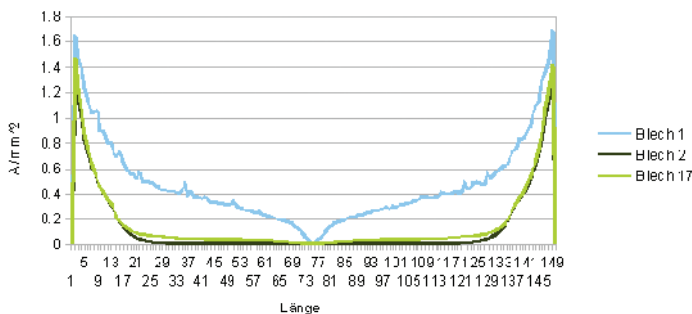


Abbildung 1: Wirbelstrom-Dichte in 3 verschiedenen Blechen

Die folgenden beiden Diagramme zeigen beispielsweise den Einfluss der Feldverzerrung an den Enden des Paketes:

Abbildung 2 zeigt den Temperaturunterschied, gemessen in der Mitte und am Ende des Paketes, sowie den Mittelwert der beiden Verläufe. Dies ist eine Folge der Ausrichtung der Bleche zum magnetischen Feld (90 Grad), wobei dadurch die äusseren Bleche die innen liegenden magnetisch abschirmen. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurde an beiden Enden je ein Abschlussstück, welche dieselben Eigenschaften wie das Paket aufweisen, zugefügt.

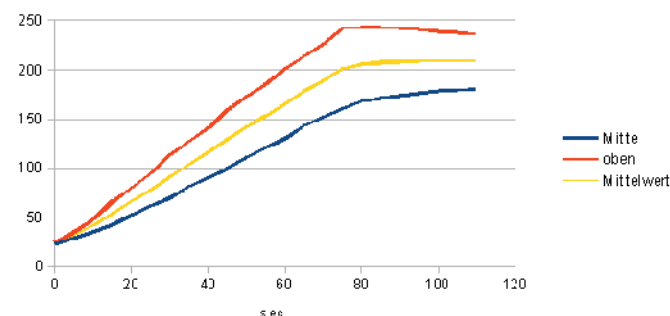


Abbildung 2: Temperaturverlauf ohne Abschlussstücke

Die Abbildung 3 zeigt, dass der Temperaturunterschied wesentlich kleiner wird, wenn an den beiden Enden des Paketes jeweils ein Abschlussstück hinzugefügt wird.

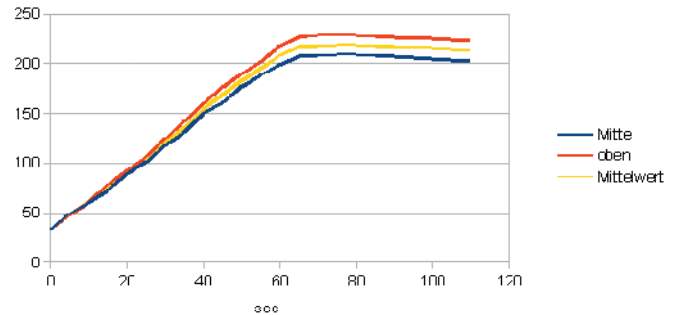


Abbildung 3: Temperaturverlauf mit 30mm langen Abschlussstücken

Fazit

Bis zum jetzigen Zeitpunkt konnte gezeigt werden, dass es sinnvoll ist, die Erwärmung von Blechpaketen induktiv durchzuführen. Die Aufheizzeit kann gegenüber der herkömmlichen Erwärmung in Heizöfen stark verkürzt werden. Die Heizleistung lässt sich leicht über das Verändern von lediglich zwei Parametern einstellen. Der ursprüngliche Wunsch, die Leistung über die Temperaturmessung zu regeln, konnte (noch) nicht erfüllt werden, da die Farbe und der Reflexionsgrad der Oberfläche des Blechpaketes nicht konstant ist, und somit der ermittelte Temperaturwert relativ stark variiert. Als Erweiterung kann es sinnvoll sein, das Material der Halterung (sog. Kavität) welche zuständig für die korrekte Ausrichtung der Bleche ist, ebenfalls induktiv zu erwärmen.

Projektteam

Prof. Peter Ganzmann, Dozent, peter.ganzmann@fhnw.ch

Prof. Hans Gysin, Dozent, hans.gysin@fhnw.ch

Matthias Meier, Dozent, matthias.meier@fhnw.ch

Sandro Wiedmer, MSc FHNW in Engineering (MSE), wissenschaftlicher Mitarbeiter, sandro.wiedmer@fhnw.ch

Systemunabhängiger Rezepthandler

Flexibel automatisierte Anlagen werden über Rezepte konfiguriert. Damit dies bei der Firma Schmid Automation AG einheitlich, d.h. unabhängig vom Lieferanten des Steuerungssystems erfolgen kann, wurde Thomas Blaser im Rahmen seiner Master-Arbeit des Weiterbildungsstudiengangs MAS Automation Management beauftragt, einen systemunabhängigen Rezepthandler zu entwickeln.

