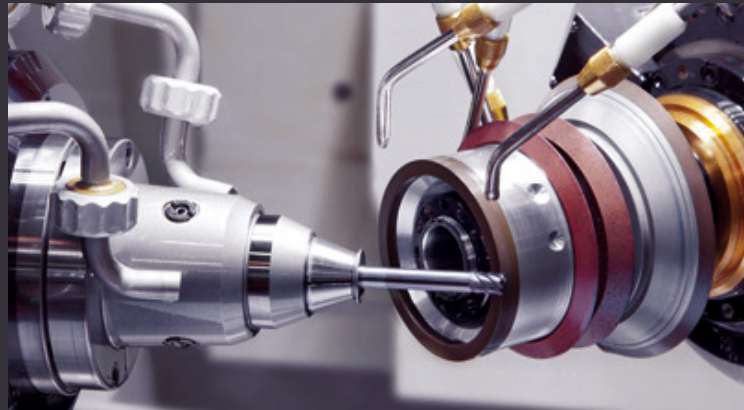


**Institut für Automation FHNW  
Tätigkeitsbericht 2022  
[www.fhnw.ch/ia](http://www.fhnw.ch/ia)**



# Inhalt

---

**3 Editorial**

---

## **Forschungskompetenz Moderne Regelungstechnik**

---

**4 Guided Policy Optimization for Position Tracking with a Robot Arm**  
Mahdi Nobar

---

**6 Simultane Identifikation des Drucks und Leitungswiderstandes für Durchflussregelung, der  $k_x$ - $\Delta p$ -Schätzer**  
Jürg Keller

---

**8 Projektbasiertes Lernen in der Systemtechnik**  
Jürg Keller

---

## **Forschungskompetenz Industrielle Automation und Gebäudeautomation**

---

**10 Adaptives thermodynamisches Modell für modellprädiktive Regelung**  
Kilian Pedolin

---

**14 Aligner 4.0 - Prototyp zur Laserbearbeitung von Zahnschienen**  
Jan Pyrochta

---

**18 EMV Power Line Kommunikation**  
Pascal Schleuniger

---

**20 Fertigung 4.0 - optimale, digitalisierte mechanische Fertigung**  
Kilian Pedolin

---

---

**22 Intelligente Verschleisserkennung bei Zerspanungswerkzeugen**  
Antonio Bruno

---

**24 Machbarkeitsstudie zum Einsatz synchronisierter Servoantriebe für Stickmaschinen**  
Martin Pischtschan

---

**28 Vehicle-To-Grid - Bidirektionales Laden von Elektromobilen real umgesetzt**  
David Zogg

---

## **Forschungskompetenz Mechatronik**

---

**30 Messung von weichmagnetischen Materialien, die mit einem serientauglichen 3D-Druckverfahren hergestellt werden**  
Hans Gysin

---

**34 Autonomer Mobiler Roboter steuert Lift**  
Wolfgang Fischer

---

**38 Digitales Modell für die energetische und thermische Simulation eines Outdoor-Grossbildschirms**  
Hans Gysin

---

**40 Energy Harvester für rotierende Sensorelektronik**  
Pascal Schleuniger

---

**42 Bachelor-Thesen**

---

**43 Vertiefungsprojekte der Master-Studierenden**

---

**44 Publikationsliste und Preise**

---

## **Impressum**

Herausgeberin: Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW,  
Hochschule für Technik, Institut für Automation  
Projektleitung und Redaktion: Rolf Isler, Jadwiga Gabrys  
Layout: Ben Newton, digitworks.ch  
Erscheinungsweise: jährlich  
Auflage: 300 Exemplare





# Editorial

## Geschätzte Leserin, geschätzter Leser

Wir freuen uns, Ihnen im vorliegenden Bericht den Stand einer Auswahl von Projekten vorzustellen. Wir danken an dieser Stelle all unseren Projektpartnern für die ausgezeichnete Zusammenarbeit und freuen uns auf die künftige Kooperation.

Im Rahmen der Ausbildung durfte unser Institut den Unterricht in den Studiengängen Systemtechnik, Wirtschaftsingenieurwesen, Elektro- und Informationstechnik und Energie- und Umwelttechnik wahrnehmen. In der Weiterbildung leistete das Institut für Automation einen wesentlichen Beitrag im MAS Automation Management.

Wir wünschen Ihnen eine unterhaltsame Lektüre und freuen uns auf Ihre Kontaktaufnahme bei Automations-

aufgaben aller Art. Gerne lösen wir mit Ihnen gemeinsam Ihre Problemstellungen und bilden dabei unsere Studierenden praxisnah aus!

Mit freundlichen Grüßen

Für das Team

Roland Anderegg  
Institutsleiter

# Guided Policy Optimization for Position Tracking with a Robot Arm

Reinforcement learning (RL) seeks an optimal policy for an agent to optimize cumulative rewards. RL techniques demand many interactions with the real world, which is only feasible in some robotics applications. Training data are available in simulation, but such simulations suffer from under-modeling and uncertainty, needing more accurate models of the environment. Meanwhile, robotic assembly requires high repeatability in an uncertain environment representation. One common approach is to hierarchically decompose the robotic task into tractable minor problems.

**Mahdi Nobar**

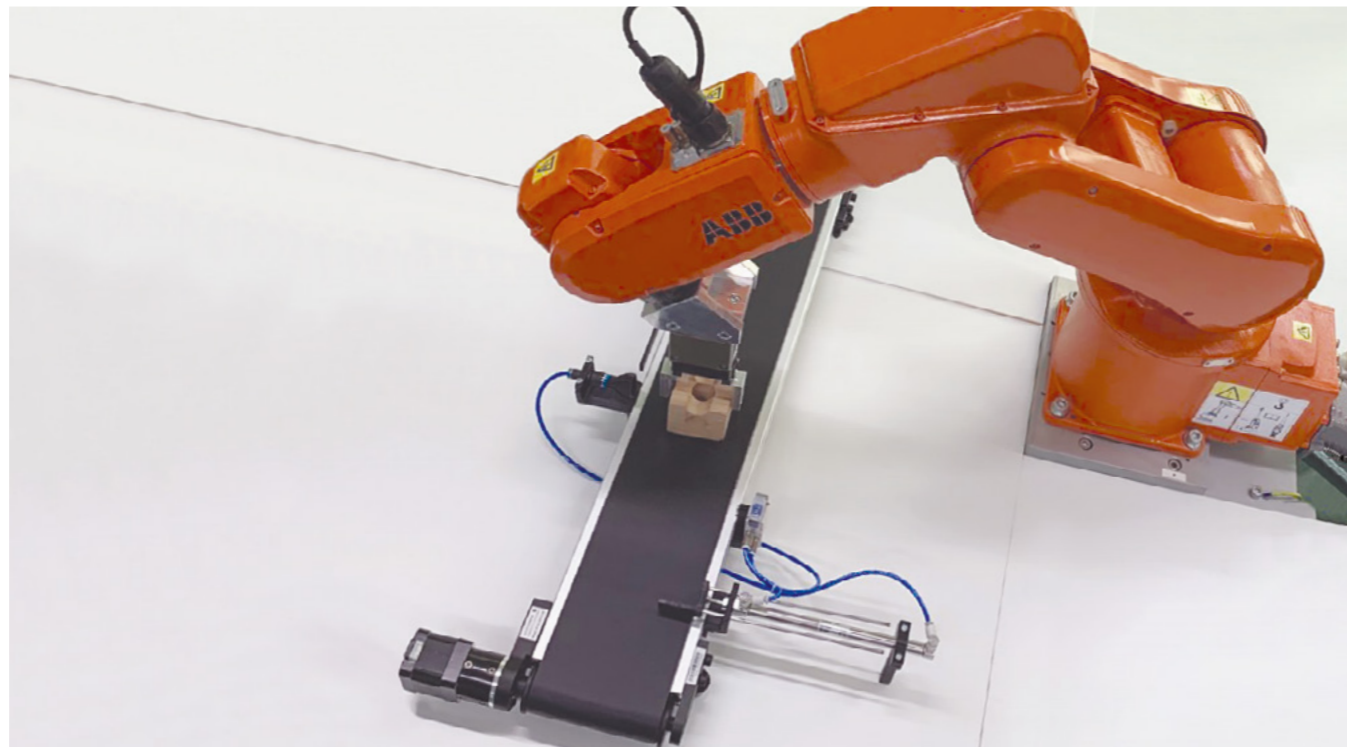


Figure 1: ABB IRB-120 robot arm tracking a moving object on a conveyor belt

## Method Overview

Task decomposition limits the RL to learn a policy by interacting within the area around the target location, improving the sample efficiency of the method [1]. We propose to learn local policies in a smaller subspace around the moving target location for a robot arm performing object assembly on the fly. We render a realistic simulation of the proposed method shown on Figure 2 inside "Robotic System" block.

We use an inverse kinematics position controller with weighted tracking feedback error, called Model-based (MB)

controller, to let the robot end-effector reach the vicinity of the moving target. Furthermore, we train a Soft Actor-Critic (SAC) policy [2] in the robot's joint space using the joint angles and the robot tip cartesian relative position as our states. Figure 2 represents the block diagram of our hybrid controller to combine these two controllers. As soon as the physics-based controller reaches close enough to target location, the switch case activates the learning-based controller to guide the end-effector precisely reaching its target location.

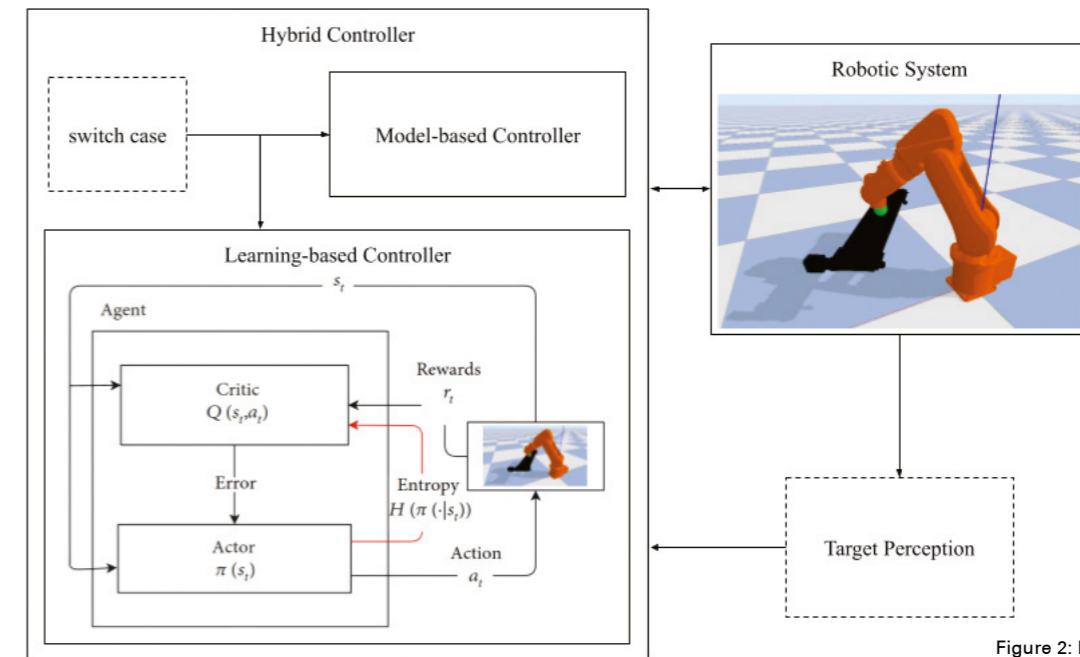


Figure 2: Hybrid control system structure

## Results and Conclusions

We demonstrate the accuracy and sample efficiency of our hybrid controller in simulation, concerning SAC-only and MB-only controllers, to track a moving target on a conveyor belt. The table below shows the root mean squared error in mm of 100 trials for tracking a moving object with an additive disturbance to target, initial, or both locations. We realize that our hybrid controller is more accurate than other methods.

Controller RMSE[mm] (% improvement)	perturb initial pose	perturb target pose	perturb both poses
<b>MB only</b>	2.548	1.961	2.142
<b>SAC only</b>	9.45e-05 (100 %)	0.567 (71 %)	0.568 (73 %)
<b>Hybrid</b>	1.69e-5 (100 %)	0.198 (89 %)	0.198 (91 %)

Table 1: Comparison of our hybrid controller performance with respect to model based (MB) and soft actor critic (SAC) controllers

For our reward function, we define a region of attraction as a sphere around the target in which we assign a large reward. In contrast, the reward smoothly decreases as we move further away from this region. The hybrid controller requires much fewer episodes to train the learning controller, as shown on the learning curve below.

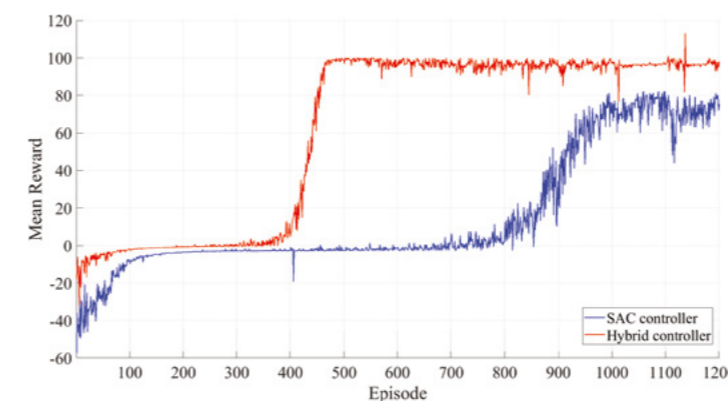


Figure 3: Learning curve of SAC controller alone and in hybrid approach

## Perspectives

This research is a preliminary study to demonstrate the possibility of overcoming the modeling uncertainties in a complex environment for precise motion control of robot assembly on the fly. We expand this research in several directions, including

- Monte-Carlo validation of the results
- Adapting the framework for robot assembly on the fly task
- Sim-to-real transfer of information for sample-efficient training in the robot cell
- Analyzing robustness to various parametric and modeling uncertainties in the robot cell

## References

- [1] Michelle A. Lee, Carlos Florensa, Jonathan Tremblay, Nathan Ratliff, Animesh Garg, Fabio Ramos, and Dieter Fox. "Guided uncertainty-aware policy optimization: Combining learning and model-based strategies for sample-efficient policy learning." In 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 7505-7512. IEEE, 2020.
- [2] Haarnoja, Tuomas, Aurick Zhou, Pieter Abbeel, and Sergey Levine. "Soft actor-critic: Off-policy maximum entropy deep reinforcement learning with a stochastic actor." In International conference on machine learning, pp. 1861-1870. PMLR, 2018.
- [3] Eugenio Chisari, Alexander Liniger, Alisa Rupenyan, Luc Van Gool, and John Lygeros. "Learning from simulation, racing in reality." In 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 8046-8052. IEEE, 2021

## Team

Mahdi Nobar, Doctoral student, mahdi.nobar@fhnw.ch  
 Prof. Dr. Jürg P. Keller, juerg.keller1@fhnw.ch

# Simultane Identifikation des Drucks und Leitungswiderstandes für Durchflussregelung, der $k_x$ - $\Delta p$ -Schätzer

Eine Durchflussregelung wird oft als Folgeregelung für verschiedene Anwendungen benötigt, so z.B. in Temperatur- oder Energieregeln. Die optimale RegelparameterEinstellung ist von einem variablen, unbekanntem Vordruck und vom konstanten Widerstandskoeffizient der Rohrleitung abhängig. Damit die Reglerparameter automatisch optimiert werden können, müssen diese Größen bekannt sein. Es wurde eine neue Identifikationsmethode entwickelt, welche die beiden Größen online identifizieren kann.

Jürg Keller

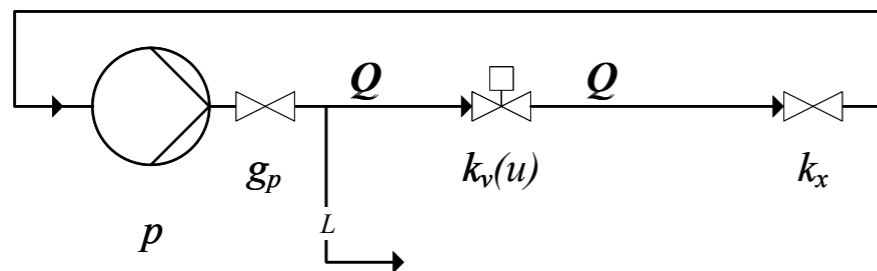


Abbildung 1: Hydraulisches Modell

$$\frac{1}{k_v^2} Q^2, \quad \Delta p_h = \frac{1}{k_x^2} Q^2, \quad \Delta p = \Delta p_h + \Delta p_v$$

Eine gute Durchflussregelung mit dichten Ventilen und kostenoptimierten Antrieben ist eine grosse Herausforderung. Nicht eine komplexe Dynamik sondern nichtlineare Kennlinien, Hysterese als Folge von Haftreibung und variablem Vordruck und die Forderung nach langer Lebensdauer machen das Problem sehr anspruchsvoll. Können der Widerstandskoeffizient und der Vordruck im Regelbetrieb bestimmt werden, so können sowohl die Regelparameter optimal angepasst werden als auch Vorgabewerte für die Ventilstellung passend bestimmt werden.

Für die Beschreibung der Lösung wird ein einfaches Modell benötigt. Dieses ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Druckquelle wird als idealer Druckerzeuger modelliert. Über eine Restriktion mit  $K_p$  als Leitwert und einer Leakage  $L$  wird der Druck vor dem Regelventil erzeugt. Der Druckabfall über den Rest kann aufgeteilt werden in einen Druckabfall über das Regelventil und über die Rohrleitungen. Darin bestimmt  $1/k_v(u)$  den Druckabfall über das Regelventil und  $1/k_x$  denjenigen der Rohrleitungen/Wärmetauscher. Die Öffnung des Ventils mit Kennlinie  $k_v(u)$  wird durch den Stellwert  $u$  vorgegeben.

Das System ist einfacher zu regeln, wenn  $\frac{1}{k_v^2} \gg \frac{1}{k_x^2}$ , d.h. das Ventil hat eine gute Ventilautorität und bestimmt

massgeblich den Durchfluss. Aus energetischer Sicht ist dies aber weniger günstig, da ein Grossteil der Energie im Ventil vernichtet wird. Bei einer guten Dimensionierung

ist also  $\frac{1}{k_v^2} \approx \frac{1}{k_x^2}$ . Dies bedeutet, dass der Rohrleitungswiderstand  $\frac{1}{k_x^2}$  einen wesentlichen Einfluss auf das System hat. Dies wird deutlich, wenn für das obige hydraulische System der Zusammenhang des Durchflusses mit dem  $k_v$ -Wert des Ventils berechnet wird:

$$\left( \frac{1}{k_v^2(u)} + \frac{1}{k_x^2} \right) = \frac{\Delta p}{Q^2} \quad (1)$$

Die Idee der Identifikation beruht auf der Tatsache, dass der Wert von  $k_x$  konstant ist, der Druck sich aber beliebig verändern kann. In einem rekursiven Schätzer kann aus dem aktuellen Durchfluss  $Q_k$  bei  $k_v(u_k)$  und dem vorangehenden Durchfluss  $Q_{k-1}$  und  $k_v(u_{k-1})$  und dem letzten geschätzten Druck ein neuer Druck abgeschätzt werden. Wir die vorangehende Gleichung (1) für den Zeitpunkt  $k$  und  $k-1$  aufgeschrieben und darin  $k_x$  eliminiert, so erhält man:

$$\Delta \hat{p}_{k,m} = \Delta \hat{p}_{k-1} \frac{Q_k^2}{Q_{k-1}^2} + Q_k^2 \left( \frac{1}{k_v^2(u_k)} - \frac{1}{k_v^2(u_{k-1})} \right)$$

Die Grösse  $\Delta \hat{p}_{k,m}$  bezeichnet die Druckschätzung aufgrund des Modells. Druck  $\Delta \hat{p}_{k,m}$  und Durchfluss  $Q_k$  müssen aber auch Gleichung (1) erfüllen. Dies werden sie nur, wenn  $\Delta \hat{p}_{k,m}$  und  $\frac{1}{k_x^2}$  den 'wahren' Werten entsprechen. Mit Gleichung (1) kann also ein Durchfluss berechnet werden, der zum  $\Delta \hat{p}_{k,m}$  und  $\frac{1}{k_x^2}$  des Schätzers passt:

Damit kann nun die Idee des Schätzers erklärt werden:

$$\hat{Q}_k^2 = \frac{\Delta \hat{p}_{k,m}}{\left( \frac{1}{k_v^2(u)} + \hat{r}_k \right)} = \Delta \hat{p}_{k,m} \frac{k_v^2(u_k)}{1 + \hat{r}_k k_v^2(u_k)} \quad \text{mit} \quad \frac{1}{\hat{k}_{x,k}^2} \triangleq \hat{r}_k$$

- Ist der geschätzte Durchfluss  $\hat{Q}_k^2$  im Vergleich zum gemessenen Durchfluss  $Q_k^2$  zu klein, so muss  $\Delta \hat{p}_k$  vergrössert werden, andernfalls muss er verkleinert werden.

$$\Delta \hat{p}_k = \Delta \hat{p}_{k,m} + K_p (Q_k^2 - \hat{Q}_k^2)$$

- Der Widerstandswert  $\hat{r}_k$  wird so modifiziert, dass die Korrelation zwischen dem Schätzfehler für den Durchfluss und dem Schätzfehler für den Druckabfall minimal wird.

$$\hat{r}_k = \hat{r}_{k-1} + K_r (Q_k^2 - \hat{Q}_k^2) (\Delta \hat{p}_{k,m} - \Delta \hat{p}_{k-1}), \quad K_r < 0$$

Die Konvergenz des Schätzers kann mathematisch gezeigt werden. Es kann berechnet werden, wie der Druckkorrekturfaktor  $K_p$  optimal bestimmt wird, damit der Druckschätzfehler gegen Null konvergiert. Die Konvergenzanalyse des Widerstandswerts  $\hat{r}_k$  zeigt, dass der Schätzfehler gegen Null geht, falls eine ideale Druckquelle vorliegt. Ist  $g_p$  hingegen klein, so enthält  $\hat{r}_k$  auch die Elastizität der Druckquelle, was für die Regelung aber nicht nachteilig ist.

Die folgenden Plots zeigen die Funktion des Schätzers für verschiedene Bedingungen:

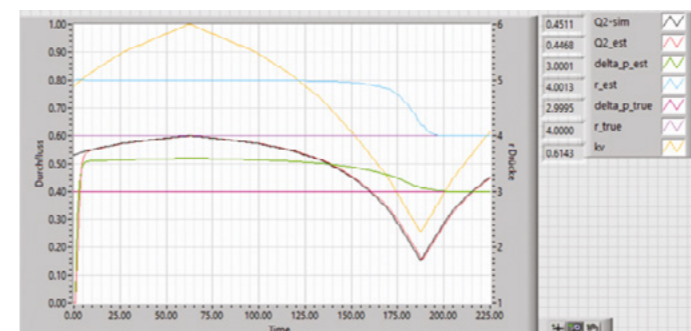


Abbildung 2: Konvergenz bei idealer Druckquelle

In Abbildung 2 ist dargestellt, wie während dem Schliessvorgang (gelbe Linie) der geschätzte Wert  $\hat{r}_k$  auf den wahren Wert konvergiert. Der Druckschätzer konvergiert ähnlich (grüne Linie) auf den wahren Wert. Die Durchflussschätzung konvergiert sehr schnell, d.h. in den ersten 10 s auf den wahren Durchfluss. Wie der Simulation zu entnehmen ist, erfolgt dies durch schnelle Anpassung von  $\Delta \hat{p}_k$ . Das Wertepaar für  $\hat{r}_k$  und  $\Delta \hat{p}_k$  zwischen 10 s und 125 s ergibt also

eine richtige Durchflussschätzung, ist aber noch weit von den wahren Werten entfernt. Erst ab der Zeit 200 s stimmen sie mit den wahren Werten überein.

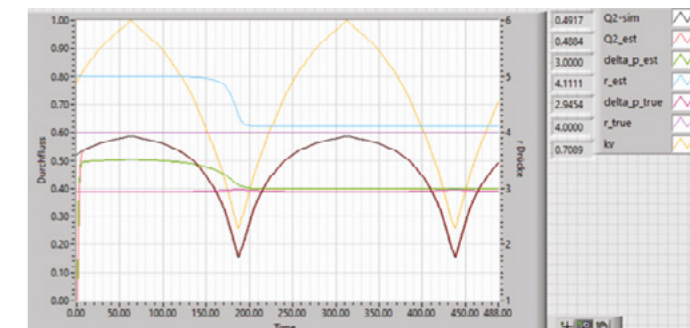


Abbildung 3: Konvergenz bei weicher Druckquelle

In Abbildung 3 ist die Konvergenz bei weicher Druckquelle dargestellt. Deutlich zu sehen ist, dass  $\hat{r}_k$  nicht den wahren Wert erreicht. Die Durchflussschätzung für das Wertepaar für  $\hat{r}_k$  und  $\Delta \hat{p}_k$  stimmt aber immer gut.

Versuche an realen Anlagen haben gezeigt, dass der Schätzer gut funktioniert, wenn die Ventilkennlinie  $k_v(u)$  im unteren Bereich bekannt und richtig ist. Verändert sich dies, so entstehen grosse Fehler im Schätzer. Aktuell wird untersucht, woher diese Empfindlichkeit herrührt und wie sie vermindert werden kann.

Das Potential des  $k_x$ - $\Delta p$ -Schätzers liegt darin, dass die Durchflussregelparameter aufgrund der Kenntnisse von  $k_x$  und  $\Delta p$  adaptiv festgelegt werden können. Zudem kann man am zeitlichen Verlauf von  $k_x$  sich anbahnende Verschlammungen, z.B. eines Wärmetauschers, erkennen. Auch lässt sich damit eine 'treffsichere' Vorsteuerung realisieren und so die Effekte der Haftreibung minimieren.

## Industriepartner

Stefan Mischler, Belimo AG, Hinwil

## Projektteam

Prof. Dr. Jürg P. Keller, Dozent FHNW, juerg.keller1@fhnw.ch  
 Thomas Kuhn, Wissenschaftlicher Assistent und Masterstudierender, thomas.kuhn@fhnw.ch  
 Daniel Jakober, Wissenschaftlicher Assistent und Masterstudierender, daniel.jakober@fhnw.ch

# Projektbasiertes Lernen in der Systemtechnik

Im ersten Studierendenprojekt lösen die Studierenden eine Aufgabe im Bereich der mobilen Robotik. Im Studienjahr 21/22 wurde den Studierenden die Aufgabe gestellt, in Analogie zum Computerspiel Pacman, mit einem autonomen Roboter Scheiben in einem Labyrinth aufzusammeln und einem Gegner auszuweichen. Anlässlich eines Abschlusswettbewerbs wird die Güte der Lösungen evaluiert. Im folgenden Bericht sollen Ausbildungsziele und Methodik erläutert und ein Überblick über die erarbeiteten Lösungen für das didaktische Konzept gegeben werden.

## Jürg Keller

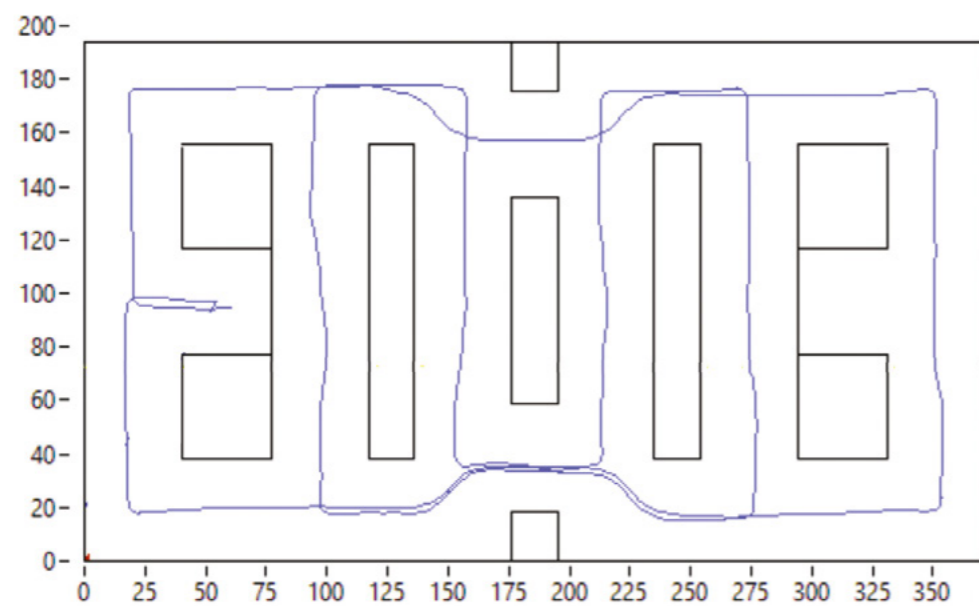


Abbildung 1: Spielfeld mit EKF-Pfadschätzung

Die Ziele des ersten Studierendenprojekts sind sehr vielfältig. Dies ist typisch für eine praxisnahe Ausbildung und 'Problem based learning'. Um eine interdisziplinäre Projektaufgabe in einem Team von etwa 7 Mitgliedern zu lösen, braucht es zusätzlich zu den methodischen Projektmanagement- und Kommunikationskompetenzen auch die Bereitschaft, die Bedürfnisse der unterschiedlichen Disziplinen zu verstehen. Dies zeichnet erfolgreiche Teams aus.

Das Projekt startet mit einer Analyse der Aufgabenstellung. Als Resultat wird eine Formulierung der Anforderungen in einem SysML-Anforderungsdiagramm erwartet. Die grafische Darstellung erfordert eine gute thematische Strukturierung der Anforderung und ermöglicht eine kontroverse Diskussion im Team. Erfolgreiche Ingenieurarbeit zeichnet sich heute immer mehr dadurch aus, wesentliche Informa-

tionen in der Literatur (Fachpublikationen und Internetbeiträge) möglichst effizient zu finden. Aufgrund des geringen Vorwissens im ersten Studienjahr ist dies besonders wichtig, aber auch sehr anspruchsvoll, da viele Publikationen aufgrund von fehlendem theoretischen Wissen noch nicht verstanden werden können. Hier zeigt sich ein grosser Unterschied zwischen den Vollzeit- und Teilzeitklassen, denn bei den letzteren wird die Arbeit oft nach dem 2. Studienjahr absolviert, wenn die theoretischen Kenntnisse viel grösser sind. Trotzdem zeigt sich, dass auch die Vollzeit-Teams ihren Lösungsraum in der Recherchephase stark erweitern und in der Lage sind, eigene kreative Ideen aufgrund des Gelesenen zu kreieren.

Basierend auf dem zusätzlichen Wissen aus der Recherche wird nun die Aufgabe strukturiert und es werden Lö-

sungskonzepte für die verschiedenen Teilsysteme gesucht. Gleichzeitig wird das Anforderungsdiagramm für die Teilsysteme durch lösungsspezifische Anforderungen verfeinert. Die Realisierbarkeit kritischer Lösungen wird in der Projektwoche experimentell verifiziert. Das erste Semester endet mit der Dokumentation und der Präsentation der geplanten Lösung. Im zweiten Semester kommt die Stunde der Wahrheit. Der Pacman-Roboter wird von jedem Team realisiert und am Abschlusswettbewerb getestet. Für die Lösung vieler Aufgaben fehlen die theoretischen Grundlagen. Mit Hilfe der Projektbetreuer oder durch das Studium von Dokumentationen kann fast immer eine gute Lösung gefunden werden. Oft vernimmt man von Studierenden am Ende des Studiums: 'Hätten wir dies beim 1. Projekt schon gewusst, wäre die Lösung anders realisiert worden'. Dies zeigt, dass das 1. Projekt das Verständnis für die Nützlichkeit später gelernter Theorie gelegt und den unmittelbaren Transfer der Theorie in die Anwendung ermöglicht hat.



Abbildung 2: Der schönste Roboter

Immer wieder erstaunlich ist die grosse Vielfalt der erarbeiteten Lösungen. Für die Aufnahme der Scheiben wurden Lösungen mit Magnetförderbändern, mit Bürsten oder mit Saugern realisiert. Bei der Roboterkinematik hatte eine Gruppe den Mut, dies mit Mecanum-Wheels zu lösen. Dies ersparte das Drehen des Roboters und ermöglichte, sehr schnell durch das Labyrinth zu fahren. Die anderen



Abbildung 3: Der schnellste Roboter

Gruppen verwendeten Differentialroboter. Die gewählte Sensorik für die Lenkungsregelung der Roboter zeigte, wie gründlich die Problemanalyse gemacht wurde. So hatten Gruppen mit nur einem seitlichen Sensor viel grössere Regelprobleme als diejenigen mit zwei seitlichen Sensoren. Mit einem Sensor ist nur die Messung einer durch die Roboterausrichtung bestimmten Distanz möglich. Mit zwei Sensoren können der Abstand des Roboters von der Wand und die Roboterausrichtung bestimmt werden. Dies ermöglicht eine viel einfachere Lenkungsregelung. Die Lokalisierung des Roboters auf dem Spielfeld wurde von den meisten Gruppen durch inkrementelle Lokalisierung gelöst. Der Roboter konnte also seine Position aufgrund der abgefahrenen Strassen und Kreuzungen. Eine Gruppe von Teilzeitstudierenden, die bereits fortgeschrittene Regelungstechnikmodule besucht haben, realisierten eine Lokalisierung, basierend auf einem extended Kalmanfilter (EKF) und einer gespeicherten Karte. Das Resultat ist in Abbildung 1 dargestellt und zeigt den in Echtzeit rekonstruierten, abgefahrenen Pfad. Da informative Sensoren abhängig von der Position im Labyrinth ausgewählt werden müssen, war die Realisierung des EKF sehr anspruchsvoll. Während die anderen Lösungen bei Ausweichmanövern aufgrund eines gegnerischen Roboters meist die Information über ihre Position im Labyrinth verloren, konnte die EKF-Lösung allen Bewegungen nachfolgen. Leider war die konstruktive Lösung dieses Teams nicht optimal und trotz optimaler Lokalisierung und schlauer Ausweichstrategie konnten sie den Wettbewerb nicht gewinnen. Schlussendlich matchentscheidend war eine clevere Ausweichstrategie kombiniert mit einem flinken Roboter. Der schnellste Roboter (Abbildung 1) wurde geschlagen, weil keine vernünftige Ausweichstrategie realisiert wurde. Neben den technischen Leistungen wird auch das Design des Roboters bewertet. Abbildung 2 zeigt die eleganteste Lösung.

Ein Studierendenprojekt mit Wettbewerb ist eine besondere Herausforderung für die Studierenden, denn es gilt, eine sinnvolle Balance zwischen investierter Zeit und Güte der Lösung zu finden. Der Rest des Studiums darf ja nicht vernachlässigt werden. Ein wesentliches Erfolgsmerkmal ist dabei das zielgerichtete, d.h. auf das wesentliche fokussierte Arbeiten. Auch von den Studierenden wird die Projektarbeit als sehr wertvoll empfunden. Im vorangehenden Studienjahr wurde das Projekt wegen Corona abgebrochen. Die betroffenen Studierenden bedauerten sehr den verloren gegangenen Ausbildungsgewinn, den sie aufgrund der Kommunikation mit früheren Studierenden erwartet hätten.

## Projektteam

Betreuer des Projekts P1/P2

# Adaptives thermodynamisches Modell für modellprädiktive Regelung

Im Rahmen eines Innosuisse-Projekts werden die wissenschaftlichen Grundlagen für einen modellbasierten Regler einer Vollklimaanlage entwickelt.

Kilian Pedolin



Abbildung 1: Symbolbild (Quelle: Fr. Sauter AG)

## Ausgangslage

Ein möglichst realistisches Modell bildet die Grundlage einer modellbasierten Regelung. Je genauer ein Modell die Wirklichkeit abbildet, desto präziser fällt die Prognose für den Regler aus und desto höher wird die Qualität der Regelung. Es gestaltet sich jedoch schwierig, die thermodynamischen Prozesse eines grossen Zweckgebäudes abschliessend zu modellieren. Zu gross sind die Ungewissheiten und zu vielfältig die Einflüsse. Dazu kommt, dass bei der Inbetriebsetzung wenig Zeit für eine aufwendige Konfiguration aller nötigen Parameter zur Verfügung steht.

## Zielsetzung

Anstatt ein umfassendes Modell für den gegebenen Prozess zu suchen, erfolgt eine Prädiktion mithilfe eines einfachen Modells mit möglichst wenig Zuständen. Die Abweichungen zur Realität werden durch eine fortlaufende Adaption der Modellparameter minimiert. Dadurch wird erstens erreicht, dass sich das Modell den verschiedenen Einflüssen anpasst, die nicht modelliert sind (zum Beispiel Unterschiede Sommer/Winter oder bei der Raumbelastung) und zweitens wird die Konfiguration des Modells vereinfacht (Stichwort «fire and forget») und zeitlich verkürzt.

## Vereinfachung des Anlagemodells

Eine Möglichkeit, die Komplexität des Modells zu reduzieren, ist es, weniger Einflüsse zu modellieren bzw. diese zusammenzufassen. Die so verlorene Dynamik des Modells soll mithilfe von vergangenen und vorhergesagten Daten ergänzt werden. Diese Methode ist auch als Greybox-Modelling bekannt. Im Bereich der Modellierung von Gebäuden werden häufig RC-Modelle verwendet. Dieses Modell ist eine mathematische Darstellung des thermischen Verhaltens eines Gebäudes oder Raums und wird unter anderem zur Simulation der Temperatur oder des Energieverbrauchs verwendet. Es besteht aus einer Kombination von thermischen Widerständen ( $R$ ) und thermischen Kapazitäten ( $C$ ), die die Wände und andere Komponenten eines Gebäudes darstellen. Ein 1R1C Modell wie in Abbildung 2 bildet die Grundlage für die adaptive Modellierung.  $T_a$  und  $T_z$  beschreiben die Aussentemperatur und die Raumtemperatur. Der Wärmestrom der Vollklimaanlage ( $\dot{Q}_{HVAC}$ ) und der Sonne ( $\dot{Q}_{sol}$ ) wirken direkt auf die Raumtemperatur ein.

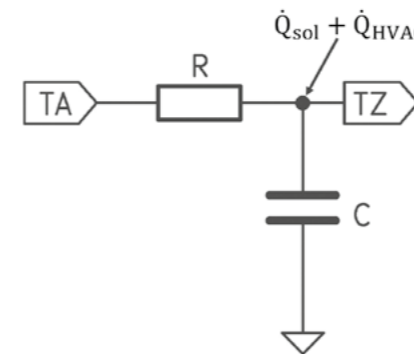


Abbildung 2: Vereinfachtes 1R1C Modell

## Adaptive Modellierung mit Extended Kalman Filter (EKF)

Für das beschriebene 1R1C-Modell sollen die Parameter  $R$  und  $C$  fortlaufend geschätzt werden. Es ist auch möglich, noch weitere Parameter hinzuzufügen und zu schätzen, zum Beispiel eine Störung ( $\dot{Q}_{dist}$ ). Auch wenn das Modell linear ist, ergibt sich bei der kontinuierlichen Schätzung von Zuständen und Parametern ein nichtlineares System. Aus diesem Grund wird für diese Art Probleme das Extended Kalman Filter verwendet, da dieses für nichtlineare Systeme geeignet ist. Das EKF funktioniert, indem das System bei jedem Zeitschritt linearisiert wird, und anschliessend ein Kalman-Filter zur Schätzung der Zustände und Parameter verwendet wird. Geschätzte Grössen werden üblicherweise mit einem Dach gekennzeichnet zum Beispiel  $\hat{T}_z$  für die geschätzte Raumtemperatur. Das Kalman-Filter ist ein Algorithmus, der verwendet wird, um den zukünftigen Zustand eines Systems auf der Grundlage seines aktuellen Zustands und früherer Beobachtungen zu prognostizieren. Das Filter kombiniert die aktuellen Schätzungen mit den neuen Beobachtungen, um eine genauere Schätzung zu erhalten. Dies wird mithilfe eines mathematischen Modells durchgeführt, das die Unsicherheit in den Daten und die Dynamik des Systems berücksichtigt. Durch die fortlaufende Parameterschätzung können auch Veränderungen im Raum (zum Beispiel durch Renovationen) erkannt und das Modell entsprechend angepasst werden. Abbildung 3 zeigt, wie die Parameterschätzung in den Regelkreis implementiert werden kann. Die verbesserten geschätzten Parameter werden an das im MPC-Regler verwendete Modell übergeben, dabei ist zu beachten, dass die Stabilität des Systems gewährleistet bleibt.

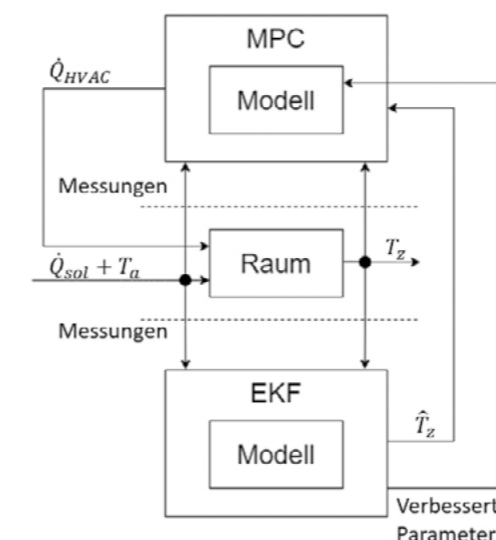


Abbildung 3: Implementierung der Parameterschätzung in den Regelkreis

## Simulation

In ersten Simulationen konnte der Vorteil eines adaptiven Modells gegenüber einem statischen bereits nachgewiesen werden. Ausgangslage für den Vergleich ist in Abbildung 4 dargestellt.

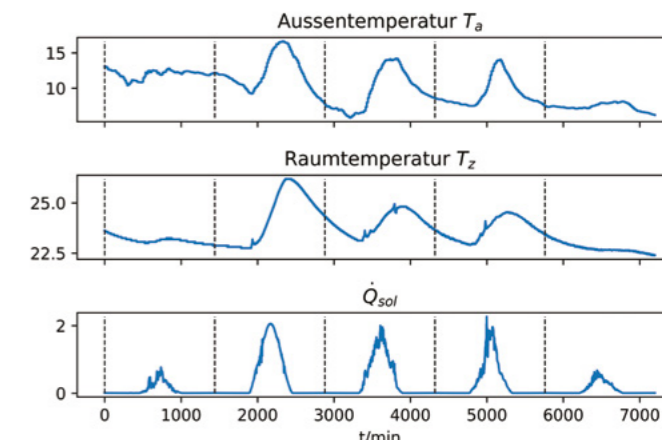


Abbildung 4: Ausgangslage für die Simulation

Der erste Tag wird verwendet, um die Startparameter für beide Modelle zu bestimmen. Beim statischen Modell werden die Parameter  $R$  und  $C$  anschliessend nicht mehr angepasst, während das adaptive Modell diese zweimal täglich anpasst.

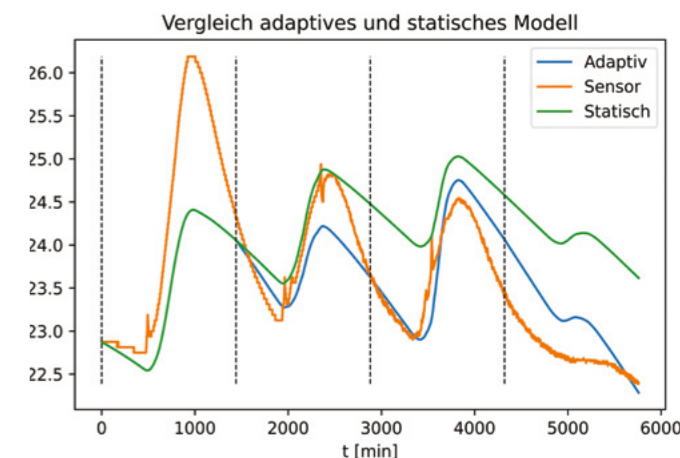


Abbildung 5: Resultat der Simulation

Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der Simulation über die restlichen 4 Tage. Beide Modelle sind zu konservativ für den ersten Tag, dies ist auf den grossen Unterschied zur Initialisierung zurückzuführen. Das adaptive Modell ist in der Lage, die Abkühlphase besser abzubilden und bleibt daher näher an der gemessenen Raumtemperatur. Dies bestätigt sich auch bei Betrachtung des Root Mean Square Error (RMSE) in Tabelle 1

Model	RMSE [°C]
statisch	0.93
adaptiv	0.57

Tabelle 1: Vergleich RMSE der beiden Modelle

Als nächstes soll das adaptive Modell weiterentwickelt werden, um die Spitzen der Raumtemperatur besser abzubilden.

#### Ausblick

Nach Abschluss der Modellvalidierungen werden zunächst Simulationen mit einem ersten Prototyp durchgeführt. Zusätzlich soll der Unterschied zwischen statischem und adaptivem Modell für die modellbasierte prädiktive Regelung genauer untersucht werden. Schliesslich folgt ein testweiser Einbau in eine Pilotanlage, worin die entsprechenden Quell- und Zieldatenpunkte über das BACnet-Protokoll zugreifbar sind. Da bereits historische Daten dieser Anlage vorliegen, sind wir in der Lage, ggf. Verbesserungen im Betriebs- und Verbrauchsverhalten aufzuzeigen und damit den Erfolg unseres Projekts zu quantifizieren.