Thomas Blaser, Jürg Peter Keller

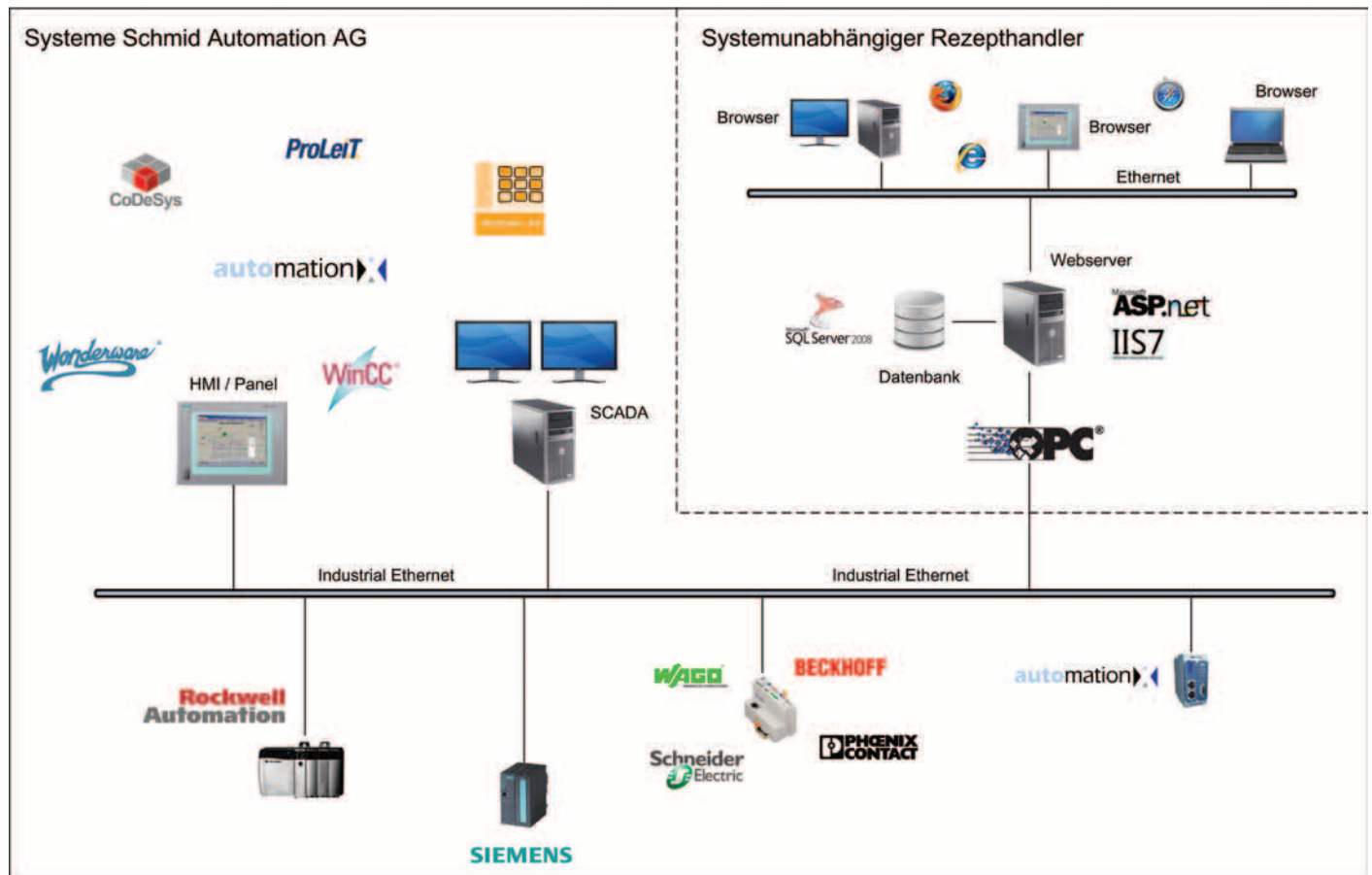


Abbildung 1: Systemübersicht und Grobkonzept

Moderne Anlagen erlauben eine flexible Produktion unterschiedlicher Produkte. Die dazu nötigen Prozessschritte mit den dazugehörigen Produktionsparametern werden, in Anlehnung an das Kochen, als Rezept bezeichnet. Rezepte müssen erstellt und verwaltet und entsprechend der Produktionsplanung auf die Anlagensteuerungen geladen werden. Diese Funktionen werden durch einen Rezepthandler realisiert. Formelle Anforderungen an ein Rezept werden in der ISA-SP 88.02-Norm festgelegt. Auch die OPC-Batch-Spezifikation definiert ein standardisiertes Interface für Rezepthandler. Trotzdem sind die käuflichen Produkte grösstenteils systemspezifisch. Für die Firma Schmid Automation AG, dem Auftraggeber der Master-Arbeit, war es aber wichtig, mit einem einzigen Rezepthandler die Steuerungen verschiedener Hersteller parametrisieren zu können (siehe Abb. 1).

Zur Lösung dieser anspruchsvollen Arbeit mussten drei wesentliche Aufgaben gelöst werden: In einem Konzept wurde festgelegt, mit welcher Hard- und Softwarestruktur die Aufgabe gelöst werden soll. Eine weitere wichtige Designaufgabe bestand in der Festlegung der Datenbankstruktur zur Beschreibung fast beliebiger Rezepte. Die dritte Aufgabe umfasste das Design und die Realisierung des Benutzerinterfaces. Im Folgenden soll die Lösung dieser drei Aufgaben näher beschrieben werden.