#### Industriepartner

Felix Gassmann, CTO Fr. Sauter AG

#### Projektteam

Albert Zihlmann, Dozent, Projektleiter und Betreuer,  
albert.zihlmann@fhnw.ch

Thomas Besselmann, Dozent Regelungstechnik,  
thomas.besselmann@fhnw.ch

Andrej Sonderegger, Wissenschaftlicher Assistent und  
Masterstudierender, andrej.sonderegger@fhnw.ch

Kilian Pedolin, Masterstudierender,  
kilian.pedolin@students.fhnw.ch

# Ihre Weiterbildung in Automatisierungstechnik

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

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

**Nächster Start: 4. September 2023**

[www.fhnw.ch/mas-automation](http://www.fhnw.ch/mas-automation)



#### Kontakt

Michael Böller, Studiengangleiter MAS Automation  
Management, T +41 56 202 77 92, michael.boeller@fhnw.ch

Gabriella Gerber, Sekretariat, T +41 56 202 72 18,  
weiterbildung.technik@fhnw.ch

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

Mittwoch, 3. Mai 2023, 18.15 Uhr

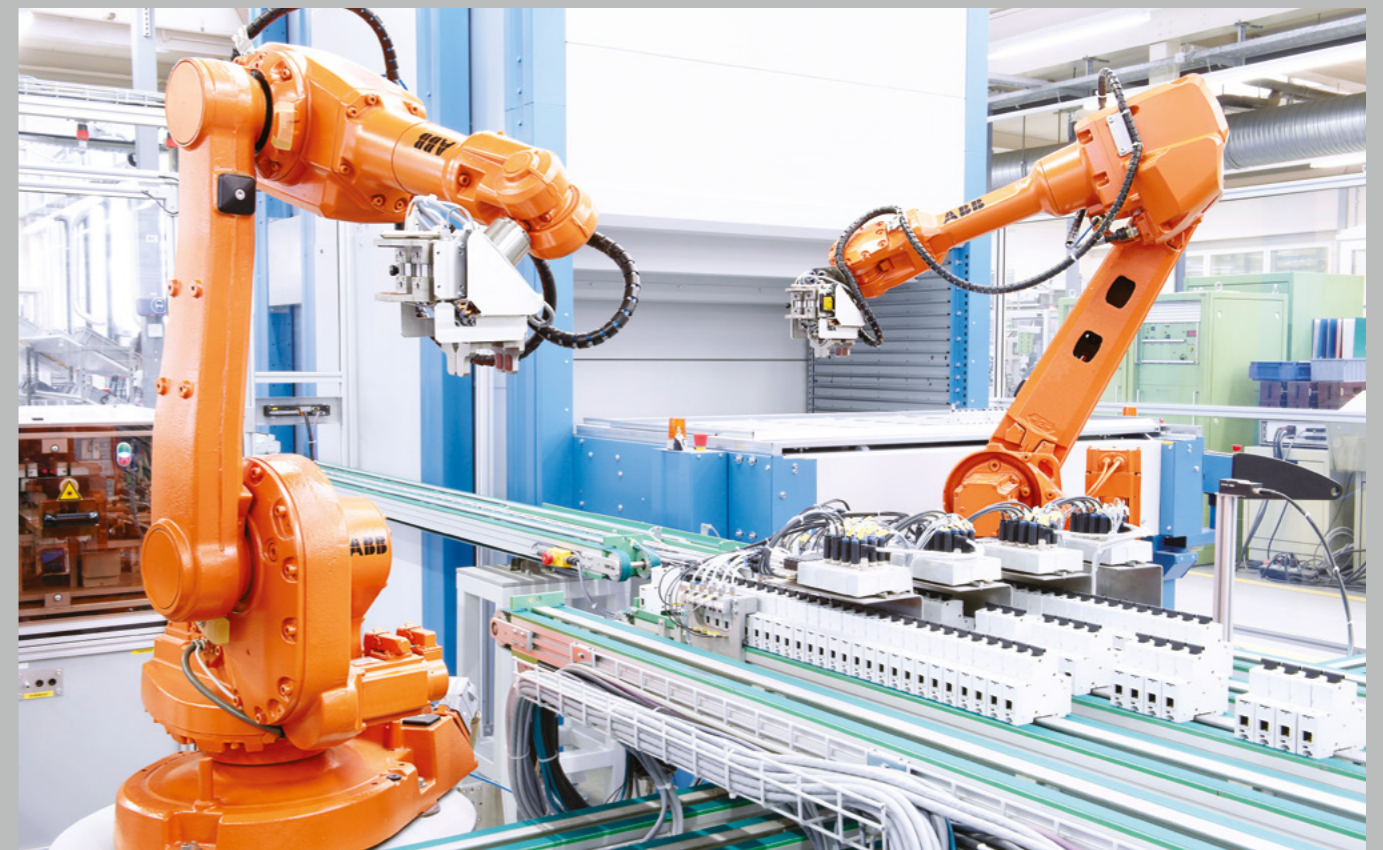
Montag, 26. Juni 2023, 18.15 Uhr

Montag, 30. Oktober 2023, 18.15 Uhr

Mittwoch, 24. Januar 2024, 18.15 Uhr

#### Details siehe:

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



# Aligner 4.0 - Prototyp zur Laserbearbeitung von Zahnschienen

Die Firma Nivellmedical AG hat sich auf die Produktion und den Vertrieb von Zahnschienen (auch Aligner genannt) spezialisiert. Um den Fachkräften mühsame und repetitive Arbeiten zu ersparen, sowie der steigenden Nachfrage an Zahnschienen gerecht zu werden, soll die Produktion Schritt für Schritt automatisiert werden. Mit dem Innosuisseprojekt «Aligner 4.0» will das Unternehmen, in Zusammenarbeit mit dem Institut für Automation sowie dem Institut für Produkt- und Produktionsengineering, einen Prototyp zum automatisierten Schneiden und Markieren von Zahnschienen entwickeln.

Jan Pyrochta

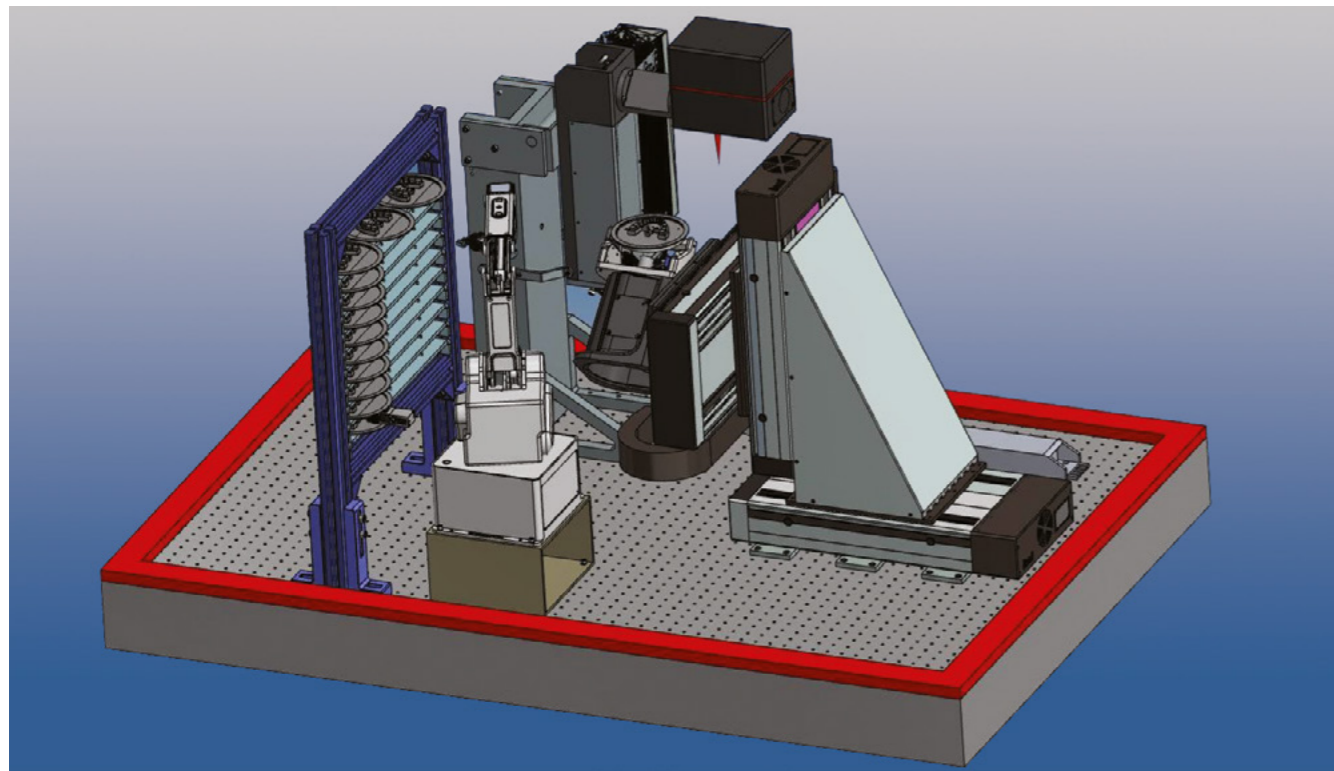


Abbildung 1: CAD-Modell des weiterentwickelten Prototyps exkl. Schaltschränke & HMI

## Das Produkt

Die produzierten Zahnschienen werden unter dem Produktnamen «Nivellipso» vermarktet und vertrieben. Sie bieten eine kostengünstige Alternative zu herkömmlichen Zahnspangen und bringen gleichzeitig weitere Vorteile mit sich, wie die angenehmere Pflege von Gebiss und Zahnschiene, sowie der Möglichkeit, die Zahnschiene bei Bedarf herauszunehmen. Eine Therapie mit Zahnschienen wird in

mehrere Korrekturschritte unterteilt, welche mit jeweils drei unterschiedlich dicken Zahnschienen vollzogen werden. Die unterschiedlichen Foliendicken der Zahnschienen üben dabei, von dünn zu dick, immer mehr Druck auf das Gebiss des Patienten aus. So kann eine Zahnfehlstellung Schritt für Schritt korrigiert und in die gewünschte Position gebracht werden.

## Die Produktion

Als Erstes wird beim Zahnarzt abgeklärt, ob ein Patient für eine Zahnschientherapie in Frage kommt, bevor dann ein Abdruck des Gebisses gemacht und digitalisiert wird. Anhand der digitalisierten Gebissmodelle werden die Korrekturschritte bis zur korrekten Zahnstellung berechnet. Die CAD-Modelle der einzelnen Korrekturschritte werden anschliessend 3D-gedruckt und eine PET-G-Folie darüber tiefgezogen. Nun kann die Zahnschiene wieder vom 3D-Druck getrennt und die überschüssige Folie entfernt werden. Die Schnittkanten, die beim Entfernen des überschüssigen Materials entstehen, müssen für eine angenehme Benutzung durch den Endanwender noch nachbearbeitet werden. Zum Schluss werden die Aligner gereinigt, in der richtigen Reihenfolge verpackt und für den Versand vorbereitet.

## Die Automatisierung

Vor allem die Produktionsschritte Ausschneiden und Nachbearbeiten sind sehr aufwändige Arbeiten und werden von den Fachkräften der Nivellmedical AG derzeit händisch erledigt. Die Teilautomatisierung fokussiert sich daher vor allem auf diese beiden Schritte. Das Ausschneiden der Zahnschienen soll dabei mittels Laserbearbeitungsanlage gelöst werden. Im Vergleich mit anderen Schnittmethoden hat das Laserschneiden den Vorteil, dass an den Zahnschienen glatte Schnittkanten erzeugt werden, die nur noch wenig nachbearbeitet werden müssen. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, mit dem Laser eine Beschriftung für die bessere Identifikation durch den Patienten einzugravieren.

## Der Prototyp

Im Laufe des Innosuisseprojektes «Aligner 4.0» wurde ein Prototyp geplant, aufgebaut und getestet. Dieser besteht aus zwei Schaltschränken, einem Human-Machine-Interface (HMI), einem Maschinentisch, einem 4-Achs-System (drei Linear-, eine Rotationsachse) und einem CO<sub>2</sub>-Laser mit Laserscanner. Mit dem Prototyp konnte aufgezeigt werden, dass einzelne Aligner beschriftet und ausgeschnitten werden können.

## Weiterentwicklung des Prototyps

Das Ziel der letzten Projektphase war, dass der Prototyp 30 Aligner in einem Durchlauf autonom bearbeiten kann. Um die Autonomie des Bearbeitungsprozesses zu erhöhen, wurde der Prototyp um ein Magazin und ein Handling System zur Handhabung der Zahnschienenrohlinge erweitert, in der Abbildung 1 links zu sehen. Das Magazin ist auswechselbar konstruiert und kann dadurch entladen, bzw. bestückt werden, während die Anlage ein zweites Magazin bearbeitet. Das Handling System besteht aus einem Pick & Place Roboter und einem Parallelgreifer. Es dient dem Überführen der Rohlinge vom Magazin zur Laserbearbeitungsanlage. Für das formschlüssige Greifen und das positionsgenaue Ablegen der Rohlinge wurden ein Greifsockel und dazu passende Greiffinger entwickelt, wie sie die Abbildung 2 zeigt. Das Positionieren im Magazin, bzw. auf der Laserbearbeitungsanlage wird durch Zylinderstifte und drei Bohrungen im Greifsockel gewährleistet.

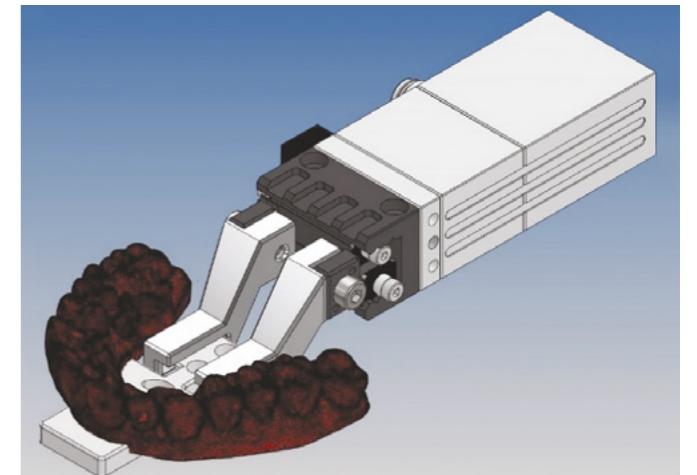


Abbildung 2: CAD-Modell des Greifers mit Greiffinger & Greifsockel

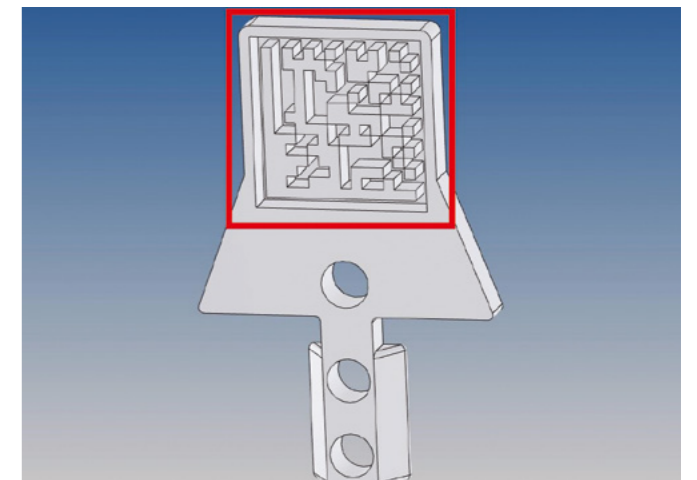


Abbildung 3: CAD-Modell des Greifsockels mit Datamatrix-Code



Abbildung 4: Rohling, markiert & geschnitten

## Automatisiertes Laden von Schnittlinien

Das automatisierte Abarbeiten von 30 Alignern am Stück brachte weitere Problemstellungen mit sich. Damit man das Magazin nicht in einer bestimmten Reihenfolge mit Alignern befüllen, bzw. die Schnittliniendaten nicht in der selben Reihenfolge laden muss, wurde das Datenhandling über Datamatrix-Codes (DMC's) gelöst. Mittels Kamera



Abbildung 5: Zahnschiene mit Markierung, vom Rohling gelöst

#### Fazit & Ausblick

Mit der Beendung der letzten Projektphase konnte aufgezeigt werden, dass mit dem Prototyp 30 Zahnschienen autonom in einem Durchlauf abgearbeitet werden können. Beim Industriepartner soll die Anlage nun produktisiert und in den Produktionsprozess integriert werden.

#### Industriepartner

Nivellmedical AG  
Dr. Milan Stojanovic, CEO  
Nikola Mandic, CTO

#### Projektteam

Prof. Dr. Thomas Besselmann, Dozent am Institut für Automation, thomas.besselmann@fhnw.ch  
Prof. Dr. Ronald Holtz, Teamleiter am Institut für Produkt- und Produktionsengineering, ronald.holtz@fhnw.ch  
Jan Pyrochta, Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Automation, jan.pyrochta@fhnw.ch  
Matthias Julius, Fachspezialist am Institut für Produkt- und Produktionsengineering, matthias.julius@fhnw.ch  
Manuel Schmid, Bachelorstudent, manuel.schmid1@students.fhnw.ch

wird die im DMC verschlüsselte, eindeutige ID des Rohlings ausgelesen, anhand derer anschliessend die entsprechende Schnittlinie geladen wird. Dazu wurde ein Algorithmus entwickelt, der die Bildverarbeitung, das Decodieren des DMC's, als auch das weiterführende Datenhandling regelt. In der Abbildung 4 ist ein ausgeschnittener Rohling zu sehen, wie er nach der Bearbeitung im Magazin vorzufinden ist. Der ausgeschnittene Mittelteil dient dabei dem einfacheren Lösen der Folie vom 3D-Druck. Die Abbildung 5 zeigt die fertige, abgelöste Zahnschiene.

## 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  
Thomas Helbling, Leiter FITT (Forschung, Innovation, Technologietransfer)  
thomas.helbling@fhnw.ch  
[www.fhnw.ch/technik/studierendenprojekte](http://www.fhnw.ch/technik/studierendenprojekte)

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

# EMV Power Line Kommunikation

Im Rahmen eines durch den Forschungsfonds Aargau unterstützten Innovationsprojektes arbeitet die FHNW zusammen mit der Firma plc-tec AG daran, Koppler für Power-Line Kommunikation zu optimieren, welcher den strengsten Normen der EMV (elektromagnetische Verträglichkeit) der Avionik gerecht werden und damit die möglichen Einsatzbereiche dieser Technologie erweitern.

## Pascal Schleuniger

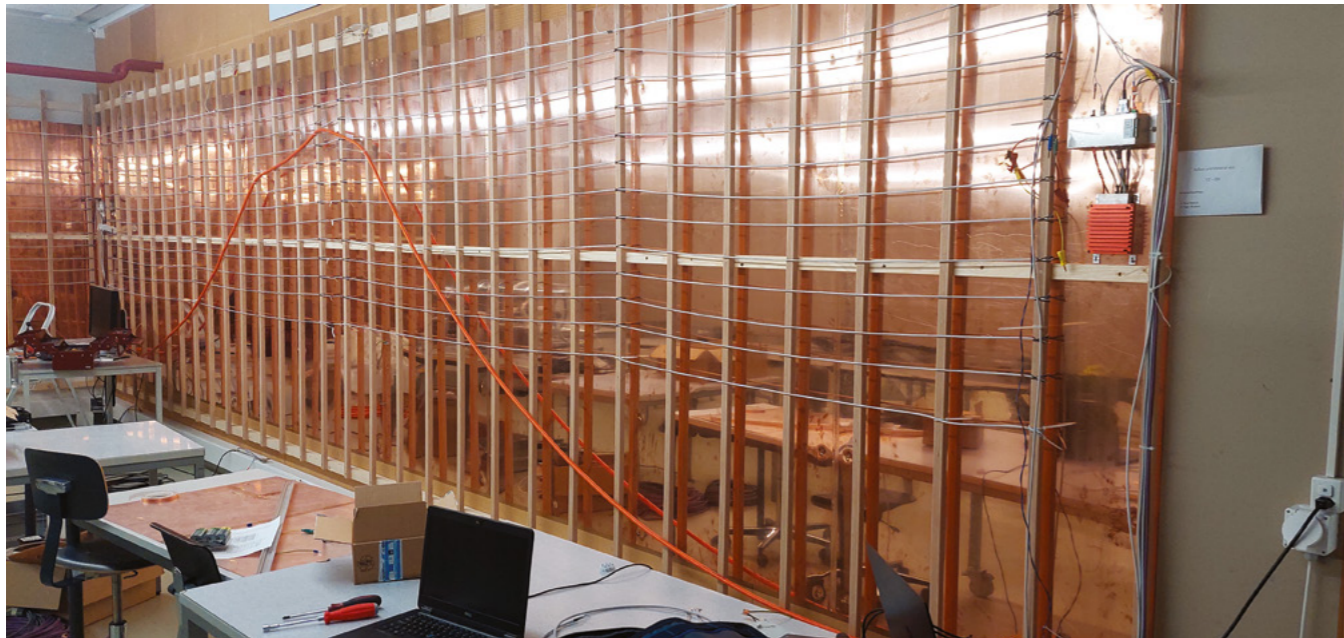


Abbildung 1: Verklebungsnachbildung einer Avionik-Anwendung.

### Ausgangslage

Der Industriepartner in diesem Projekt, plc-tec AG, entwickelt und vertreibt eine eigene Transceiver-Technologie für die Datenübertragung über Stromnetze (Power Line Communication PLC), die für Anwendungen mit höchsten Anforderungen betreffend Zuverlässigkeit und Echtzeitfähigkeit z.B. in Flugzeugen, Zügen oder Smart Grids optimiert ist. Zu den Kunden zählen unter anderem global führende Flugzeug- und Zugsystemlieferanten.

In Zusammenarbeit mit der FHNW soll die optimale Kopplung des PLC-Signals auf die Stromleitungen erforscht werden, um störungssichere, kompaktere und kostengünstigere Koppler unter anderem für den Eintritt der plc-tec in kostensensiblere Märkte wie z.B. Automotive und Bahnverkehr zu ermöglichen.

### Funktionsweise Power-Line Kommunikation

Bei der Power-Line Kommunikation werden in den Modems Daten in Pakete aufgeteilt, mit Prüfinformationen versehen und auf eine gewünschte Übertragungsfrequenz moduliert. Danach werden die Daten kapazitiv oder induktiv auf Stromnetze gekoppelt und übertragen. Power-Line Kommunikation wird oft genutzt, um Netzwerke in Häusern ohne Ethernet-Verkabelungen aufzubauen und sind demnach auf eine möglichst hohe Datenrate optimiert. Plc-tec AG hat sich darauf spezialisiert, mit PLUS Power-Line Kommunikation für Anwendungen mit hoher Zuverlässigkeit und Echtzeitanforderungen anzubieten.

Damit lassen sich viele Datenleitungen einsparen sowie Gewicht und Verkabelungen reduzieren, was besonders bei Flugzeugen und Zügen relevant ist.

Da die fehlerfreie Kommunikation zwischen den Modems in solchen Systemen gewährleistet sein muss, existieren Normenprüfungen, die je nach bestandemem Schärfegrad das erlaubte Einsatzgebiet vorgeben. Neben mechanischen Normenprüfungen müssen auch elektrische Anforderungen erfüllt und die EMV gewährleistet werden. Unter anderem soll die Kommunikation fehlerfrei funktionieren, wenn auf der Stromleitung starke, hochfrequente Ströme eingekoppelt werden. Dieser EMV Test wird als leitungsgebundene Immunitätsprüfung bezeichnet.

### Automatisierte Optimierung von breitbandigen Koppler-Impedanzen

In einem ersten Projektschritt wurde ein Simetrix Simulationsmodell des Kopplers erstellt, welches die realen Eigenschaften der einzelnen elektronischen Bauteile berücksichtigt. Danach konnte mit der automatisierten leitungsgebundenen Immunitätsprüfung nachgewiesen werden, dass erste Kommunikation-Ausfälle typischerweise bei Frequenz-Slots auftreten, bei welchen die Koppler-Impedanz deutlich von 100 Ohm abweicht.

Das Simetrix Simulationsmodell wurde so überarbeitet, dass einfach zu ändernde Bauteilwerte (Widerstände und Kapazitäten) markiert werden können. Es wurde ein Matlab-Algorithmus entwickelt, welcher diese variablen Bauteile anhand von E12/E24 Reihen so anpasst, dass eine möglichst konstante Koppler-Impedanz über den relevanten Frequenzbereich mit möglichst wenig Anpassungen realisiert werden kann. Anschliessend wurden zwei PLC-Modems anhand der resultierenden Optimierung umgebaut und im Labor ausgemessen. Dabei konnte eine deutlich verbesserte Störimmunität nachgewiesen werden. Aufgrund der positiven Resultate werden nun verschiedene praktische Verkabelungen ausgemessen und Immunitätsprüfungen durchgeführt.

### Induktive Koppler mit nanokristallinen Kernmaterialien

Ein weiterer Schwerpunkt der zweiten Projekthälfte wurde auf induktive Koppler gelegt. Aufgrund der strikten galvanischen Trennung von Modem und Leitung können mit der induktiven Kopplung typischerweise bessere EMV Eigenschaften erreicht werden, welche allerdings oft aus Kosten- und Platzgründen nicht realisiert werden. Problematisch ist dabei primär die Sättigung der induktiven Koppler, welche auftritt, wenn der Strom in der Powerline zu hoch wird. Bis anhin konnte diesem Problem nur mit einem gross dimensionierten induktiven Koppler entgegengewirkt werden.

In den letzten Jahren sind nanokristalline Kernmaterialien auf den Markt gekommen, welche sich gegenüber konventionellen Mn-Zn Kernen durch eine sehr hohe Anfangspermeabilität, einen erweiterten Temperatur-Bereich sowie einer markant höheren Sättigungsflussdichte und damit einem grossen linearen Kennlinienbereich auszeichnen. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten, induktive Koppler herzustellen, welche kleiner, leichter und damit wesentlich effizienter sind als Koppler mit konventionellen Kernmaterialien.

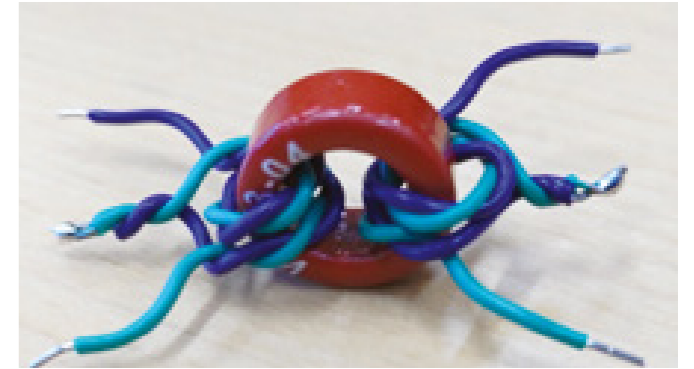


Abbildung 2: Bifilar gewickelter nanokristalliner Kern für induktive Kopplung

Es wurden nanokristalline Kernmaterialien und Kerne evaluiert und induktive Koppler aufgebaut. In Praxismessungen wurden das Sättigungsverhalten, die Temperaturbeständigkeit sowie die leitungsgebundene Immunität untersucht. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass kaum Datenverluste weder bei starker Sättigung noch bei grossen eingekoppelten Störspannungen provoziert werden können.

Plc-tec AG möchte nun in einem ersten Schritt die induktiven Koppler den aktuellen Modems vorschalten und in einer Anwendung im Bahnbereich (Powerline PLUS Train Backbone) einem Praxistest unterziehen.

### Fazit und Ausblick

In der zweiten Projekthälfte wurden Koppler für Power-Line Kommunikation optimiert sowie der Einsatz von nanokristallinen Kernmaterialien in induktiven Kopplern untersucht. In beiden Bereichen konnten erfreuliche Resultate nachgewiesen werden, welche sich nun in der Praxis bewähren sollen. Dank dem aufgebauten Knowhow sowie der Mess- und Testinfrastruktur bleibt das Institut für Automation in Kontakt mit der Plc-tec AG für weitere gemeinsame Projekte.

### Projektteam

Basil Ruch, Wissenschaftlicher Mitarbeiter,  
basil.ruch@fhnw.ch  
Prof. Dr. Pascal Schleuniger, Dozent und Projektleiter,  
pascal.schleuniger@fhnw.ch

# Fertigung 4.0 - optimale, digitalisierte mechanische Fertigung

Um im Bereich der mechanischen Präzisionsfertigung konkurrenzfähig zu bleiben, ist es essenziell, dass der gesamte Herstellzyklus effizient abläuft. In Zusammenarbeit mit der FAES-PWR ESTECH AG wurden, auf der Basis von Model-Based Definitions (MBD), Tools für die optimale digitale Fertigung entwickelt.

**Kilian Pedolin**

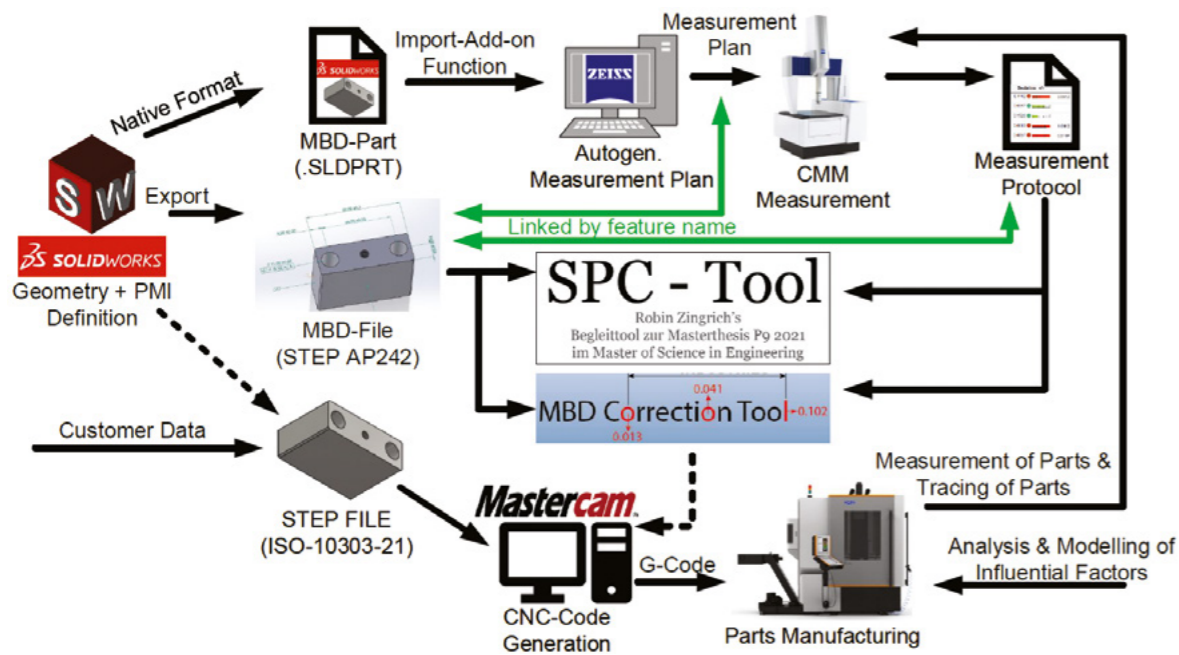


Abbildung 1: Grafische Darstellung der in diesem Projekt angestrebten Toolchain

## Einleitung

Aufgrund der zunehmend harten Bedingungen einer Produktion am Standort Schweiz wird von vielen Unternehmen eine kontinuierliche Verbesserung der Effizienz aller Produktionsprozesse gefordert, um auch in Zukunft wettbewerbsfähig zu bleiben.

Der Umsetzungspartner FAES-PWR ESTECH AG nutzt das Potenzial der fortgeschrittenen Digitalisierung bezüglich modellbasierter Definitionen (MBD-Files), um damit höhere Produktionsraten zu erreichen.

## Toolchain

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde im Rahmen eines Innosuisseprojekts eine Toolchain entwickelt (Abbildung 1). Über das neue MBD-Format werden die Fertigungs- und Toleranzinformationen direkt in den Dateien hinterlegt. Diese Informationen werden dem CMM, CAM und anderen Tools zugänglich gemacht. Damit werden die Toleranzinformationen eindeutig weitergegeben, ohne dass es zu Fehlinterpretationen in den einzelnen Prozessschritten kommen kann.

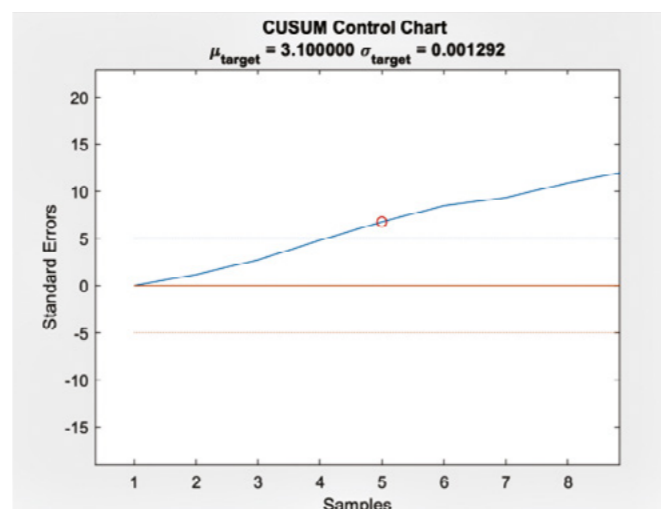


Abbildung 2: Beispiel einer CUSUM-Karte. Das 5. Sample verletzt das definierte Limit und der Prozess könnte vorzeitig gestoppt werden.

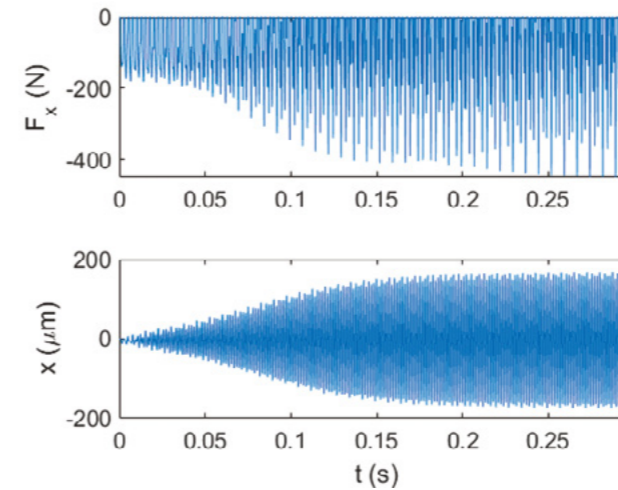


Abbildung 3: Instabile Fertigungsparameter

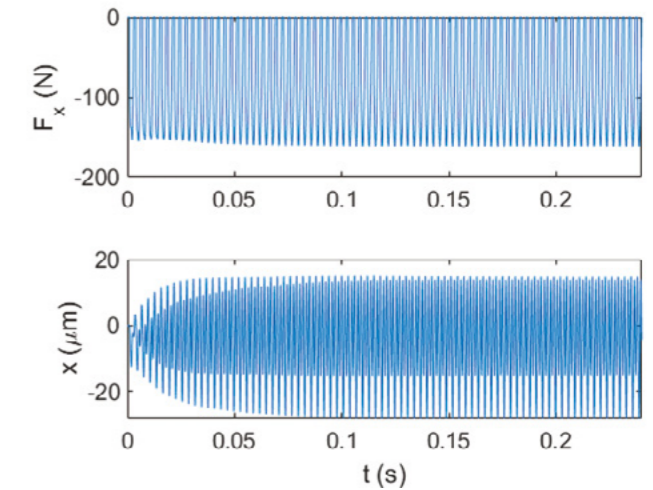


Abbildung 4: Stabile Fertigungsparameter

## SPC-Tool

Ein neu erstelltes statistisches Prozesskontrolltool (SPC-Tool) macht von den verlinkten MBD-Daten Gebrauch und erlaubt, Herstellbedingungen zu analysieren und Kontrollkarten zu erstellen, welche frühzeitig intervenieren können, wenn der Prozess ausser Kontrolle gerät. Durch zusätzliche Experimente im Fräsprozess wurden kritische Einflussfaktoren auf die Herstellgenauigkeit identifiziert, welche unentdeckt bleiben können, wenn keine SPC vorhanden ist. Ein Beispiel für eine solche Kontrollkarte wäre die CUSUM-Karte (kumulative Summe, Abbildung 2). Eine CUSUM-Karte ist eine grafische Darstellung der kumulativen Summe der Abweichungen einer Reihe von Datenpunkten von einem Referenzwert. Sie wird verwendet, um Verschiebungen oder Trends in den Daten zu erkennen und kann dabei helfen, kleine Veränderungen im Mittelwert eines Datensatzes im Laufe der Zeit zu entdecken.

## MBD Correction Tool

Ein Toleranzen-Korrekturalgorithmus (MBD Correction Tool) wurde in einem Vorgängerprojekt entwickelt. Ziel war es, die Effektivität dieses Tools beim Umsetzungs-partner an Kundenteilen zu untersuchen. Die Untersuchungen zeigten, dass geometrische Korrekturen (ohne Berücksichtigung anderer Einflüsse) effektiv sind, solange die Herstellbedingungen über den Korrekturvorgang erhalten werden können. Einschränkungen konnten besonders in der Kompatibilität zwischen verschiedenen Tools beobachtet werden. Dies ist einerseits durch veraltete Toleranzdefinitionsarten, welche nicht die neusten Normen berücksichtigen und andererseits durch das sich schnell entwickelnde MBD-Umfeld verschuldet.

## Modelle

Die rein geometrisch ermittelten Korrekturmaßnahmen werden durch Modelle ergänzt, mit deren Hilfe die physikalischen Ursachen von Abweichungen im Fertigungsprozess identifiziert werden können. In einer ersten Phase wurden physikalische Modelle auf der Basis von Feder-Mass-Dämpfer-Systemen erarbeitet. Die auftretende Kraft lässt sich abhängig vom abgetragenen Span beschreiben. Durch Kombination der beiden Modelle kann das schwingfähige System auf seine Stabilität untersucht werden. Dabei gilt es Fertigungsparameter so zu wählen,

dass das System stabil bleibt und keine Ratterschwingungen auftreten. Ratterschwingungen treten im instabilen Fall auf und haben einen negativen Einfluss auf die Genauigkeit und Oberflächenbeschaffenheit des Werkstückes sowie auf die Standzeit des Fräsers. Ein Beispiel für einen solchen instabilen Fall ist in Abbildung 3 ersichtlich. Der Plot zeigt die Kraft sowie die zeitliche Verschiebung in X-Richtung. Im Vergleich zum stabilen Fall (Abbildung 4) fallen vor allem die größeren Kraftspitzen und die viel stärkere Auslenkung auf.

## Ausblick

Die Effektivität und das Potenzial der MBD Correction und SPC-Tools konnten nachgewiesen werden. Jedoch stellen Kompatibilitätsprobleme, verursacht durch das sich schnell weiterentwickelnde MBD-Umfeld, ein Hindernis dar, welches in zukünftigen Arbeiten zu lösen gilt. Eine Evaluation der erarbeiteten Modelle an realen Maschinen sowie das Einbinden in die Toolchain waren im Rahmen dieses Projektes nicht möglich und sollen in einem Folgeprojekt erarbeitet werden.

Ein besonderer Dank geht an die Innosuisse, welche dieses Projekt ermöglicht und unterstützt hat.

## Umsetzungspartner

FAES-PWR Estech AG

## Projektteam

Prof. Dr. Roland Anderegg, Institutsleiter und Dozent, roland.anderegg@fhnw.ch  
 Max Edelmann, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, max.edelmann@fhnw.ch  
 Robin Zingrich, robin.zingrich@students.fhnw.ch  
 Kilian Pedolin, Masterstudierender, kilian.pedolin@students.fhnw.ch  
 Lui Aucher, lui.aucher@students.fhnw.ch

# Intelligente Verschleisserkennung bei Zerspanungswerkzeugen

Für die optimale Aufbereitung von Zerspanungswerkzeugen wurde im Rahmen einer Master-Thesis ein Machine Learning Modell entwickelt, welches Fräswerkzeuge in Verschleissklassen unterteilt. Dafür wurde mittels einem Vision System und dem Verfahren Shape from Shading die gesamte Mantelfläche eines Werkzeugs aufgenommen.

**Antonio Bruno**

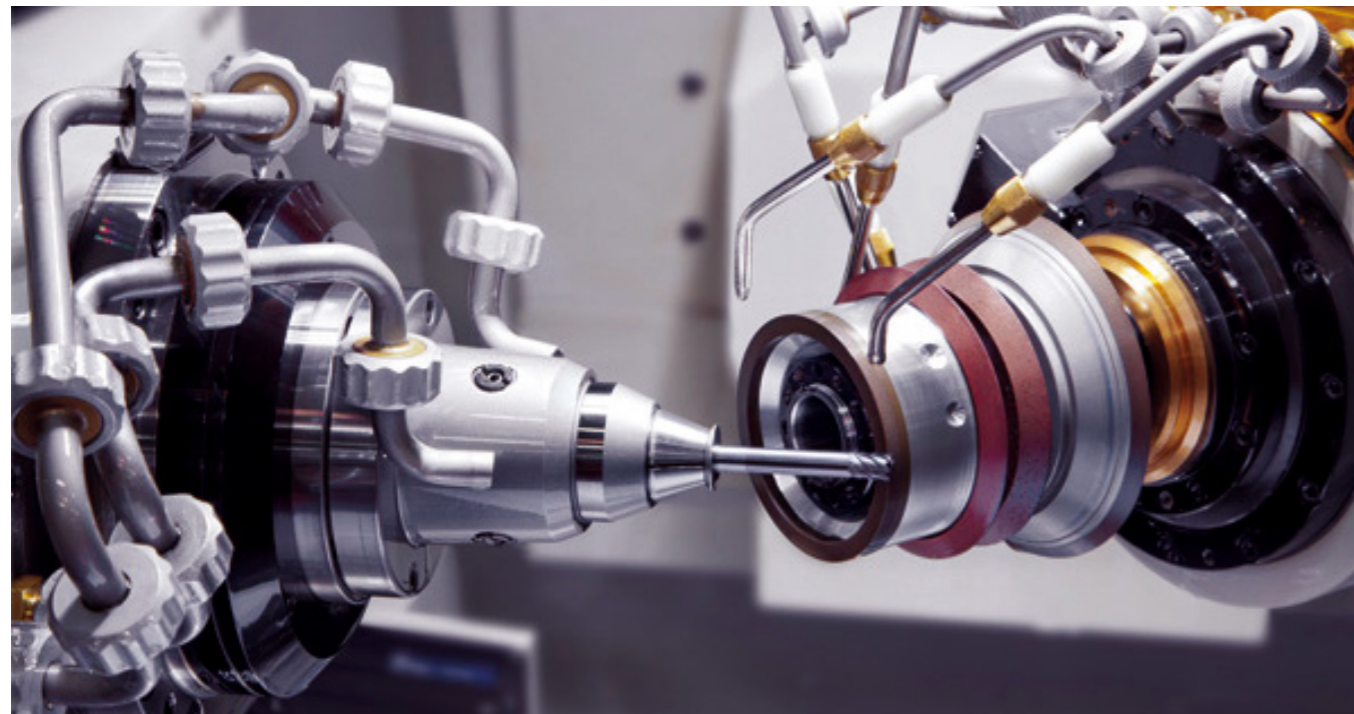


Abbildung 1 Werkzeugschleifmaschine [1]

## Einleitung

Die Fraisa SA ist ein Schweizer Unternehmen mit Firmensitz in Bellach. Sie produziert Zerspanungswerkzeuge (Fräser, Bohrer, etc.) aller Art für die Metallbearbeitung. Darüber hinaus bietet sie die Dienstleistung an, Zerspanungswerkzeuge, egal ob Eigenwerkzeuge oder Fremdwerkzeuge, wieder aufzubereiten. Dieser Service wird Re-Tool® genannt und in Willich, Deutschland durchgeführt. Dabei handelt es sich um das grösste Servicezentrum für Hartmetallwerkzeuge in Europa. Es werden ca. 340'000 Werkzeuge jährlich aufbereitet und somit dem Wertschöpfungsprozess wieder zugeführt. Eine Werkzeugschleifmaschine ist in Abbildung 1 dargestellt. Als Besonderheit garantiert die Fraisa für die aufbereiteten Werkzeuge eine Neuwerkzeugleistungsgarantie.

Der Aufbereitungsprozess wird teilautomatisiert durchgeführt. Das Werkzeug wird von einem Schleifexperten subjektiv bewertet und vermessen. Daraus werden anschliessend Schleifparameter definiert. Dieser teilautomatisierte Aufbereitungsprozess wurde über die Jahre laufend optimiert und funktioniert heute sehr gut. Um jedoch zukünftig die Schleifexperten zu entlasten, wird eine Automationslösung angestrebt. Dabei ist es wichtig, die verschiedenen Schleifparameter mit der richtigen Hardware und Software zu ermitteln.

## Innovationsvorhaben

In diesem Projekt wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem aus der Mantelfläche von Werkzeug-Bildern der Verschleisszustand in vier Klassen eingeteilt werden kann.

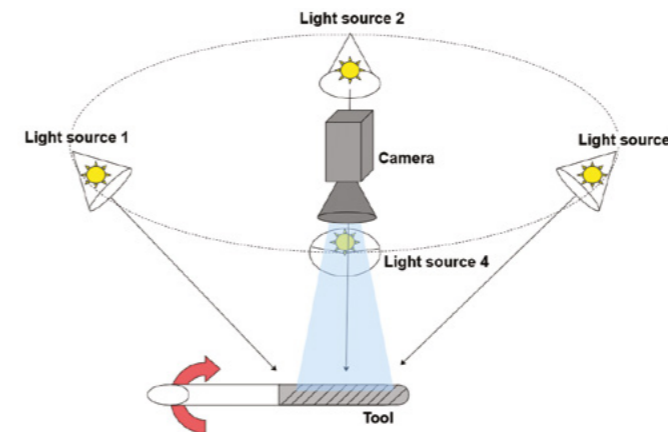


Abbildung 2 Aufbau des Shape from Shading Verfahrens

Aufgrund einer umfangreichen Recherche wurde ein Vision System mit dem Aufnahmeverfahren «Shape from Shading» ausgewählt.

## Shape from Shading

Beim Shape from Shading handelt es sich um ein Verfahren, bei dem aus der Helligkeitsverteilung eines Bildes die Form der dargestellten Objekte berechnet wird.

Es ermöglicht, synthetische Bilder durch Schattierungsbilder zu berechnen und zu rekonstruieren. Zu diesem Zweck werden vier Bilder mit jeweils unterschiedlich positionierten Beleuchtungsquellen aufgenommen (Abbildung 2).

Durch verschiedene Vektorberechnungen wird für jedes Bild eine Reflexionskarte erstellt. Einzelne haben diese Karten unendlich viele Lösungen für eine Rekonstruktion. Durch Kombination von drei verschiedenen Reflexionskarten erhält man einen gemeinsamen Schnittpunkt und damit eine einzige Lösung für eine Rekonstruktion.