Beschreibung des Rezepthandlers

In Abbildung 2 ist die Struktur des Rezepthandlers dargestellt. Für die Rezeptbearbeitung wurde eine Lösung gewählt, die auf Web-Technologie basiert. Dies ergibt eine grosse Flexibilität, d.h. das Userinterface kann über einen Webserver, z.B. auf einem Engineeringrechner oder auf der

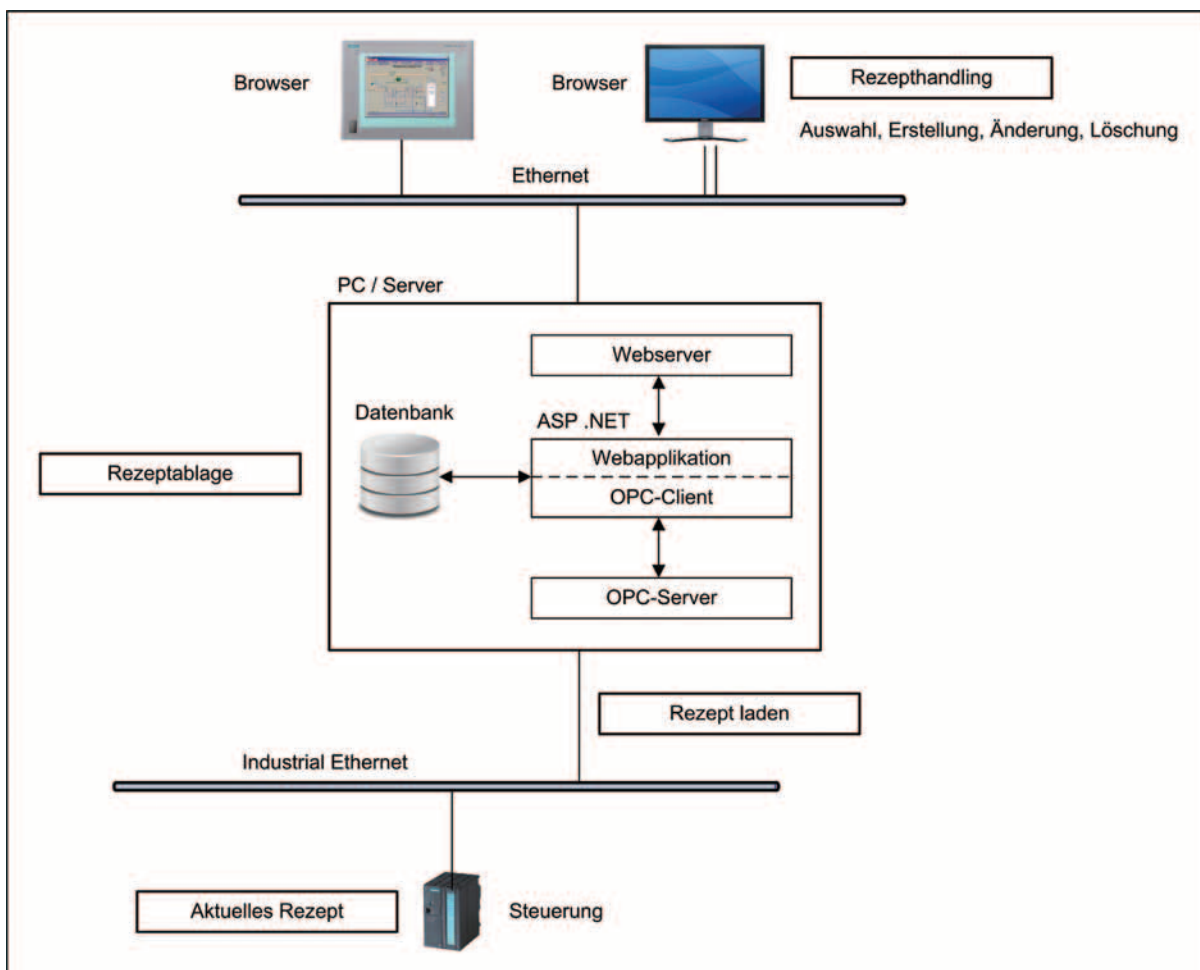


Abbildung 2: Struktur des Rezepthandlers

Anlagenbedienung benutzt werden. Die Schnittstelle zu den Steuerungen zum Laden der Rezepte wurde mit Hilfe von OPC-Servern realisiert. Diese liefern eine standardisierte Schnittstelle für den Rezipthandler und erledigen die herstellerspezifische Kommunikation mit den Steuerungen. Das Herzstück bildet eine Applikation, die als OPC-Client die Daten an verschiedene OPC-Server der Steuerungshersteller schickt und als Webapplikation mit dem Webserver kommuniziert. Zur Verwaltung der Rezeptdaten benutzt sie eine Datenbank. Die Webapplikation macht es möglich, die Rezepte über eine benutzerfreundliche Oberfläche auszuwählen, zu erstellen, zu bearbeiten oder wieder zu löschen.