Das vierte Bild wird verwendet, um Spiegeleffekte zu finden und zu eliminieren. Mit diesen vier Bildern können dann die synthetischen Bilder berechnet werden. Ein Beispiel eines synthetischen Bildes ist auf Abbildung 3 dargestellt. Dabei handelt es sich um ein Höhenbild.

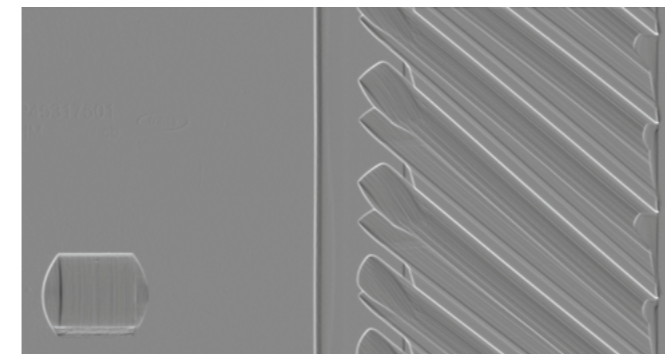


Abbildung 3 Höhenbild eines Werkzeuges

## Machine Learning

Mit den synthetischen Bildern wurde ein Machine Learning Modell trainiert. Dafür wurden verschiedene Textur- und mathematische Features gesucht. Um die Features auf dem gesamten Bild anzuwenden, wurde das Bild zunächst in mehreren Bildausschnitten aufgeteilt. Danach wurden die Merkmale jeweils auf jedem Bildausschnitt angewandt. Ebenfalls wurde jeder Bildausschnitt klassifiziert. Zuletzt wurden alle Bewertungen der Bildausschnitte in einem Histogramm zusammengefasst. Dies ist auf Abbildung 4 dargestellt.

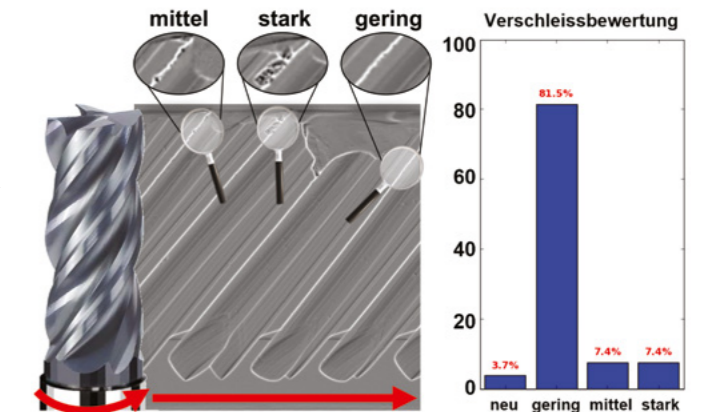


Abbildung 4 Bewertung eines Werkzeuges

## Ausblick

Das entwickelte Verfahren zeigt das Potenzial der Verschleissbewertung mittels einem Vision System. Die Projekterkenntnisse zeigen, dass es unumgänglich ist, mit einer grösseren Datensatz zu trainieren und zu testen. Als Erweiterung müssen nach einer Bewertung die Schleifparameter ausgegeben werden können. Dies, damit das Werkzeug optimal und individuell nachgeschliffen werden kann.

Ein besonderer Dank gilt der Innosuisse, die es ermöglicht und unterstützt hat, dass diese Projektarbeit stattfinden konnte.

## Referenzen

[1] Fraisa SA, „FRAISA | Home“, FRAISA, 2022. <https://www.fraisa.com/de/> (zugegriffen 14. Februar 2021).

## Industriepartner

FRAISA SA  
 Philip Disdorn, philip.disdorn@fraisa.com  
 Philipp Nienhaus, philipp.nienhaus@fraisa.com  
 Yves Krause, yves.krause@fraisa.com

## Projektteam

Max Edelmann, Wissenschaftler Mitarbeiter, max.edelmann@fhnw.ch  
 Antonio Bruno Wissenschaftlicher Assistent, antonio.bruno@fhnw.ch  
 Marius Lerf, Wissenschaftlicher Assistent und Masterstudierender, marius.lerf@fhnw.ch  
 Noah Winkler, Wissenschaftlicher Assistent und Masterstudierender, noah.winkler@fhnw.ch

# Machbarkeitsstudie zum Einsatz synchronisierter Servoantriebe für Stickmaschinen

Um die unterschiedlichen Bewegungsabläufe der einzelnen Maschinenelemente, wie Fadenstößel (Nadel), Stoffdrücker, Unterfadeneinheit und Fadenhebel einer Stickmaschine steuern zu können, kommen üblicherweise Kurvenscheiben zum Einsatz. Der Einsatz dieser erlaubt jedoch keine Flexibilität bei nachträglichen Anpassungen der einzelnen Bewegungsvorgänge. In einer Machbarkeitsstudie wurde untersucht, ob sich die einzelnen Maschinenelemente auch durch synchronisierte Servoantriebe antreiben lassen.

Martin Pischtschan



Abbildung 1: Stickmaschine (Quelle: Fr. Melco)

## Ausgangslage

Momentan werden die einzelnen Maschinenelemente (Nadel, Haken und Fadenhebel) auf mechanischem Wege, unter Verwendung entsprechender Kurvenscheiben, miteinander synchronisiert. Diese Methode bietet sehr hohe Achs-Synchronität, jedoch keine Möglichkeiten, die unterschiedlichen Bewegungsabläufe nachträglich an die Bedürfnisse des Anwenders oder des Stickprozesses selbst (z.B. Verwendung anderen Garns) anzupassen.

Um eine Aussage zur grundsätzlichen Eignung von Elektroantrieben bei dieser Applikation machen zu können, wurde eine Machbarkeitsstudie durchgeführt, die auf einem Simulationsmodell des kompletten Systems der Antriebsstränge basiert.

Als Simulationstool kam Simulink der Firma Mathworks zum Einsatz.

## Zielsetzung

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie soll eine Aussage darüber getroffen werden, welche Parameter die erreichbaren Winkelabweichungen der einzelnen Achsen in welchem Mass beeinflussen und welche maximalen Abweichungen grundsätzlich zu erwarten sind. Dazu soll ein flexibles Simulationsmodell entwickelt werden, welches es ermöglicht, sowohl verschiedene Motoren als auch Servoantriebe und deren Pulsmustererzeugung berücksichtigen zu können. Gleichzeitig soll das Modell Auskunft darüber geben, welche Winkelbereiche der einzelnen Achsen besonders kritisch in Bezug auf die Achssynchronität sind.

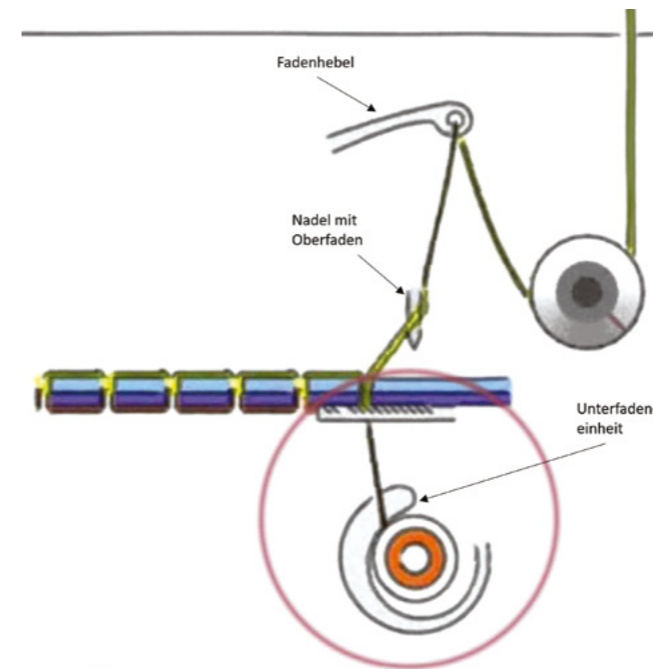


Abbildung 2: Funktionsweise Stickmaschine (Quelle: www.threadsmagazine.com; modifiziert)

## Funktionsweise einer Stickmaschine

Eine Stickmaschine besteht im Wesentlichen aus vier Maschinenelementen. Ein Nadelantrieb, der eine kontinuierliche Auf- und Abwärtsbewegung ausführt und den Oberfaden führt. Eine Unterfadeneinheit (Fadenhaken), die mit doppelter Drehzahl rotiert und den Oberfaden nach jedem Stich greift und dadurch eine Umschlingung von Ober- und Unterfaden erzwingt, der sogenannte Fadenhebel, der in Abhängigkeit von der Position der Nadel Zug auf den Oberfaden ausübt, sowie die Vorschubeinheit, die

eine Horizontalbewegung des Textils nach erfolgtem Stich erzeugt. Die Vorschubeinheit wurde in der Machbarkeitsstudie nicht berücksichtigt. Da die Unterfadeneinheit den Oberfaden nach dem Durchstechen des Textilmaterials sicher greifen muss und der Fadenhebel gleichzeitig einen definierten Zug auf den Oberfaden ausüben muss, ist eine hohe Achssynchronität gefordert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Forderungen bzgl. der Winkelgenauigkeiten nicht konstant, sondern massgeblich von der Position der Nadel abhängig sind.

## Aufbau des Simulationsmodells

Um ein Simulationsmodell zu entwickeln, welches das Verhalten des Gesamtsystems hinreichend genau abbildet, werden folgende Teilsysteme für jeden einzelnen Antriebsstrang benötigt:

- Ansteuerung der Leistungselektronik (Diskretisierte Regeleinheit inkl. Sensorik)
- Leistungselektronik (Frequenzumrichter, Zwei-Level-Topologie)
- Motormodell

Da ein Grossteil der heutzutage verfügbaren Servomotoren als Permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PMSM) angeboten werden, wurde ein Modell dieses Maschinentyps in der Simulation verwendet. Um das Verhalten der Regeleinheit so realistisch wie möglich abbilden zu können, wurden alle Regler diskret, in Form von Matlab-Code, umgesetzt, deren Zykluszeiten variabel einstellbar sind. Die Regelung der Drehzahl der einzelnen Achsen basiert auf dem Prinzip der feldorientierten Regelung (FOR). Die Leistungselektronik wurde als verlustloser Wechselrichter in Zwei-Level-Topologie abgebildet, dessen Schaltverhalten auf dem Prinzip der Raumzeigermodulation, mit variabler Schaltperiode,

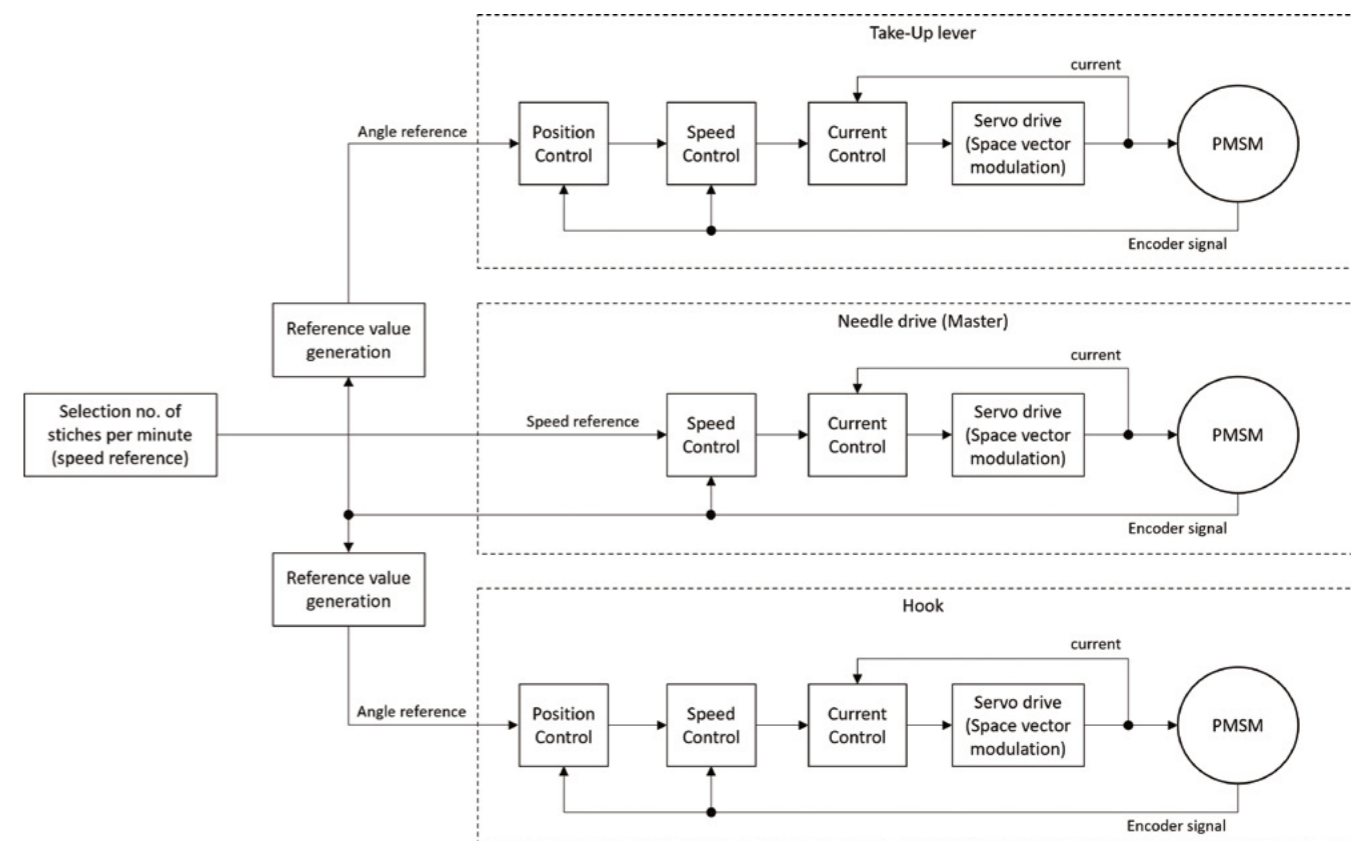


Abbildung 3: Grundstruktur des Simulationsmodells

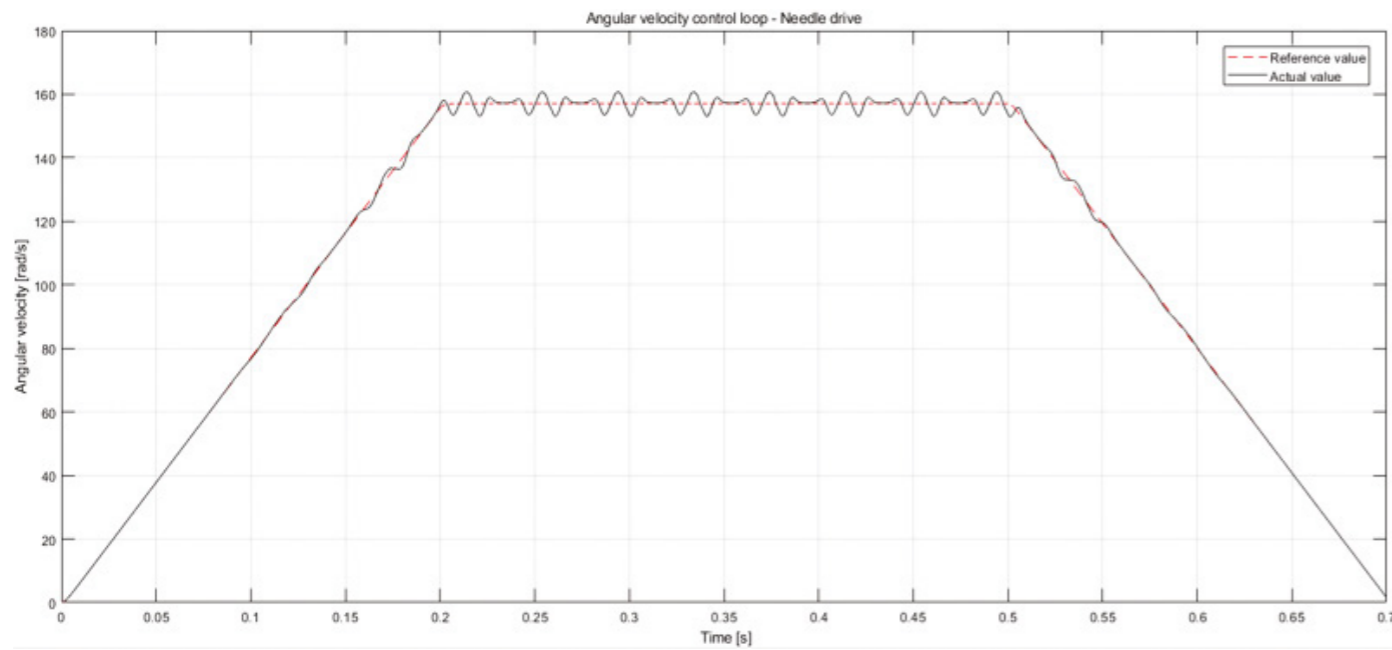


Abbildung 4: Drehzahl Soll & -Istwert des Nadelantriebs (Stichzahl)

basiert. Als Master-Antrieb fungiert der Nadelantrieb, wobei dessen Rotorposition, analog zum Verhalten einer mechanischen Kurvenscheibe, über jeweils entsprechende Übertragungsfunktionen (abhängig von der verwendeten Mechanik), als Referenzposition für den Antrieb des Fadenhakens und des Fadenhebels fungieren (siehe Abbildung 3).

**Simulationsergebnisse**

Ausgangslage für die Simulation des Gesamtsystems bildet die trapezförmige Drehzahlvorgabe für den Nadelantrieb (vgl. Abbildung 4), welche in der Realität einer rampenförmigen Erhöhung der Stichzahl bis auf 1500 Stiche pro Minute und anschließender Absenkung bis zum Stillstand entspricht.

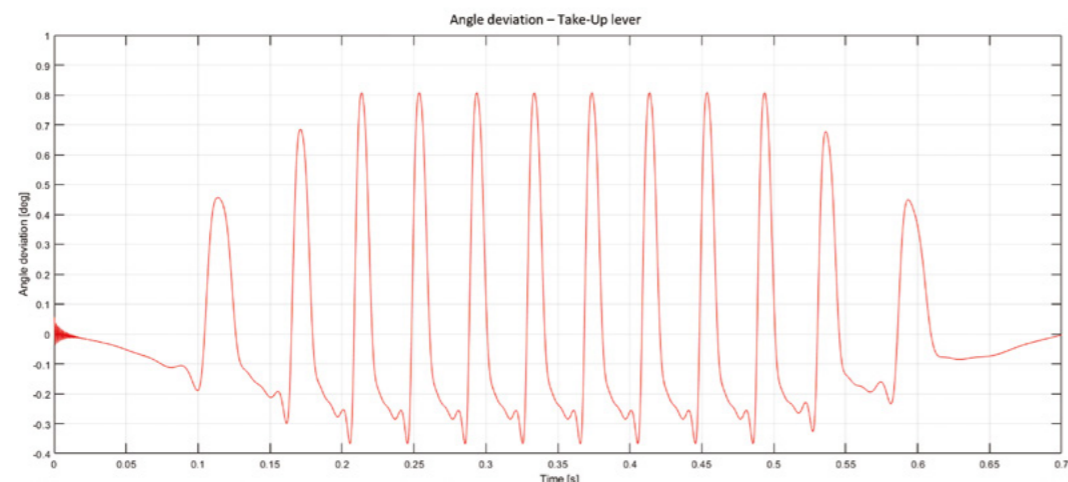
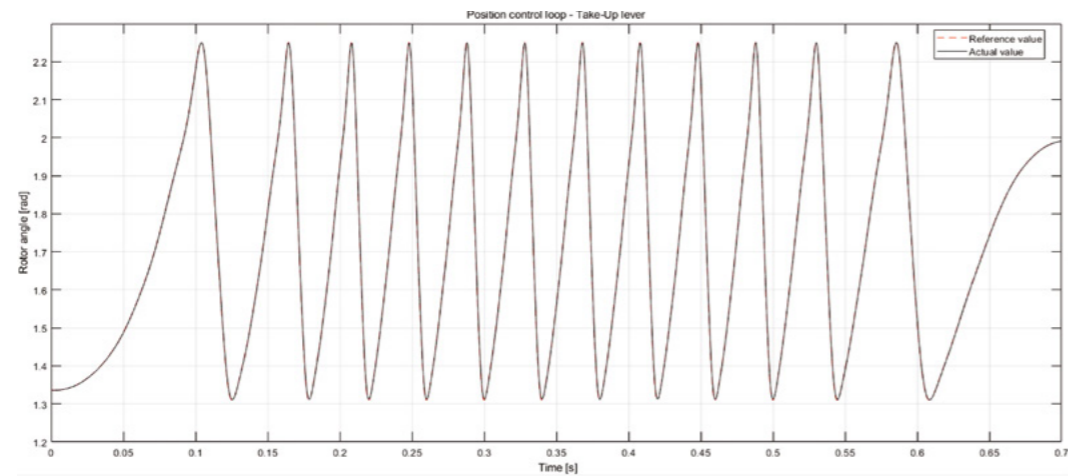


Abbildung 5: Vergleich zw. Winkelsoll & -Istwert sowie Winkelfehler des Fadenhebels

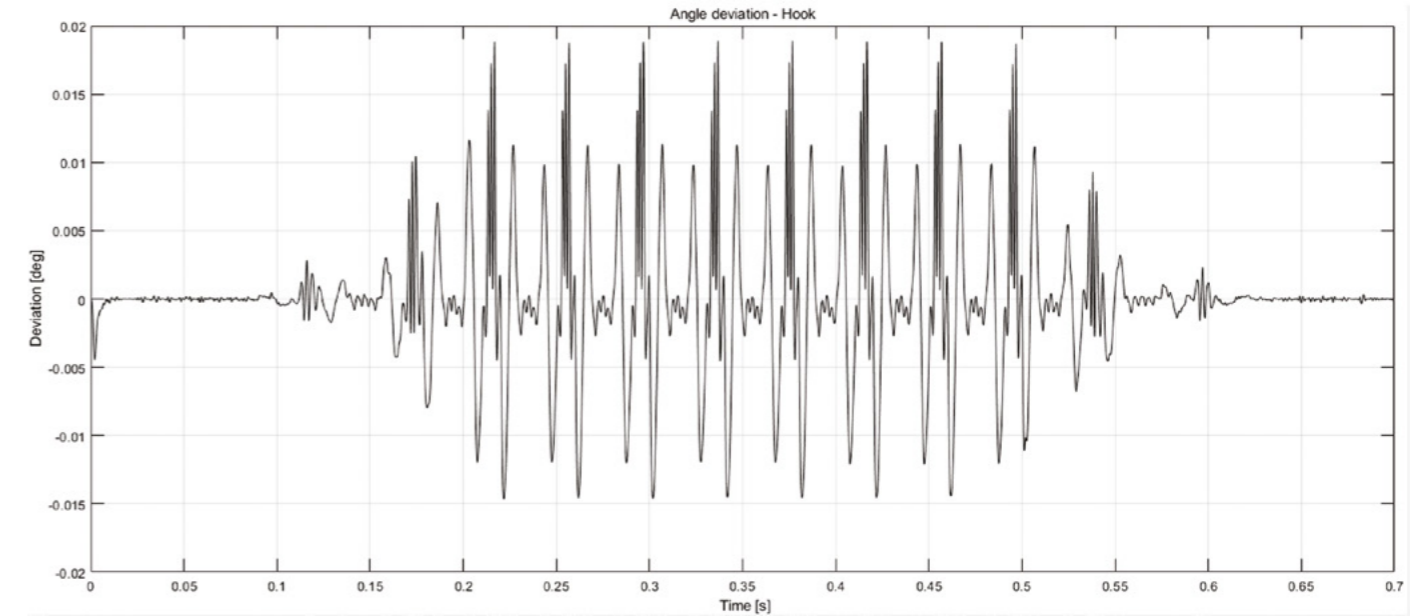
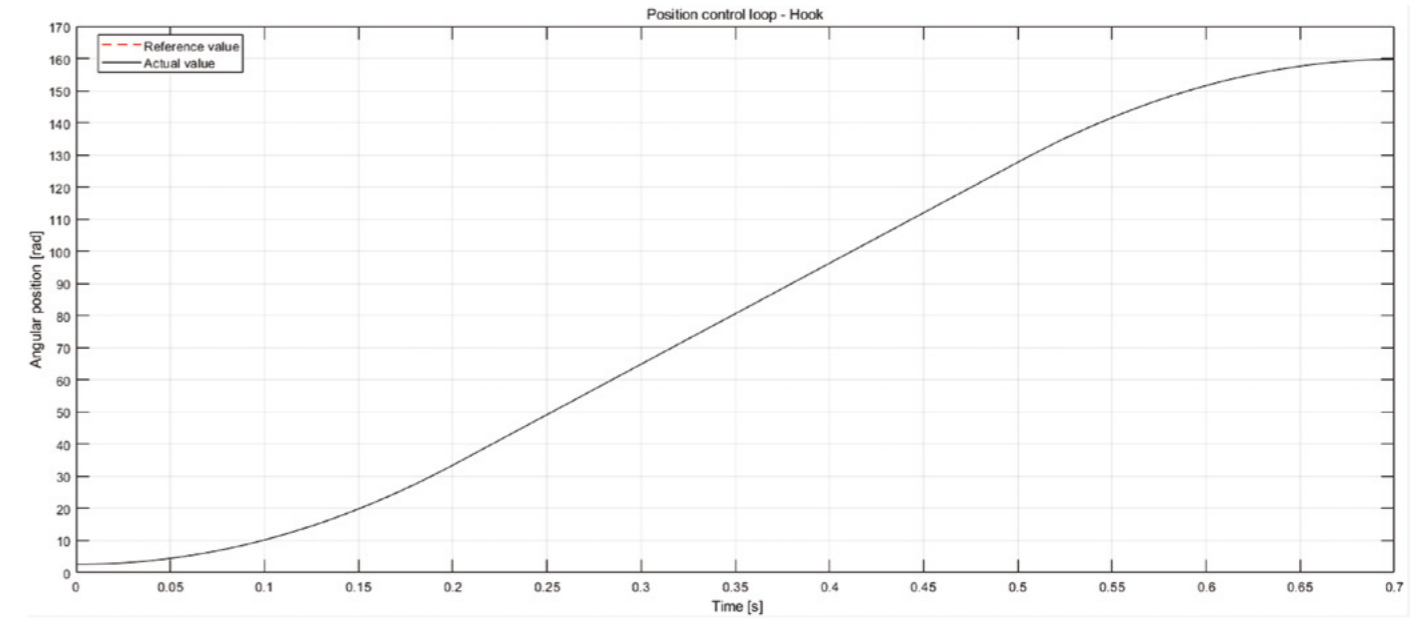


Abbildung 6: Vergleich zw. Winkelsoll & -Istwert sowie Winkelfehler des Fadenhakens

Die Simulation zeigt, dass sowohl der Fadenhebel als auch die Unterfadeneinheit den sich daraus ergebenden Winkelsollwerten sehr gut folgen.

Die Winkelabweichungen des Fadenhebels (Abbildung 5) liegen im gesamten Drehzahlbereich im Intervall  $[-0.4^\circ; 0.8^\circ]$ .

Die Winkelabweichungen des Fadenhakens (Abbildung 6) liegen im gesamten Drehzahlbereich im Intervall  $[-0.015^\circ; 0.02^\circ]$ .

**Fazit**

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich Servoantriebe, die untereinander durch einen entsprechenden Motion-Controller synchronisiert werden, grundsätzlich zur Verwendung bei dieser Applikation eignen und somit die Möglichkeit bieten, Stickmaschinen zu entwickeln, die dem Anwender mehr Möglichkeiten zur Einflussnahme

auf den Stickprozess bieten. In einem weiteren Schritt bietet das Simulationsmodell die Grundlage für die Entwicklung eines Servoumrichters, der als Funktionsmuster an realen Stickmaschinen zum Einsatz kommen kann.

**Projektteam**

Martin Pischtschan, Dozent, Projektleiter und Betreuer, martin.pischtschan@fhnw.ch  
 Dominique Pascal Torti, Wissenschaftlicher Assistent und Masterstudierender, dominiquepascal.torti@fhnw.ch

# Vehicle-To-Grid - Bidirektionales Laden von Elektromobilen real umgesetzt

Die Elektromobilität soll einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten. Dafür muss die wachsende Zahl an Elektroautos einschliesslich der Ladestationen in die bestehende Stromversorgung integriert werden. Das ist eine grosse Herausforderung, schafft andererseits aber neuartige Möglichkeiten für einen netzdienlichen Betrieb. Ein Forschungsprojekt im Basler Areal «Erlenmatt Ost» zeigt, dass sich Elektroautos gleichzeitig für Carsharing, Zwischenspeicherung von Solarstrom und Reduktion der Netzbelastung nutzen lassen, in Kombination mit intelligenter Regelungstechnik.

**David Zogg**



Abbildung 1: Bidirektionale Elektromobile im Areal Erlenmatt

## Ausgangslage und Zielsetzungen

Das Pilotprojekt in Erlenmatt-Ost wurde vom Bundesamt für Energie finanziell unterstützt. Im Zentrum des Projekts stehen zwei Elektromobile in der Tiefgarage, welche bidirektional geladen werden (Bild 1). Die Ladestationen erlauben also nicht nur das Laden, sondern auch das Entladen der Batterien. Die sogenannte «Vehicle-To-Grid-Technologie» (V2G) macht es möglich, die Elektroautos als Pufferspeicher zu nutzen. Dabei speichern sie in den Stunden mit hohem Solarertrag bzw. tiefer Netzbelastung Energie, um diese in Hochlastzeiten wieder zu nutzen (Bild 2). Damit können die Bezugsspitzen reduziert werden («Peak Shaving»). Die Lade- und Entladevorgänge werden über ein zentrales Energiemanagementsystem gesteuert, welches vom Spin-off «Smart Energy Control» der FHNW entwickelt wurde.

## Nutzung der vorhandenen Speicherkapazitäten und Proof of Concept

Die Batterien der beiden E-Mobile haben zusammen eine Speicherkapazität von 80 kWh. Ca. die Hälfte kann für V2G genutzt werden. Damit können täglich ca. 40 kWh an Energie von den Tief- in die Hochlastphasen verlagert werden. So kann sowohl der Eigenverbrauch der PV-Anlagen gesteigert werden wie auch das Stromnetz entlastet werden. Da die Lade- und Entladeleistungen der Fahrzeuge herstellerseitig begrenzt sind, hat das Batteriemangement auch keinen wesentlichen Einfluss auf die Lebensdauer. Im Projekt standen pro Fahrzeug 10 kW an Regelleistung bereit, was in Zukunft seitens Hersteller erhöht wird. Im Proof of Concept ging es darum zu zeigen, dass die Technologie unter realen Bedingungen funktioniert. Die Spitzenleistung des Areals von ca. 300 kW konnte zuverlässig reduziert werden.

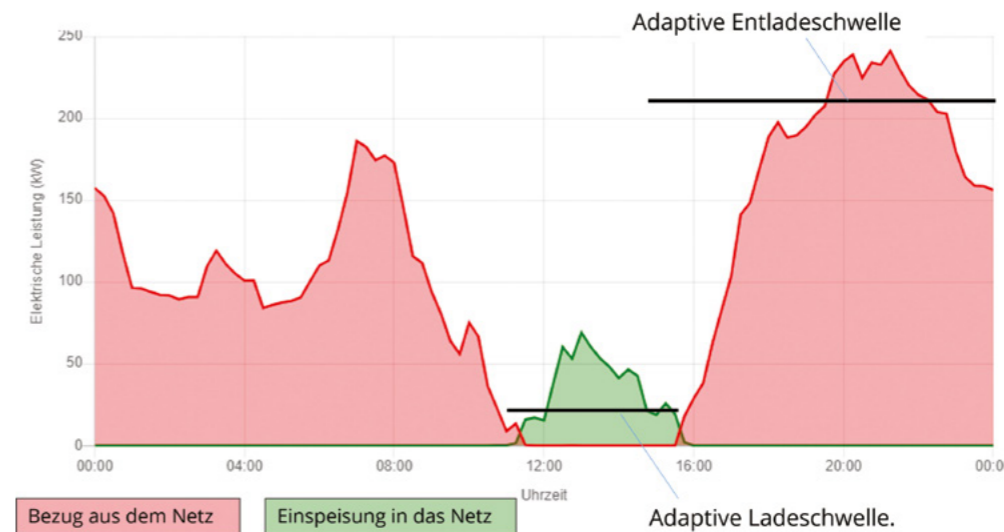


Bild 2: Zeitlicher Verlauf von Netzbezug und Einspeisung mit adaptiven Lade- und Entladeschwellen

## Kombination mit Car-Sharing und Integration einer Cloud-basierten Buchungsplattform

Die grosse Herausforderung war die Kombination mit einem Car-Sharing-Angebot. Die beiden Fahrzeuge konnten von den Bewohnern über eine App gemietet werden. Dadurch wurden die Fahrzeuge regelmässig genutzt. Die Cloud-basierte Buchungsplattform wurde software-technisch mit dem Energiemanagementsystem gekoppelt. Damit war ein paar Stunden im Voraus bekannt, wann die Fahrzeuge mit welcher geforderten Reichweite genutzt werden. Der Algorithmus konnte damit auch die Benutzerbedürfnisse optimal berücksichtigen. Somit konnte die Flexibilität der Fahrzeugbatterien ohne Einschränkung des Komforts vollständig ausgeschöpft werden.

tung, Elektromobile würden das Stromnetz zusätzlich belasten. Im Gegenteil, mit bidirektionalem Laden kann es leistungsmässig sogar entlastet werden.

## Schweizweites Folgeprojekt

Um eine schnelle, wirtschaftliche Markteinführung zu ermöglichen, hat das BFE im Herbst 2021 zusammen mit Partnern aus Industrie und Forschung mehrere Projekte gestartet. Dabei wird die Skalierbarkeit und die Wirtschaftlichkeit aus der Perspektive der Fahrzeugbesitzer, der Energieanbieter und der Netzbetreiber untersucht. Seit Sommer 2022 läuft ein grösseres Demonstrationsprojekt «V2X Suisse» mit dem Carsharing-Anbieter Mobility, in welchem 50 E-Mobile bidirektional eingebunden werden. Dabei konnte auf den Erfahrungen des Vorgänger-Projektes in «Erlenmatt Ost» aufgebaut werden.

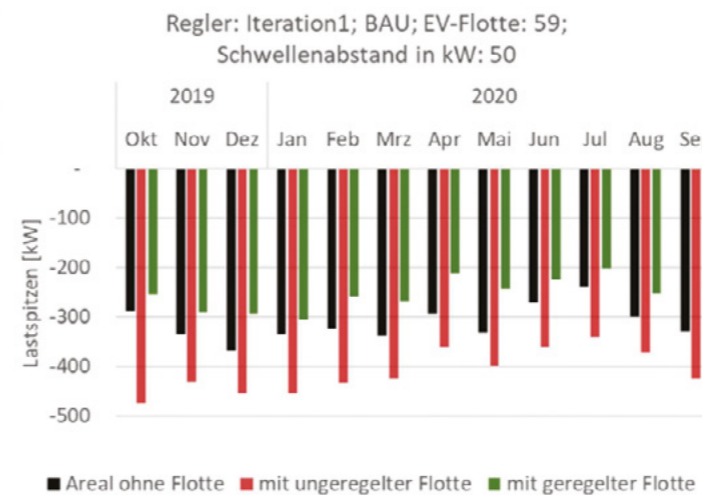


Bild 3: Monatliche Lastspitzen (kWp) des Areals ohne/mit Flotte von 59 Fahrzeugen und Reduktion durch Regelung

## Nutzen kommt mit grosser Flotte

Mit grösseren Elektromobil-Flotten, grösseren nutzbaren Batteriekapazitäten und erhöhten Entladeleistungen werden in Zukunft wesentlich grössere Effekte erzielt, welche sich auch finanziell auszahlen werden. Um dies zu zeigen, wurden Simulationsrechnungen an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) durchgeführt. Gemäss diesen Berechnungen kann eine Flotte aus ca. 60 Fahrzeugen die monatlichen Bezugsspitzen aus dem externen Stromnetz bis 50% reduzieren (Bild 3). Auch kleinere Flotten mit 15 bis 30 Fahrzeugen zeigen schon deutliche Effekte. Die Resultate widerlegen die landläufige Behauptung,

## Referenzen

- [1] B. Vogel: «ELEKTROMOBIL UND SPEICHER IN EINEM», im Auftrag des Bundesamts für Energie, März 2022. [https://smart-energy-engineering.ch/wp-content/uploads/2022/12/10827-MOBILITAET\\_Erlenmatt-Ost\\_2022.03.17\\_BFE\\_Vogel\\_D.pdf](https://smart-energy-engineering.ch/wp-content/uploads/2022/12/10827-MOBILITAET_Erlenmatt-Ost_2022.03.17_BFE_Vogel_D.pdf)
- [2] D. Zogg: «Intelligente Einbindung der Elektromobilität», Elektrotechnik 4/16, April 2016. [https://smart-energy-engineering.ch/wp-content/uploads/2020/08/ET\\_Elektrotechnik\\_750\\_0029\\_2118674\\_Inhalt\\_30.pdf](https://smart-energy-engineering.ch/wp-content/uploads/2020/08/ET_Elektrotechnik_750_0029_2118674_Inhalt_30.pdf)
- [3] D. Zogg: «Gebäudetechnik mit Elektromobilität optimal kombinieren», HK Gebäudetechnik 3/19, März 2019 [https://smart-energy-engineering.ch/wp-content/uploads/2020/08/fa-Special\\_HK\\_19-03\\_04\\_Anford-EFH-MFH\\_JW\\_GzD-PDF\\_v01-ENTWURF.pdf](https://smart-energy-engineering.ch/wp-content/uploads/2020/08/fa-Special_HK_19-03_04_Anford-EFH-MFH_JW_GzD-PDF_v01-ENTWURF.pdf)

## Projektteam

Prof. Dr. David Zogg, Dozent Regelungstechnik, david.zogg@fhnw.ch  
 Dr. Anna Roschewitz, novatlantis, Beratung und Projektleitung  
 Dr. Jörg Musiolik, Christian Winzer, Tim Dzukowski (ZHAW)  
 Andreas Appenzeller, Thomas Kramer, ADEV Energiegenossenschaft, Betreiber Areal

## Auftraggeber

Bundesamt für Energie (BFE), Forschungs- und Demonstrationsprojekt

# Messung von weichmagnetischen Materialien, die mit einem serientauglichen 3D-Druckverfahren hergestellt werden

Müssen metallische 3D-Drucke wirtschaftlich und in grossen Serien hergestellt werden, dann ist der weltweit führende Hersteller, Exentis Group AG in Stetten, der richtige Partner. In einem Förderprojekt des Aargauer Forschungsfonds hat Exentis, in Zusammenarbeit mit dem IA, die Machbarkeit von 3D-gedruckten Stator- und Rotorblechen (Elektroblechen) aufgezeigt.

Hans Gysin

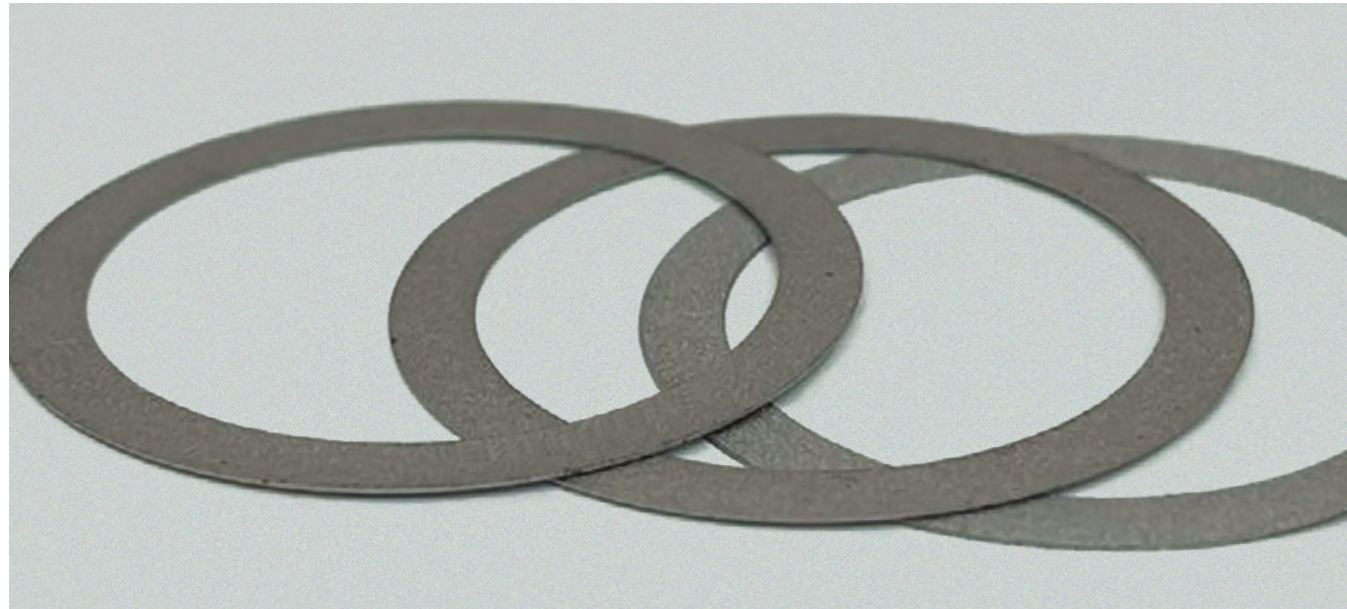


Bild 1

## Problematik, Vorgehen und Umsetzung anhand von 6 Bildern

**Bild 1:** Exentis druckte weichmagnetische Metallpulverpasten mit ihrem Siebdruckverfahren zu Test- und Messringen. Nach dem Sintern sind diese Ringe vollwertige «Elektrobleche» mit praktisch gleichen mechanischen und magnetischen Eigenschaften wie gewalzte Bleche mit der gleichen Materialzusammensetzung. Das Know-how von Exentis steckt im gesamten Prozess von der Pulvermischung über die selbst entwickelte Druckpaste bis zum Drucken und Sintern. Unterstützung durch das IA brauchte Exentis hauptsächlich in der Messung der magnetischen (physikalischen) Eigenschaften dieser erstmalig gedruckten Elektrobleche. Aus diesem Grund wurden die ersten Teststücke als Ringe gedruckt. Ringe sind die beste Form für die Messung der magnetischen Eigenschaften.

**Bild 2:** Das IA hat zur Messung die dünnen Ringe isoliert und gestapelt (Genauigkeit, Wirbelströme) und dann rezeptartig mit zwei Wicklungen ausgerüstet. Der Strom in der primären Wicklung wird dabei zu einer induzierten Spannung auf der sekundären Seite und aus diesem Zusammenhang können Grössen wie Sättigungsflussdichte, Koerzitivfeldstärke, Verlustleistungen usw. bestimmt werden. Mit den geeigneten Messgeräten kann mit dieser Methode auch die gesamte Hystereseurve aufgezeichnet werden. Untersucht wurden in diesem Projekt Materialzusammensetzungen aus Eisen und Nickel, aber auch aus Eisen und Silizium. Der Messstapel 112 im Bild ist eine Eisen-Silizium-Aluminium Legierung, die als Sendust bekannt ist. Jede dieser Materiallegierungen braucht eine eigens entwickelte Druckpaste, um optimale Resultate zu erzielen.

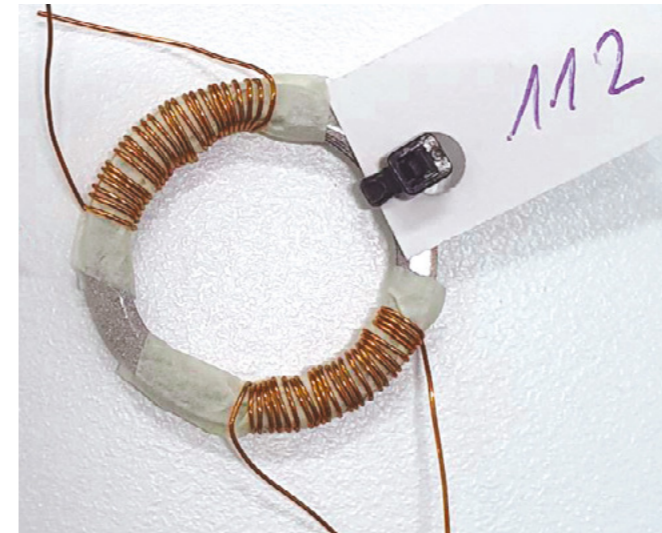


Bild 2

**Bild 3:** Die Ringform für die Messung bietet eigentlich eine hohe Genauigkeit für die Messresultate, denn der magnetische Fluss bleibt im Ring. Es existieren also «keine» Streufelder und damit eine an 100% grenzende Kopplung zwischen beiden Wicklungen. Weitere Parameter, wie z.B. die Steigung der Wicklung oder die «Luft» zwischen Wicklung und Messring, können trotzdem die Genauigkeit der Messung beeinflussen. Die grösste Überraschung bot aber die Norm zur Bestimmung der weichmagnetischen Eigenschaften. Will man Materialvergleiche machen, dann schlägt die Norm vor, Grössen bei einer Feldstärke von 2'500, 5'000 oder 10'000 A/m zu messen. Diese Werte liegen bei weichmagnetischen Materialien aber im Bereich der Sättigung, also nicht im Bereich der Anwendung des Werkstoffes. Sättigung heisst aber zunehmend Streufluss und damit falsche Messwerte. Die Wicklungen wurden deshalb entsprechend angepasst und ineinander gewickelt (Bild 3). Für den Messpunkt bei z.B. 5'000 A/m sind gegen 20 A Strom in der Primärwicklung nötig.