Die einzelnen Rezepte werden in der Datenbank ähnlich wie in ISA SP88.02-Norm strukturiert. Folgende Konfigurationen sind enthalten:

- Anlage
- Steuerung
- Schrittkette
- Schritte
- Parameter

Dabei muss natürlich die Struktur der Rezepte mit der Steuerungsstruktur übereinstimmen. Jeder Produktionsablauf wird mit den vorangehend angegebenen Konfigurationselementen beschrieben. Die Anzahl Parameter sind auf 24 beschränkt, damit diese auch auf dem Benutzerinterface sinnvoll eingegeben werden können. Neben den eigentlichen Rezeptdaten müssen natürlich auch noch Informationen des Rezepthandlers, wie z.B. die Benutzerdaten und deren Rechte in der

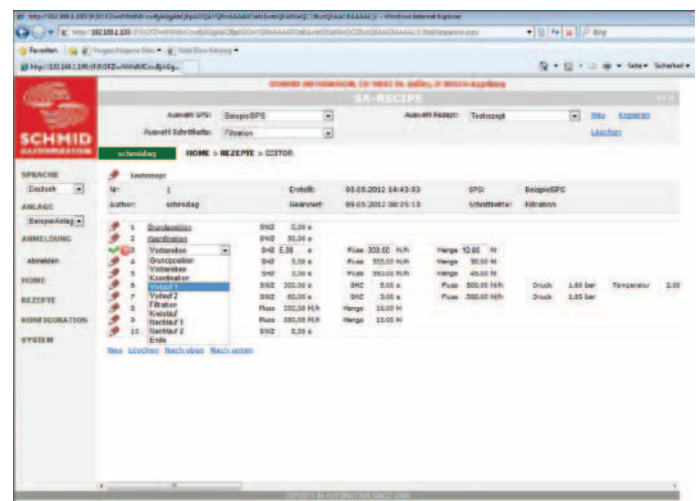


Abbildung 3: Benutzerinterface

Ein Beispiel für ein Benutzerinterface ist in Abbildung 3 für ein erfundenes Testprojekt dargestellt. Auf der Webseite „Editor“ können die Rezepte für die Schrittabläufe angelegt und bearbeitet werden. Es ist möglich, den Ablauf auch mit vorkonfigurierten Schritten zu definieren und die Parameterwerte zu erfassen. Im Schrittablauf können gleiche Schritte mehrmals mit unterschiedlichen Parametern verwendet werden. Der Vorteil ist, dass die Schritte in der SPS nur einmal vorhanden sein müssen. Dadurch können Speicherplatz und Projektierungsaufwand eingespart werden.

Der Rezepteditor ist selbsterklärend und benutzerfreundlich aufgebaut. Die Rezepte und Schritte können schnell und einfach angelegt werden. In der Abbildung 3 ist ersichtlich, wie

im Bearbeitungsmodus ein Schritt ausgewählt werden kann. Gleichzeitig ist es dem Anwender möglich, über die Texteingabefelder die Parameterwerte für diesen Schritt zu definieren. Ein erstellter Schritt kann mit einem Klick markiert und an eine andere Position verschoben oder gelöscht werden. Ganze Rezepte können auch kopiert werden. Das Rezept enthält ausserdem verschiedene andere Informationen. Es ist ersichtlich, welcher Benutzer das Rezept erstellt oder geändert hat. Das Erstellungsdatum und das Änderungsdatum sind aufgeführt. Die Zugehörigkeit des Rezeptes zu der SPS und der Schrittkette ist vorhanden. Mit diesen Informationen ist es dem Benutzer möglich, die Rezepte übersichtlich zu verwalten.

Für jede der verschiedenen Konfigurationsebenen wurde ein geeignetes Benutzerinterface erstellt. Eine implementierte Sprachumschaltung erleichtert die Anwendbarkeit des Tools im internationalen Umfeld.

Realisierung

Für die Realisierung des Rezepthandlers mussten verschiedene Systemkomponenten evaluiert werden. Tabelle 1 zeigt die untersuchten und ausgewählten Bausteine für die Realisierung des Rezepthandlers.

OPC-Komponenten

Bei der Evaluation der OPC-Komponenten wurden zuerst die verschiedenen OPC-Client Produkte getestet. Die Produkte enthalten zur Entwicklung eines OPC-Clients eine Toolbox mit einer .NET Bibliothek. In dieser Bibliothek sind verschiedene Klassen zur Implementierung eines Clients enthalten. Mit den Funktionen aus den Klassen können individuelle OPC-Clients entwickelt werden. Die getesteten Toolboxes enthalten die OPC-Spezifikation ‚Data Access‘.

Für die Implementierung des Rezepthandlers soll eine solche Toolbox verwendet werden, da die gleiche Technologie wie bei der Webapplikation vorhanden ist. So bleibt der systemunabhängige Rezepthandler transparent.

Webapplikation

Um die spezifischen Anforderungen des Auftraggebers zu erfüllen, soll die Webapplikation mit der .NET Technologie entwickelt werden. In der Firma Schmid Automation AG

ist bereits ein internes Know-how vorhanden. Der Firma kann mit dieser Technologie die Software des entwickelten Rezepthandlers selbständig betreuen oder weiterentwickeln.