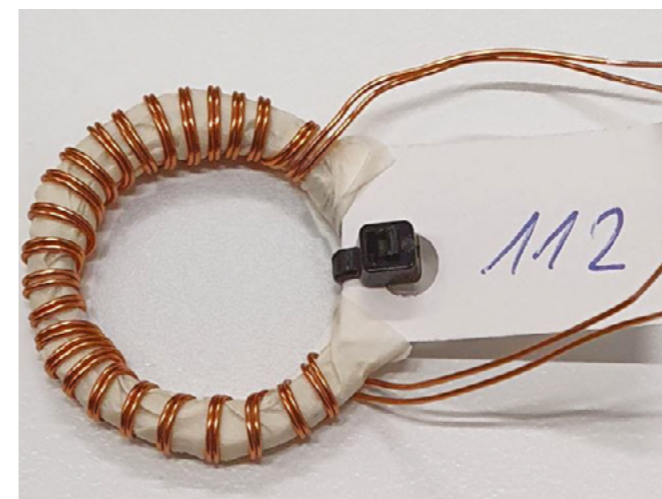


Bild 3

**Bild 4:** Das Resultat der Messungen war schliesslich die bekannte Hystereseurve. Sie zeigt, bei welcher Feldstärke welche Flussdichte im Material zu erwarten ist, d.h. sie liefert die magnetischen Eigenschaften des Materials wie

Flussdichten, Koerzitivfeldstärken, Remanenz, relative Permeabilität, Verlustleistung usw. Die Fläche in der Kurve ist ein Mass für die Verlustleistung des Materials und gilt für die Frequenz, bei der die Hystereseurve aufgenommen wurde. Also je nach Aussteuerung (horizontal, A/m) und Frequenz hat das weichmagnetische Material andere Eigenschaften.

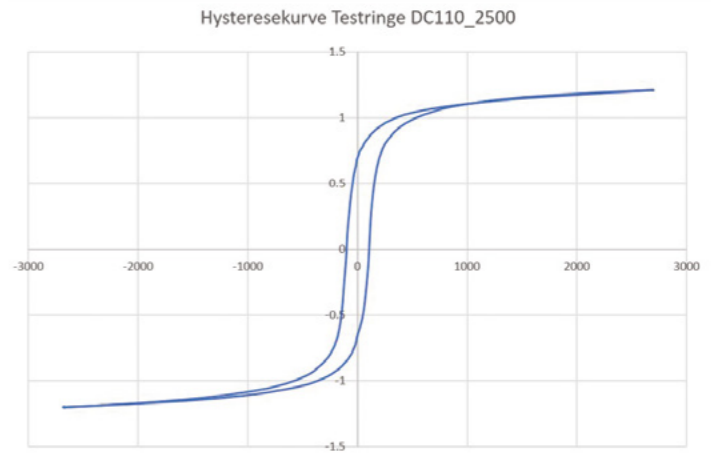


Bild 4

**Bild 5:** Ein modernes Oszilloscope mit Strom- und Spannungssonde sowie USB-Verbindung zum Laptop, diente als Basis für alle Messungen. Bei 50 Hz Messungen genügte ein Netztransformator als Einspeisung, für andere Frequenzen war ein Funktionsgenerator mit Leistungsverstärker notwendig.

Bild 5 zeigt die Auswirkungen von Messungenauigkeiten. Bei der Messung der induzierten Spannung hatte der Oszilloscope-Kanal lediglich 100 µV DC-Offset, was den einzelnen Grössen bis zu 10 % Fehler einbrachte.

Von «einfachen Messungen» der magnetischen Eigenschaften und der Hystereseurve kann also keine Rede sein.

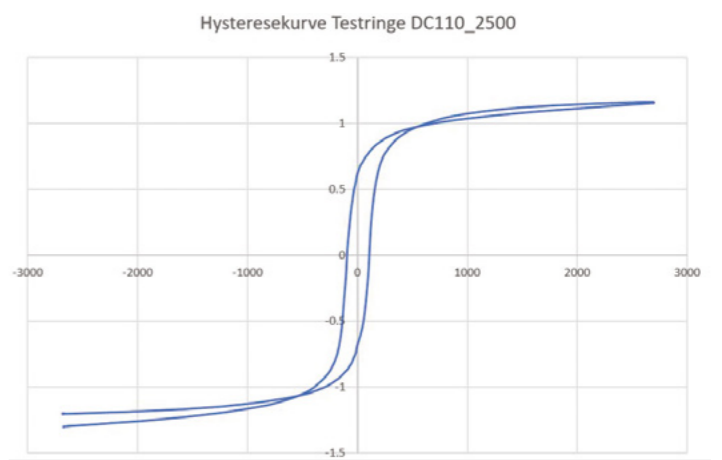


Bild 5

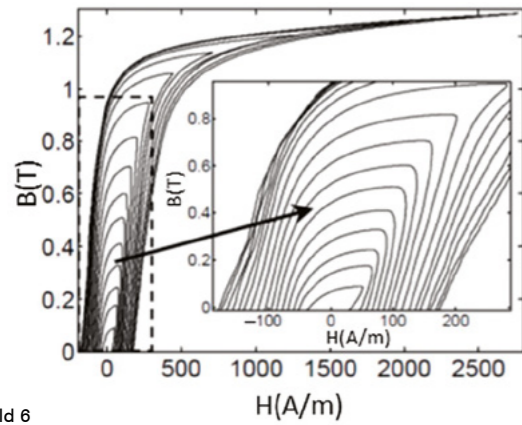


Bild 6

**Bild 6:** Wie bereits erwähnt, sind die Materialeigenschaften wie z.B. die Verlustleistung durch die Ummagnetisierung stark von der Art des «Betriebes» abhängig. Neben der Frequenz ist auch die «Aussteuerung» ein wichtiger Punkt. Das Bild zeigt, wie die Hysteresekurven bei einer reduzierten Aussteuerung (A/m) «zusammenschrumpfen» und damit die Verlustleistung und die Koerzitivfeldstärke verändern.

Will man also ein weichmagnetisches Material bezüglich seiner Daten vollständig charakterisieren, dann werden hunderte von Messungen mit dutzenden von Parametern notwendig.

### Stand und Ausblick

Exentis hat bis zum Abschluss des Projektes, gegen Ende 2022, weit über hundert Druckchargen von Testringen mit unterschiedlichen Materialzusammensetzungen gedruckt. Das IA hat nach gewissen Gesichtspunkten die Ringe und Ringstapel ausgemessen und beurteilt. Exentis besitzt somit ein umfangreiches Know-how bezüglich ihren Druckpasten sowie Druck- und Sinteranforderungen, zugehörig zu den verschiedenen weichmagnetischen Legierungen. Potenzielle Kunden im Bereich «gedruckte Elektroleche» können somit von Exentis über die zu erwartenden Eigenschaften informiert werden. Eine aufwändige Entwicklungs-Zusammenarbeit mit dem Kunden entfällt. Das «Kundenspezifische» an Rotor- und Statorblechen beschränkt sich in Zukunft auf die Form des «Blechs».

### Projektteam

Exentis Group AG, CH-5608 Stetten AG:  
 Dr. Gabriel Reisinger, Projektleiter  
 Dr. Srdan Vasic, CSO - Chief Sales Officer

FHNW / Institut für Automation:  
 Kilian Pedolin, Masterstudierender  
 Prof. Hans Gysin, Dozent, hans.gysin@fhnw.ch

# Mit dem Bachelor-Diplom zu neuen Karriereperspektiven

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

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

### Einblicke in die Unternehmenswelt

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

### Neuer Studientrend – auch in klassischen Disziplinen

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

### Job und Studium kombinieren – unabhängig bleiben

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

### Arbeitgeber profitieren gleich mehrfach

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

### Zentral studieren auf dem neuen Campus Brugg-Windisch

Mit Ausnahme der Optometrie (Olten) und Mechatronik trinational (Muttens) 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](http://www.fhnw.ch/technik)

### Technik-Infotage in Brugg-Windisch

Jeweils im März und November: [www.fhnw.ch/technik/infotage](http://www.fhnw.ch/technik/infotage)



### Das Studium als Investition in die Zukunft

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

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



### Mein Studium, meine Faszination

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

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

# Autonomer Mobiler Roboter steuert Lift

Staveb Automation AG plant, Autonome Mobile Roboter AMR in mehrstöckigen Gebäuden einzusetzen. Da mobile Roboter herstellerseitig für den Einsatz auf nur einer Etage vorgesehen sind, soll diese Einschränkung eliminiert werden und als Alleinstellungsmerkmal für den Verkauf von Gesamtsystemen einen Wettbewerbsvorsprung verschaffen.

**Wolfgang Fischer**



Abbildung 1: OMRON LD-60/90

## Ausgangslage

Staveb Automation AG erstellt Automationslösungen für eine breite Palette von Anwendungen und will mit der AMR Familie in die mobile Robotik expandieren. Viele Kundenanfragen erreichen Staveb, ob mobile Roboter auch Lift fahren können. Gebäude für Produktion und Logistik sind in der Schweiz zumeist mehrstöckig ausgeführt. Die Bodenpreise in der Schweiz sind hoch im Vergleich zu umliegenden Ländern, wo zumeist die Anschaffung eines grossen Grundstückes für nur eine Produktionsebene kostengünstiger ausfällt.

## Autonome mobile Robotik AMR

OMRON ist einer von diversen Herstellern für mobile Roboter, die dafür ausgelegt sind, Aufgaben zu erledigen, wo für sie von Punkt A nach B fahren müssen, ohne dass ein Mensch den genauen Weg vorgibt. Dabei können sie Lasten von einigen Kilogramm bis zu mehreren Tonnen transportieren. Beispielsweise werden mobile Roboter in Spitälern eingesetzt, um Proben ins Labor zu schicken oder Laufwege zu desinfizieren und entlasten so das Pflegepersonal.

AMR ermöglichen die Montage von weiteren Manipulatoren auf ihrer Transportplattform zum Handling oder Bearbeiten von Werkobjekten.

## Zielsetzung

Staveb Automation AG sucht nach einer Lösung, wie das Mitfahren eines Roboters autonom in einem Lift umgesetzt werden kann. Der Warenlift im firmeneigenen Gebäude dient als Show-Case und soll nach Abschluss des Projektes für Kundendemonstrationen dienen.

## Lösungskonzept Systemarchitektur

Als zentrale Komponente verwaltet die Verbindungssteuerung SPS<sup>1</sup> den kompletten Ablauf, tauscht mit dem GUI Bedienung PC<sup>3</sup> (Grafische Benutzeroberfläche) Informationen und Befehle aus und steuert den AMR<sup>2</sup> und die Liftsteuerung<sup>4</sup>.

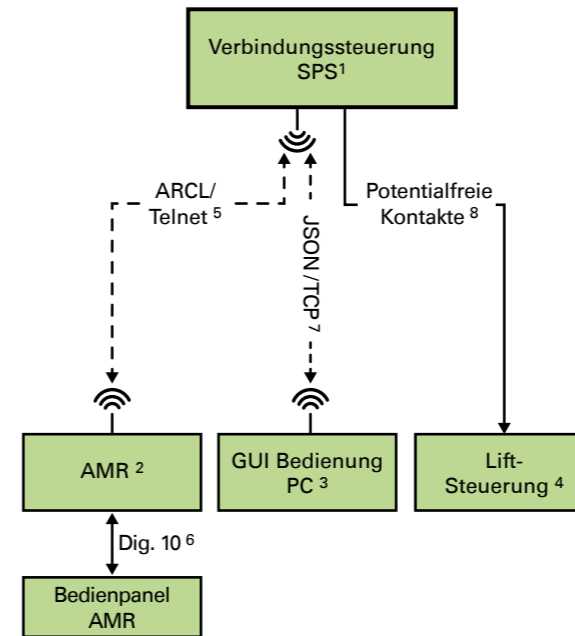


Abbildung 2: Systemarchitektur

## ARCL / TelNet<sup>5</sup> (Advanced Robotics Command Language / Teletype Network)

ARCL / TelNet ist ein OMRON eigenes Kommunikationsprofil für TCP Client/Server Netzwerk, welches eine zeichenorientierte Kommunikation über WiFi mit dem AMR ermöglicht. Dieses Protokoll wird von der OMRON eigenen Software für Konfigurations- und Prozessdaten verwendet.

## Digitale IO<sup>6</sup>

Der AMR verfügt über digitale Ein- und Ausgänge, an denen das Bedienpanel des AMR angeschlossen ist.

## JSON / TCP (Java Script Object Notification / Transmission Control Protocol)

Die Verbindungs-Steuerung verbindet sich über WiFi mit dem GUI (Grafische Benutzeroberfläche) über eine TCP-Schnittstelle und tauscht die Informationen und Befehle im JSON-Format aus. Siehe Beispiel:

```
{"command": "goto", "goal": "EG"}
```

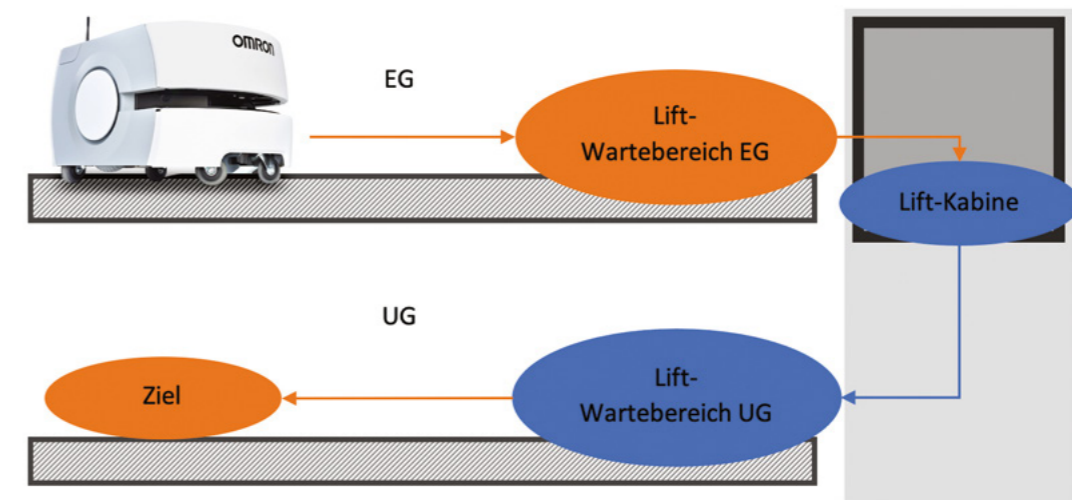


Abbildung 3: Beispiel einer Wegplanung

## Potentialfreie Kontakte

Da für diese Machbarkeitsstudie und Prototypenentwicklung ein limitiertes Budget zur Verfügung steht, können keine neuen Hardwarekomponenten eingekauft und in die Liftsteuerung integriert werden. Auf Empfehlung des Liftherstellers wurden Relais angeschlossen, parallel zu den Innenruf-Tastern der Kabine.

## Automatisierung

Die Herausforderung bei dieser Systemarchitektur bildet die WLAN-Verbindung zwischen SPS und AMR. Diese bricht im Lift ab, da die Stahlwände der Lift-Kabine einen Faraday'schen Käfig bilden. Der Autonome Mobile Roboter arbeitet kurzzeitig verbindungslos autonom vom Einfahren in den Lift, bis er das erste Zwischenziel auf der Zieletage erreicht hat.

In Abbildung 3 wird ein Ablauf dargestellt, in dem der Roboter von einem Standort im EG zu einem Ziel im UG geschickt wird. In orange eingezeichnet sind die Schritte, die direkt von der SPS vorgegeben werden, in blau die Schritte, die der AMR autonom fährt.

## Navigation auf der Karte

Die Umgebung des Roboters kann eingelesen werden, indem dieser manuell umhergefahren wird und dabei nach Wänden und Objekten mittels Lidarscanner sucht. Aus den gewonnenen Daten erstellt er eine grobe Karte, mit der er sich selbstständig lokalisieren kann.



Abbildung 4: Online-Grafikkarte auf dem AMR, links das EG, rechts das UG. Hellbraun die ausgeschlossenen Fahrbereiche, die hellgrünen Bereiche sind die Liftkabinen, die dunkelgrünen Punkte AMR Ziele im Lift und im Wartebereich

Laut der Herstellerphilosophie ist auf dieser Karte nur eine Etage abgebildet, doch in diesem Fall werden beide Etagen nebeneinander abgebildet. Aus Sicht des Roboters befindet er sich auf einem einzelnen Stockwerk mit zwei getrennten Abteilungen.

**Bedienung**

**Bedienpanel AMR**

Auf dem AMR befinden sich ab Werk ein Display und diverse Taster. Um den Funktionsumfang zu erweitern, wurden fünf Bedientaster und ein Quittier-Taster hinzugefügt, die mit den digitalen IOs des AMR verbunden sind.



Abbildung 5: Bedienpanel AMR

**GUI (Grafische Benutzeroberfläche)**

Das GUI wird auf einem Windows-PC installiert und verbindet sich automatisch mit der Verbindungs-Steuerung. Es ermöglicht, dem AMR einen Auftrag zu geben, den aktuellen Status von AMR und SPS auszulesen und kleinere Einstellungen vorzunehmen.

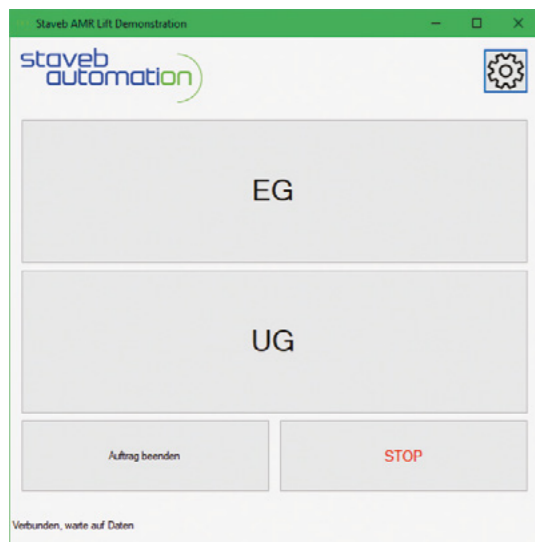


Abbildung 6: GUI (Grafische Benutzeroberfläche) der Verbindungs-Steuerung

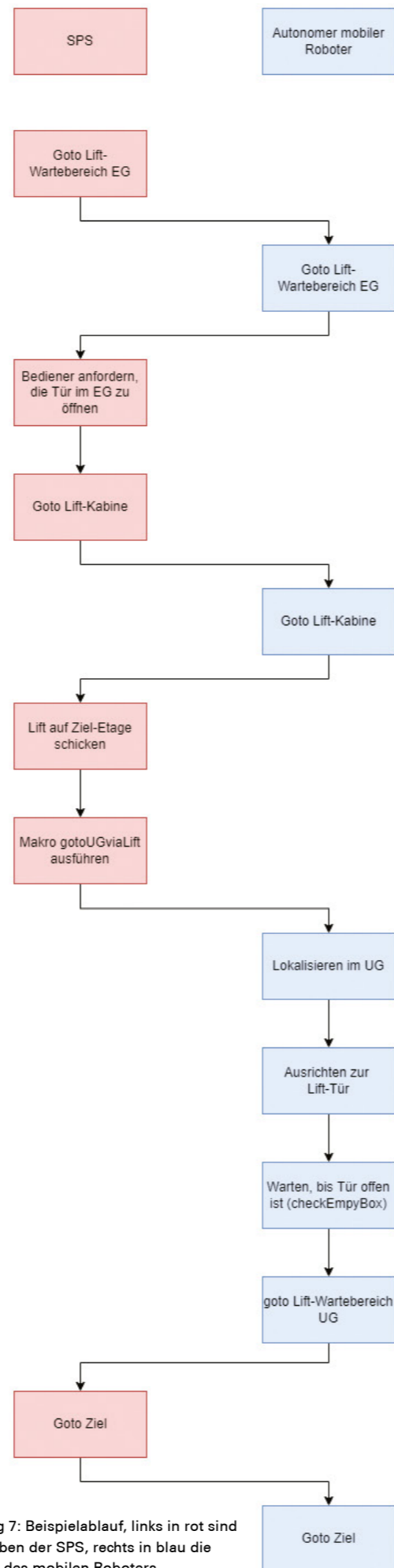


Abbildung 7: Beispielablauf, links in rot sind die Aufgaben der SPS, rechts in blau die Aufgaben des mobilen Roboters

**Resultat und Ausblick**

Versuche haben ergeben, dass dieses Konzept in der Laborumgebung, bzw. im Gebäude der Firma Staveb Automation in Hitzkirch funktioniert. Die Automationsabläufe sind wiederholbar mit minimalem manuellem Eingreifen, um den WLAN-Verbindungsabbruch zu verhindern. Dieser entsteht im Warenlift mit Stahltüren.

In einem weiteren Schritt soll ein WiFi Accesspoint im Lift installiert werden. Eine automatische Türöffnung des Warenliftes macht menschliches Eingreifen somit gänzlich unnötig. Die drahtlose Kommunikation soll durch ein

sicheres Protokoll erfolgen, damit kriminelles Gefahrenpotential durch Hacker ausgeschlossen wird.

**Industriepartner**

Adrian Ruf, Staveb Automation AG, Hitzkirch (LU)  
Philipp A. Walden, Staveb Automation AG, Hitzkirch (LU)

**Projektteam**

Joel Lüdi, BSc. Student Systemtechnik  
Wolfgang Fischer, FHNW Institut für Automation,  
wolfgang.fischer@fhnw.ch

# 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 an-

spruchsvollen Führungs- und Projektaufgaben. Mit einer Weiterbildung an der Fachhochschule Nordwestschweiz sind Sie hervorragend gerüstet für den nächsten Karriereschritt in Ihrem Fachbereich.

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

**Unser Weiterbildungsangebot umfasst die Fachgebiete**

- Automation
- Computer Science
- Digital Industry
- Elektronik
- Einkauf und Beschaffung
- Giessereitechnik
- Kunststofftechnik
- Logistik
- Management und Führung
- Optometrie

**Informationen und Infoabende**

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

**Kontakt**

Hochschule für Technik FHNW  
T +41 56 202 99 55  
[weiterbildung.technik@fhnw.ch](mailto:weiterbildung.technik@fhnw.ch)



# Digitales Modell für die energetische und thermische Simulation eines Outdoor-Grossbildschirms

Die Firma Schaltag AG ist ein führender Hersteller von Outdoor-Grossbildschirmen. In Zusammenarbeit mit dem IA werden im Rahmen eines Innosuisse Projektes diese Grossbildschirme thermisch und energetisch für den Ausseneinsatz optimiert. Mit «Machine Learning» Methoden (ML) soll dabei ein energieeffizienter, optimaler Display-Betrieb garantiert werden.