Datenbank

Wie bei der Webapplikation ist auch für die Implementierung der Datenbank ein Know-how vorhanden. Es sind deshalb keine externen Produkte erforderlich. Als Datenbank wird der Microsoft SQL Server Express verwendet. Dieser SQL-Server ist kostenlos und kann Daten bis maximal 4 GB verwalten. Für den Rezepthandler ist diese Datenmenge ausreichend.

Webserver

Als Webserver kann ausschliesslich der Microsoft IIS verwendet werden. Dieser Webserver ist für die Bereitstellung der .NET Webapplikation erforderlich. Die Benutzereingaben des Rezepthandlers werden über einen Internetbrowser erfasst und dem Webserver zur Verarbeitung gesendet.

Schlussfolgerung

In der Masterarbeit ist es gelungen, einen systemunabhängigen Rezepthandler zu erstellen. Die webbasierte Lösung erlaubt eine sehr flexible Anwendung des Tools. Die Rezepte sind zentral in einer leistungsfähigen, relationalen Datenbank abgelegt. Über den OPC-Standard wird eine herstellerunabhängige Kommunikation zu den Steuerungen realisiert. Der Rezepthandler bietet eine solide Basis für weitere Entwicklungen, wie z.B. die Integration von OPC UA basierten Servern oder einer rezeptgekoppelten Protokollierung und Auswertung von Produktionsdaten. Auch eine Kopplung zu einem Produktionsplanungssystem ist denkbar. Eine Vision ist sicher auch der Test von Rezepturen mittels Simulation.

Projektteam

Thomas Blaser, Remo Ingold, Prof. Dr. Jürg Peter Keller, stellvertretender Leiter des Instituts für Automation, juerg.keller1@fhnw.ch

Projektpartner

Schmid Automation AG, St. Gallen

Komponente	Geeignete Produkte	Gewählte Produkte	Treiber/Technologien
Steuerung (SPS)	Siemens, Allen-Bradley, CoDeSys, automationX	Durch Anlagen gegeben	AWL, KOP, FUP, ST, SFC IEC 61131-3
OPC-Server	Softing, Matrikon, Kepware	Softing	Siemens, Allen-Bradley, Modbus
OPC-Client-Toolkit	Softing, Matrikon, Kepware	Softing	C++, ODBC, VB .NET, C# .NET
Web applikation	Microsoft, ASP .NET	Microsoft, ASP .NET	VB .NET, C# .NET
Datenbank	Microsoft SQL Server Express	Microsoft SQL Server Express	SQL
Webserver	Microsoft Internet Information Services	Microsoft Internet Information Services	HTTP, HTTPS
Visualisierung/Leit-system	Siemens, Wonderware, CoDeSys, Proficy, ProLeit, automationX	Durch Anlagen gegeben	

Tabelle 1: Komponenten des Rezepthandlers

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 Studententrend ab: Immer mehr junge Frauen und Männer wählen das berufsbegleitende Studium – davon profitieren auch die Arbeitgeber.

Sei dies in der Informatik, Umwelttechnik, Automation oder Elektrotechnik, im Wirtschaftsingenieurwesen oder im Maschinenbau: 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: Im Herbst 2013 haben sich 484 Studierende für das Ingenieur-Studium an der FHNW entschieden, so viele wie noch nie! 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 Studententrend – auch in klassischen Disziplinen

Nebst dem klassischen Vollzeitstudium entscheidet sich eine zunehmende Zahl von jungen Frauen und Männern für die berufsbegleitende Ausbildung, hier zeichnet sich ein neuer Studententrend ab. Und zwar nicht nur in der Systemtechnik, im Wirtschaftsingenieurwesen und in der Informatik, sondern neu bietet die Hochschule für Technik FHNW das berufsbegleitende Studium auch in den klassischen Ingenieurdisziplinen Maschinenbau und Elektro- und Informationstechnik an.

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

Technik-Infotage in Brugg-Windisch

14. November 2014, 6. März 2015, 17. April 2015: 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

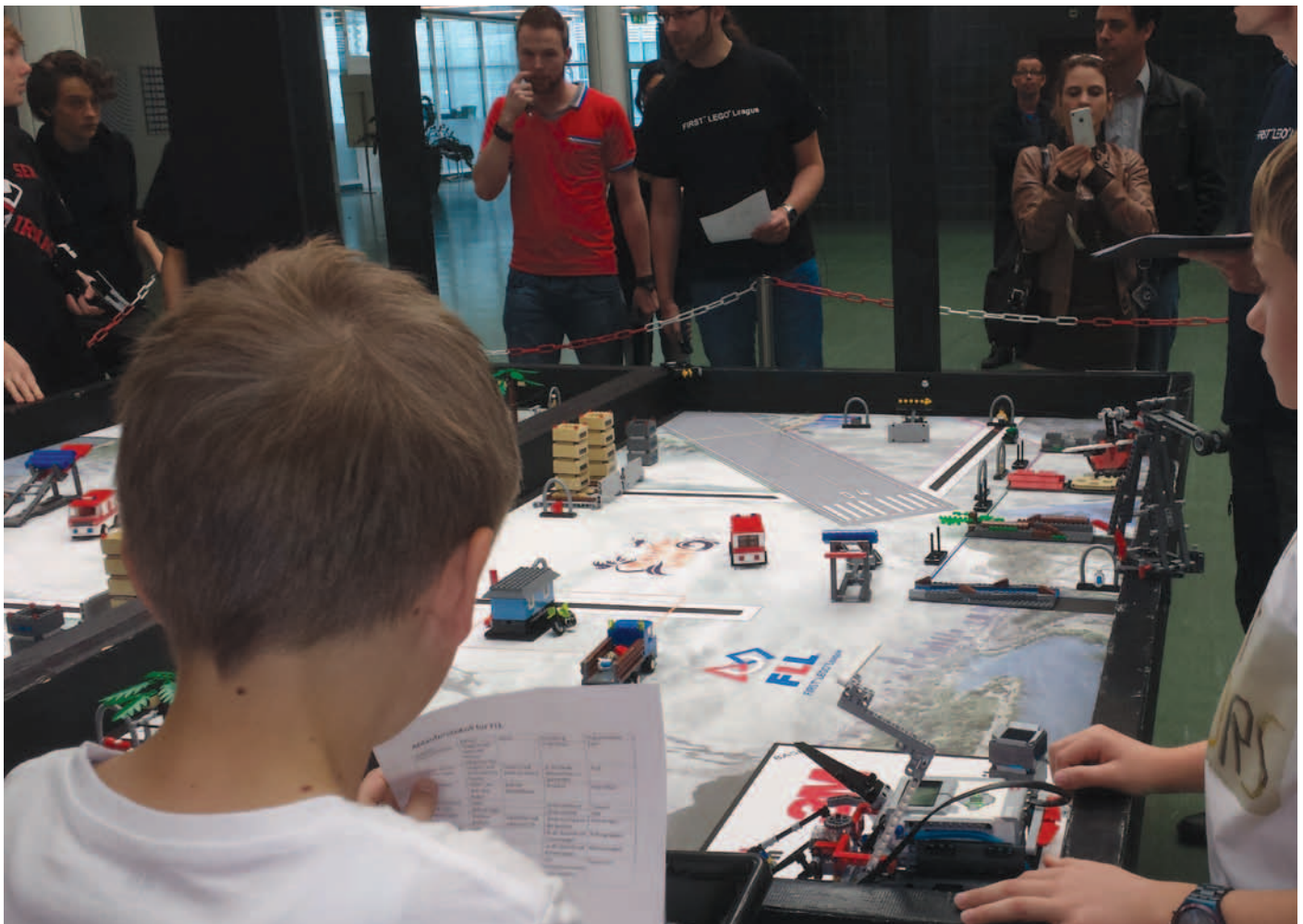
„Die Studienrichtung Systemtechnik wählte ich, weil mich Automation schon immer fasziniert hat. Die Ingenieurausbildung bot mir einen vertieften Einblick in dieses Gebiet und in verschiedene andere Technologien.“

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

First™ Lego® League – Internationales Förderprogramm für Kinder und Jugendliche

FIRST™ LEGO® League will Mädchen und Knaben im Alter von 10 und 16 Jahren in einer spielerischen und sportlichen Atmosphäre an Wissenschaft und Technologie heranzuführen. Im Rahmen ihrer Nachwuchsförderungsprojekte unterstützt die Hochschule für Technik FHNW dieses Programm seit 2004. Beim letztjährigen Wettbewerb 2013 zum Thema „Natures Fury“ untersuchten die Teams die Folgen von Naturkatastrophen für die Menschen.

Jérôme Blum, Jürg Peter Keller



Höchste Konzentration bei der Vorbereitung für den Roboterwettkampf

Seit mehreren Jahren engagiert sich das Institut für Automation bei der Durchführung der regionalen und nationalen First Lego League (FLL)-Wettbewerbe an der Hochschule für Technik FHNW in Windisch. Immer wieder dominierten die gleichen Teams wie Avalog/mindfactory, RobotXtreme oder Galileo den Wettbewerb in den vorderen Rängen. Doch beim letztjährigen Wettbewerb zeichnete sich ein richtiger Generationenwechsel ab: Alt bekannte Teams wurden durch eine Reihe junger Teams ersetzt, das Durchschnittsalter der Teilnehmerinnen und Teilnehmer sank um rund 2 Jahre.

Mehr als nur Robotik

Beim First Lego League-Wettbewerb lösen die Teams nicht nur Robotik-Aufgaben, sondern befassen sich auch inhaltlich mit aktuellen Aufgabenstellungen unserer Gesellschaft. 2013 lautete das Wettbewerbsthema „Natures Fury“, d.h. Naturkatastrophen.

Der FLL-Wettbewerb umfasste drei Teile:

- Die Teams müssen mehrere Aufgaben mit ihrem selber gebauten Roboter auf einem vorgegebenen Spieltisch lösen. Jede gelöste Aufgabe gibt Punkte – Ziel ist natürlich das Erreichen einer möglichst hohen Punktezahl.

- In einer Forschungsaufgabe müssen sich die Teams mit dem Thema des Wettbewerbs intensiv auseinander setzen und ihre Resultate in einer Präsentation dem Publikum und der Jury vorstellen.
- Ausserhalb des offiziellen Teils des FLL-Wettbewerbs führen wir in Windisch eine sogenannte ‚Open Challenge‘ durch. Mit der ‚Open Challenge‘ soll herausgefunden werden, wie die Teams ohne Hilfe eines Coaches in der Lage sind, eine Aufgabe zu lösen. Die Resultate der Open Challenge gehen auch in die Bewertung des Roboterdesigns ein.

Teamarbeit als Schlüssel zum Erfolg

Die Leistungen der Teams werden durch ein Dutzend Jurymitglieder bewertet. Diese rekrutieren sich hauptsächlich aus Mitarbeitenden des Instituts für Automation, aber auch ehemalige Studierende und Robotik-Fans helfen bei der Bewertung mit. Am Wettbewerbsmorgen werden die Teams hinsichtlich Teamgeist, Robotikdesign, Open Challenge und ihrer Forschungsarbeit beurteilt. Die Jurymitglieder beobachten und bewerten die Zusammenarbeit eines Teams und seiner Mitglieder beim Lösen einer kniffligen Teamaufgabe, während die Juroren des Robotikdesign/Open Challenge beobachten, wie die Teams unter Stress funktionieren. Innerhalb von 45 Minuten müssen sie eine Robotikaufgabe lösen. Für den mitgebrachten Roboter müssen geeignete Aufbauten und ein kleines Programm erstellt werden. Hier spielt die Zusammenarbeit im Team eine grosse Rolle – umso grösser ist dann die Freude, wenn die anspruchsvolle Aufgabenlösung gelingt!

Zur Bewertung des Robotikdesigns müssen die Teams den Bau des Roboters und die Erstellung der Software erklären. Aufgrund der vorangegangenen Open Challenge kann die Jury abschätzen, was die Jugendlichen selber geleistet haben und was der Coach dazu beigetragen hat. Eine anspruchsvolle Aufgabe für die Juroren ist die Bewertung der Forschungsarbeit und der Präsentation. Immer wieder sind sie aber auch von der grossen Vielfalt der Arbeiten und deren Präsentation positiv überrascht.

Grosse Spannung beim Roboterwettbewerb

Der eigentliche Höhepunkt ist jedoch der Roboterwettbewerb, er findet jeweils am Nachmittag statt. Alle Tüfteleien und Programmierungen werden nun im Ernstfall geprüft. Mit viel Konzentration bedienen zwei Jugendliche ihren Roboter, um in drei Vorrunden möglichst viele Punkte zu sammeln, die für die Qualifikation zur Cup-Ausscheidung nötig sind. Schiedsrichter wachen darüber, dass alles mit rechten Dingen zugeht und bestimmen mit den Teams die Bewertung der gelösten Aufgaben. Die Teams wiederum lösen verschiedenste knifflige Aufgaben und qualifizieren sich so für die nächste Runde. Dabei steigt die Spannung bis zum Final, dem Duell der beiden besten Roboterteams. Danach kehrt Ruhe ein, nun muss auf die Rangverkündigung gewartet werden. Besonders erfreulich war in diesem Jahr, dass mit ‚GrundIBots‘ ein sehr junges Team den Wettbewerb gewonnen hat.

Jury und Schiedsrichter sind am Abend zwar müde, können aber auch die schönen Eindrücke der motivierten und fröhlichen Jugendlichen nach Hause nehmen. Leider gelingt es nur sehr selten, die Medien zu einer Reportage über den First Lego League-Wettbewerb zu motivieren. Dies ist sehr

schade, denn konstruktive Intelligenz, deutlich sichtbar in genialen Robotiklösungen und Forschungspräsentationen, sind doch Themen, die eine breite Öffentlichkeit interessieren dürften!

Nachwuchsförderung an der Hochschule für Technik FHNW

Nebst der First Lego League beteiligt sich das Institut für Automation FHNW in enger Zusammenarbeit mit Schweizer Jugend forscht auch an der Organisation und Durchführung der beiden Workshops girls bzw. boys@science.

Weitere Institute der Hochschule für Technik FHNW engagieren sich ebenfalls stark in der Nachwuchsförderung, denn zahlreiche Projekte zeigen, dass sich Mädchen und Knaben schon früh für Technik interessieren und für ein Ingenieur-Studium begeistern lassen.

Kontakt und weitere Informationen

Prof. Dr. Jürg Peter Keller, Dozent Institut für Automation, juerg.keller1@fhnw.ch

Jérôme Blum, BSc FHNW in Systemtechnik, Student Master of Science in Engineering (MSE), wissenschaftlicher Assistent, jerome.blum@fhnw.ch

First Lego League:

www.hands-on-technology.de/firstlegoleague

Nachwuchsförderung an der Hochschule für Technik FHNW:

www.fhnw.ch/technik/ueber-uns/nachwuchsfoerderung

Studierendenprojekte und Bachelor-Thesen

Die nachfolgenden Arbeiten wurden im Rahmen der Studiengänge Systemtechnik und Elektro- und Informationstechnik durch die Dozierenden und wissenschaftlichen Mitarbeitenden des Instituts für Automation und weiterer Institute der FHNW betreut.

Themengebiet/Projektidee/Aufgabenstellung	Auftraggeber/Partner	Advisor/Betreuer	Studierende
Inbetriebsetzungshilfe für HLK-Regelungen	Saia-Burgess Controls AG	Degunda Niklaus	Ernst Benjamin
Anstellwinkel Mess- und Anzeigesystem für Segelflugzeug	Meier	Keller Jürg Peter	Meier Benjamin
Mobiler Roboter	RUAG Defence, RUAG Land Systems AG	Anderegg Roland	Reinhardt Tobia, Limberger Raffael
High Resolution Mobile Binocular Eye Tracker	FHNW, Instiut für Optometrie	Nouri Taoufik	Makhzan Mohammad
Hochdruckwasserstrahlschneiden.docx	Jet Cut Power GMBH	Kurmann Lukas	Freudemann Reto
Roboter gestützte Schleiftechnologie in der Fertigung	KWC AG	Edelmann Max	Gautschi Daniel
Regelung eines Labor-Reaktors für Scale-Up	F. Hoffmann-La Roche Ltd	Zogg David	Blum Jérôme
MonoTracer-Fahrdynamik-Simulationen	Peraves AG	Zogg David , Claudio Birrer	Dreier Thomas
SmartHome – Energiemonitoring eines Gebäudes	mivune AG	Zogg David	Trayler James
Mobiler Roboter	Aerne Engineering AG	Hauswirth Karl	Erni Marco
Validierung eines Drehgestellprüfstandsmodell	Nencki AG	Birrer Claudio	Schraner Marco
Kebabroboter	ABB Industrie-und Gebäudeautomation	Edelmann Max	Villiger Patrick
Energy Harvesting	Camille Bauer AG	Kurmann Lukas	Keel Manuel
Automatisierung Wafer Schneidprozess	Meyer Burger AG	Meier Matthias, Kurmann Lukas	Vögeli Thomas
Testplatz für Induktionsofen	Plustherm Point GmbH	Stuber Bruno	Schlachter Andreas
Automatisches Positioniersystem für PIV-Kamera	PSI Villigen	Stuber Bruno	Bissels Wilhelm-Martin
Rechnende Grafikkarten 2	FHNW, Institut für Mikroelektronik	Buchmann Hans	Hofer Tobias
Roboter automation in der Fertigung	Alstom Power AG	Anderegg Roland	Küng Florian
Patienten klingelsystem	Schweiz. Muskelgesellschaft	Ganzmann Peter, Meier Matthias	Schmid Jonas, Schaub Fabienne
Linienfolgeregelung für Stichsägen	Bosch Scintilla	Wiedmer Sandro	Wiss Dominik
BotMess, ein portables Messgerät für Botanik	Universität Basel	Eisenecker Jean	Hasler Rico, Stirnimann Christian
Transient measurement setup for organic thin-film transistors	CSEM Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA	Eisenecker Jean	Ursillo Luigi
3-D Printer		Meier Matthias, Gysin Hans	Cantiene Gion-Andri, von Burg Christian
Qualifikationsstudie von SmartPhone-Komponenten für die next generation CH-Minisatelliten	Swiss Space Center c/o EPFL	Sekler Jörg	von Burg Lukas
EcoPot-Realisierung Elektronik	Kuhn Rikon AG	Zogg David	Elmiger Andreas
EcoPot-Realisierung Mechanik	Kuhn Rikon AG	Zogg David	Surbach Marco
Setup für angular characterisation of OLED devices	CSEM Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA	Sekler Jörg	Jede Artur
Entwicklung und Optimierung von Robotern für Nano- und Mikro-technik	CSEM Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA	Eisenecker Jean	Helbling Simon
Dronentuner für Dudelsack entwickeln	Dr. med vet. Rappo	Keller Jürg Peter	Elber Sebastian

Vertiefungsprojekte der Master-Studierenden

Themengebiet/Projektidee/Aufgabenstellung	Auftraggeber/Partner	Advisor/Betreuer	Studierende
Regelung eines Labor-Rührkessels für Scale-up	F. Hoffmann-La Roche Ltd	Zogg David	Blum Jérôme
Vollautomatische robotergestützte Schleiftechnologie in der Armaturenfertigung	KWC AG	Anderegg Roland	Edelmann Max
Effiziente Elektroantriebe	Micro Motor AG	Stuber Bruno	Elber Sebastian
Zustandsbasierte Wartung von Wärmepumpen und Kälteanlagen	KWT Kälte- Wärmetechnik AG	Zogg David	Elmiger Andreas
Untersuchung der Dynamik eines Mikrogenerators	Camille Bauer Metrawatt AG	Gysin Hans	Ernst Benjamin
Energie- und ressourceneffizientes Design für Verdichtungsgeräte im Strassenbau	Ammann Schweiz AG	Anderegg Roland	Wiss Dominik
Partikelsedimentation unter simulierter partieller Gravitation	Kompetenzzentrum "Aerospace Biomedical Science & Technology" (c/o Hochschule Luzern)	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
Myoblast Differentiation under Simulated Microgravity: Long Term Cell Culture on Random Positioning Machines	Kooperationsprojekt mit der Universität Bern (MSc. in Biomedical Engineering)	Sekler Jörg	Wüest Simon



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

Sekretariat Institut für Automation
T +41 56 202 75 28, 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
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