**Hans Gysin**

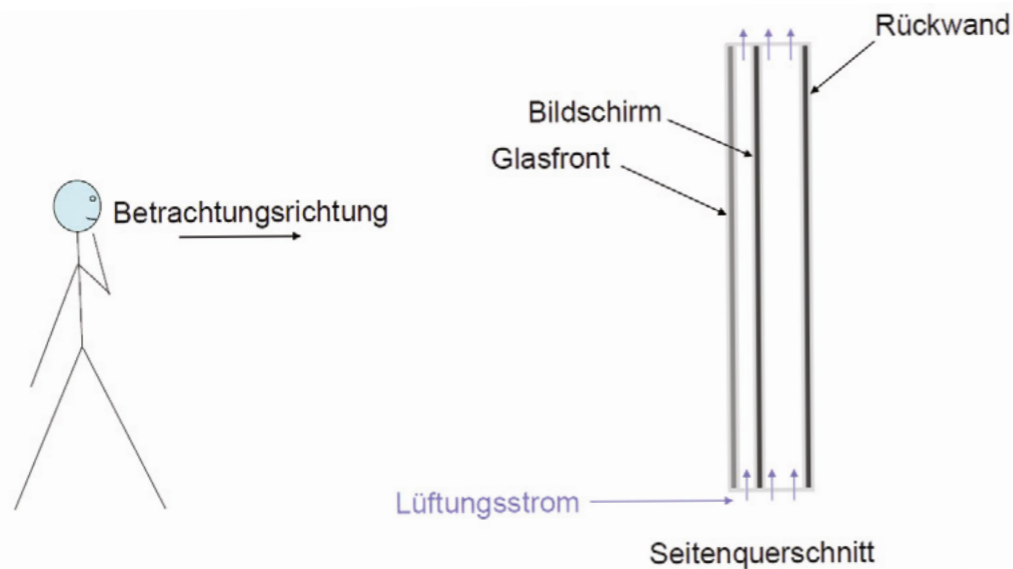


Bild 1

## Problematik / Ziel

ML-Methoden können nur effizient angewendet werden, wenn entsprechende Erfahrungsdaten vorhanden sind. Bei einem Projekt wie diesem würde das bedeuten, dass an verschiedenen Aufstellungsorten, dutzende von Bildschirmen über mindestens ein bis zwei Jahre überwacht und ihre Betriebsdaten aufgezeichnet würden. Dieser grosse Aufwand kann weitgehend eingespart werden, wenn ein «Digitaler Zwilling», mit entsprechenden Simulationen, die Daten liefert.

Ein Teil dieses Grossbildschirmprojektes gehört somit dem Entwurf und dem Einsatz eines dynamischen, digitalen Modells, zur Simulation der energetischen und thermischen Grössen des Bildschirms. Existiert dieses Modell, dann können im Sinne eines «Digitalen Zwillings», mit beliebigen Umwelt- und Betriebsdaten, die Zustandsdaten des Bildschirms simuliert und so die nötigen «virtuellen» Erfahrungsdaten gewonnen werden.

## Vorgehen und Umsetzung anhand von 3 Bildern

Mittels Differentialgleichungssystem, welches das thermophysikalische Verhalten einer vereinfachten Geometrie des Bildschirms beschreibt, sowie mit den hinterlegten Kennlinien, entstand ein Modell des Bildschirms in Python Software.

**Bild 1:** Das Bild zeigt eine vereinfachte Geometrie des Grossbildschirms, die dem Modell zu Grunde liegt, berücksichtigt wurden für die Modellbildung Front- und Rückwand, der Bildschirm und die Luftströmung (Lüfter) zwischen diesen Elementen.

**Bild 2:** Das Bild zeigt das Blockschaltbild des Zustandsmodells, das dem Bildschirm zu Grunde liegt. Eingangsgrössen  $u$  sind dabei z.B. der Stromverbrauch (Betrieb), die Sonneneinstrahlung und die Umgebungstemperatur. Ausgangsgrössen  $y$  sind z.B. die Temperaturen des Bildschirms im Gehäuseinnern.

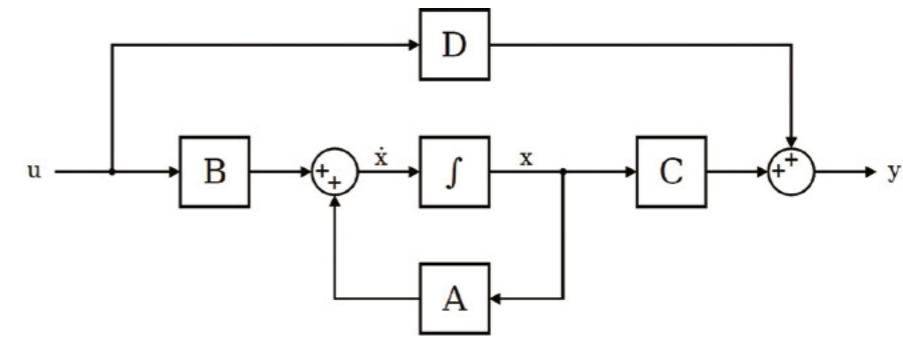


Bild 2

Mit dem Python-Modell und beliebigen Wetterdaten wie z.B. Einstrahlung und Umgebungstemperatur können Stromverbrauch und interne Temperaturen simuliert werden und als Erfahrungsdaten in die ML-Steuerung einfließen.

## Resultate

Die Messungen am Bildschirm haben gezeigt, dass Temperaturen und die Nennleistung auf wenige % genau prognostiziert (berechnet) werden können. Das Modell ist somit geeignet, um realistische Erfahrungsdaten zu erzeugen. Der Outdoor-Grossbildschirm hat seinen digitalen Zwilling bekommen.

**Bild 3:** Das Bild zeigt einen Tagesverlauf der Bildschirmtemperatur  $W_3$  als Gegenüberstellung des berechneten (prophzeiten) Verlaufs und dem tatsächlichen (gemessenen) Verlauf über 24 Stunden.

Für die bestehenden Abweichungen gilt es Erklärungen zu finden und das Modell, wenn nötig, anzupassen (zu optimieren).

## Stand und Ausblick

Das dynamische, physikalische Modell des Grossbildschirms ist als Python-Software vorhanden und aktuell werden Erfahrungsdaten für die ML-Steuerung des Bildschirms erzeugt. Parallel dazu läuft die Entwicklung eines Modells auf

Basis eines Künstlichen Neuronales Netzes (KNN). Im Verlaufe des letzten Jahres konnten an einem Grossbildschirm an der FHNW genügend Messungen durchgeführt werden, um ein ML-Modell zu trainieren. Die ersten Ergebnisse zeigen eine überraschend hohe Präzision der Prognose.

Da stellt sich natürlich die Frage, warum nicht ein KNN als Digitalen Zwilling?

Auf der «Suche» nach einem energieeffizienteren Gerät wurden auch konstruktive Anpassungen am Grossbildschirm notwendig. Solche Anpassungen können beim physikalischen Modell korrigiert und die Auswirkungen simuliert werden. Beim KNN fängt man wieder von vorne an. D.h. Bildschirm anpassen, Messdaten generieren und dann ein KNN trainieren. Man kennt also erst nach «langer Zeit» die Auswirkungen einer Bildschirmanpassung. Somit werden in naher Zukunft wohl beide Modelle ihre Berechtigung haben.

## Projektteam

Schaltag AG, CH-8307 Effretikon:  
Walter Fröhlich, Head of Engineering  
Dr. Michael Buscher, VR-Präsident

FHNW / Institut für Automation:  
Nils Strassmann, MSE Student und Wiss. Assistent  
Prof. Hans Gysin, Dozent, hans.gysin@fhnw.ch

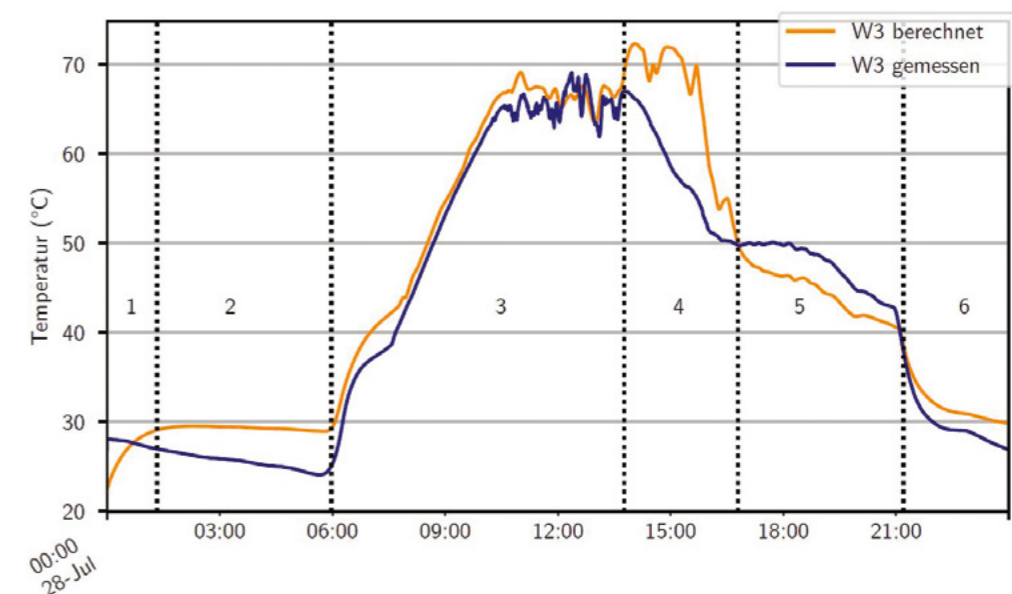


Bild 3

# Energy Harvester für rotierende Sensorelektronik

Im Rahmen eines durch Innosuisse unterstützten Innovationsprojektes arbeitet die FHNW zusammen mit der Firma Ferrum Packaging AG, dem führenden Hersteller von Verpackungsmaschinen in der Getränke- und Lebensmittelindustrie, an einer intelligenten Prozessüberwachung. Da sich die Sensorelektronik aufgrund der mechanischen Einbausituation selbst mit Energie versorgen muss, wird ein Energy Harvester benötigt.

**Pascal Schleuniger**



Abbildung 1: Harvester-Rotor mit bis zu 12 Wicklungen inklusive der Harvester Messelektronik

## Ausgangslage

Um den Prozess kontinuierlich und vertieft zu überwachen, sollen industrielle Maschinen für die Getränke- und Lebensmittelindustrie künftig mit einer Messsensorik ausgerüstet werden. Aufgrund der mechanischen Einbausituation befindet sich diese Sensorik auf einer Welle, welche sich um zwei Achsen dreht. Eine Versorgung mit Kabeln oder über Schleifkontakte ist deshalb nicht realisierbar. Die Messdaten werden mit einer drahtlosen Datenverbindung an eine zentrale Erfassungseinheit gesendet und dort weiterverarbeitet. Die Speisung für die Sensorelektronik soll dabei mit einem Energy Harvester realisiert werden, welcher mechanische in elektrische Energie wandelt. Gefordert wird eine Dauerleistung von ca. 1W bei einer stabilisierten 3.3V Speisung ab einer Umdrehungszahl von ca. 1000U/min. Um den konstruierten Energy Harvester zu validieren, werden ein Teststand sowie eine spezifische Messelektronik benötigt.

## Funktionsweise Energy Harvester

Aufgrund der Rotationsbewegung mit einer relativ hohen Umdrehungszahl bietet es sich an, einen Energy Harvester nach dem Elektromotoren-Prinzip zu entwickeln. Dabei werden auf der rotierenden Welle Wicklungen mit lackisoliertem Kupferdraht und auf dem nicht rotierenden Werkzeugteil Permanentmagnete angebracht. Bewegen sich die Leiterschleifen der Wicklungen durch das Magnetfeld, wird eine Spannung induziert, welche mit steigender Drehzahl zunimmt. Die Leiterschleifen bewegen sich durch ein lokales, statisches Magnetfeld, was zu Flussänderungen mit unterschiedlicher Polarität und somit zu einer induzierten Wechselspannung führt. Diese wird gleichgerichtet und mit einem DC/DC Wandler auf 3.3V stabilisiert. Die Schwierigkeit dieses spezifischen Energy-Harvesters liegt darin, dass die Magnete aufgrund der engen Einbausituation nicht durchgängig rund um die Welle angebracht werden können. Die Impedanz

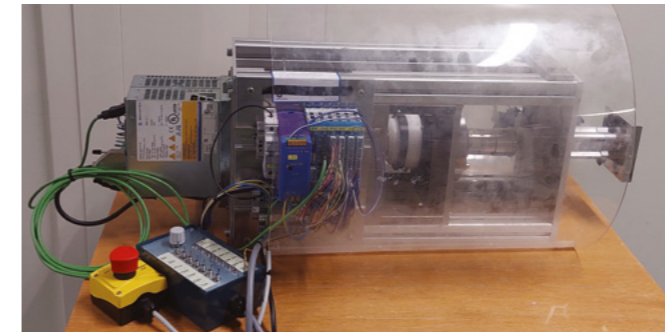


Abbildung 2: Prüfstand für Sensorelektronik und Energy Harvester

der Wicklungen, in welche nicht induziert wird, ist so hoch, dass eine grössere Leistungsabgabe verhindert wird. Deshalb werden alle Wicklungen parallel ausgeführt und nach den Gleichrichtern zusammengeführt. Damit diese gleichgerichtete Spannung nicht zu gering ausfällt, werden zum einen möglichst viele Windungen angebracht und Gleichrichter mit Schottky Dioden eingesetzt.

## Prüfstand für Sensorelektronik und Energy Harvester

Aufgrund der unregelmässigen Anordnung der Magnete, der Vielzahl an spezifischen Materialeigenschaften und des nicht exakt spezifizierbaren Aufstartverhaltens der Sensorelektronik wurde auf eine detaillierte elektromagnetische Simulation des Harvesters verzichtet und eine grobe Dimensionierung per Handrechnung durchgeführt. Zudem wurde ein Prüfstand entwickelt, in welchem die Sensorwellen inklusive Energy Harvester bei unterschiedlichen Drehzahlen und Winkelbeschleunigungen getestet werden können. Ein Servomotor wird mit einer SPS angesteuert und kann die Welle inklusive Messelektronik und Energy Harvester auf eine beliebige Drehzahl zwischen 0 und 2500 U/min bringen. Bei hohen Drehzahlen und aufgrund des relativ grossen Durchmessers der Sensorwelle, können G-Kräfte von mehreren Hundertfachen der Erdanziehung auftreten. Deshalb ist eine Plexiglas-Schutzverkleidung notwendig.

## Messelektronik für Prüfstand

Um die Funktionsweise des Harvesters einzeln sowie im Zusammenspiel mit der Sensorelektronik zu validieren, wurde eine Messelektronik entwickelt, welche Strom, Spannung und Leistung bei unterschiedlicher Belastung des Energy Harvesters dynamisch messen und aufzeichnen kann. Die Messelektronik kann Messdaten auf 6 Kanälen mit einer Samplerate von 10kHz und einer Auflösung von 8-Bit erfassen und speichern. Mittels Bluetooth lassen sich aktuelle Messresultate erfassen, Lastsprünge und Aufzeichnungen triggern. Die Speisung der Messelektronik ist mit einem Akku realisiert, damit der Harvester bei beliebigen Drehzahlen charakterisiert werden kann. Abbildung 3 zeigt die induzierte Spannung sowie die elektrische Leistung bei einem Laststrom von 600mA bei 1500U/min mit 2 Wicklungen und 4 Magneten.

## Fazit und Ausblick

Mit dem Prüfstand und der Messelektronik konnte die Funktionsweise des Energy Harvesters validiert und dessen Eigenschaften gemäss den Anforderungen optimiert werden. Die ersten Energy Harvester werden nun für einen Feldtest in einer Verpackungsmaschine der Ferrum Packaging AG eingebaut. Mit der aufgebauten Mess- und Prüfinfrastruktur ist das Institut für Automation in der Lage, beliebige, rotative Energy Harvester zu charakterisieren und gezielt zu optimieren.

## Projektteam

Jonas Bussmann, Bachelorstudent EIT, Entwicklung Messelektronik  
 Prof. Dr. Pascal Schleuniger, Dozent, Entwicklung Energy Harvester, pascal.schleuniger@fhnw.ch  
 Michael Böller, Dozent und Projektleiter, michael.boeller@fhnw.ch

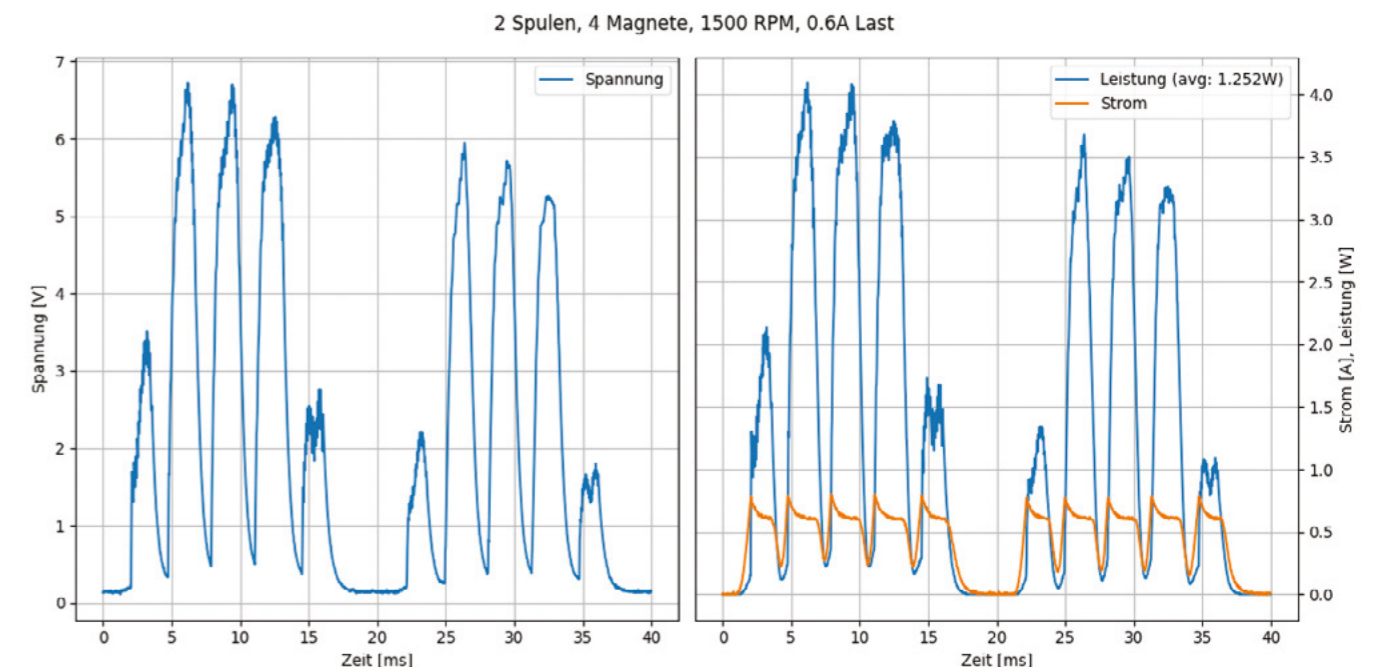


Abbildung 2: Prüfstand für Sensorelektronik und Energy Harvester

# Bachelor-Thesen

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

Themengebiet / Projektidee / Aufgabenstellung	Auftraggeber/Partner	Advisor	Studierende
Projektdatenerfassung und Visualisierung	Novindustria AG	Böller Michael	Wassmer Julian
Produktionsrückverfolgung in der Steuerungstechnik	Polytech Systeme AG	Böller Michael	Hasler Carlo
Vision System für CUBORO Kugelbahn Roboteraufgabe	FHNW/IA	Flucher Gianin Andri	Bischoff Marc
Konzeptionierung eines globalen Data Historian	Auftraggeber vertraulich	Böller Michael	Cartesiani Alessio
Modellbildung und Simulation eines Bandspannungs- und Wickelsystems	Auftraggeber vertraulich	Besselmann Thomas	Friedli Marc
Roboter Positions- und Kraftregelung für Kunststoff-Schweissprozesse	FHNW/IKT	Edelmann Max	Christen Yannick
IoT Kaffee-Roboter	DATA UNIT	Schleuniger Pascal	Schiltges David
Entwicklung und Bau eines Caipirinha-Automaten	FHNW/IPPE	Besselmann Thomas	Erb Fabian
Entwicklung eines hochflexiblen Rollstuhls	Verein Roll on	Binggeli Daniel	Küng Timon
Implementierung Bewässerungs-Toolkit für Obstplantagen («Irriwel»)	Ebenrain-Zentrum	Begert Daniel	Schneider Carmen
Roboter gestützte Automation des Galvanikprozesses	RERO AG, Hauptstrasse 9	Anderegg Roland	Irniger Nik
Aligner 4.0 - Zuführsystem für Laserbearbeitungsmaschine	Nivelmedical AG	Besselmann Thomas	Schmid Manuel
Wire Rope Condition Monitoring	BRUGG Lifting AG	Zihlmann Albert	Bürki Lukas
Digital HVAC-Site Model with BACnet Connectivity	Auftraggeber vertraulich	Zihlmann Albert	Baltensperger Paolo
Echtzeit Prozessüberwachung mit Machine Learning	Auftraggeber vertraulich	Böller Michael	Wittwer Dominik
Systemkonfiguration und Applikationsprogrammierung OMRON MoMa (Mobiler Manipulator)	Staveb Automation AG	Edelmann Max	Lüdi Joel
RETEL meets Industry 4.0: Analyse und Ergänzung des Portfolios mit smarten intelligenten Sensoren und Aktoren	Auftraggeber vertraulich	Anderegg Roland	Schilling Kevin
Eigenverbrauchsoptimierung mit «Revolution Pi»	Smart Energy Engineering GmbH	Zogg David	Bögli Felix
Messkampagne und Optimierung eines Plusenergiehauses mit innovativen Speichersystemen	Miloni Solar AG	Zogg David	Schmid Ramon
Demonstrator Industrie 4.0 Erweiterung mit Transportdrohne (C-5110-S)	Waygate Technologies Robotics	Böller Michael	Roth Joel
Ortungssystem für die Modellzüge des Eisenbahnbetriebslabors	Eisenbahnbetriebslabor Schweiz AG	Anderegg Roland	Wüest Simon
Air Conditioner Commissioning Wizard	Auftraggeber vertraulich	Zihlmann Albert	Eggenschwiler Patrick
Intelligentes Planungs- und Berechnungstool für die Zusammenstellung von Sondermaschinen	Auftraggeber vertraulich	Böller Michael	Hurni Samuel
Energetische Optimierung der Lüftungsanlage einer Produktionshalle	Rero AG	Eichin Heinz	Wick Manuel
Indoor-Navigation des Roboters Temi in der FHNW Bibliothek	FHNW Bibliothek Brugg-Windisch	Besselmann Thomas	Müller Roman
Regelungsoptimierung Ölkreislauf für Turbokompressoren	ABB Schweiz AG, Turbocharging	Keller Jürg P.	Torti Dominique
Optimierung Wertschöpfungsprozess Blechfertigung	Auftraggeber vertraulich	Böller Michael	Schüepp Sebastian
Dezentrales Hardwarekonzept für eine Palettenförderanlage	Swisslog	Anderegg Roland	Heizmann Michel
Antikollisionssystem für elektrische Rollstühle	Curtis Instruments AG	Besselmann Thomas	Arnold Stefan
Powerline-Kommunikation für Flugzeuge und Güterzüge	plc-tec AG	Schleuniger Pascal	Notaro Andrea
Automated Multitarget Test Environment for probe.rs Open Source Project	Technokrat GmbH	Zihlmann Albert	Kühni Thierry

Themengebiet / Projektidee / Aufgabenstellung	Auftraggeber/Partner	Advisor	Studierende
IoT control of digital manufacturing machines	Stephan Steiner & Andreas Kuster a-metal AG	Schleuniger Pascal	Kuster Andreas
Mess- und Auswertelektronik für ein Gasqualitätsmessgerät basierend auf Ultraschall und thermischer Durchflussmessung	Mems AG	Schleuniger Pascal	Schaffner Kevin
Smart pump	Waygate Technologies Robotics	Schleuniger Pascal	Dietemann Daniel
Pallet Finder für FTF (Fahrerlose Transportfahrzeuge)	Stöcklin Logistick AG	Schleuniger Pascal	Heimann Florian
Konzept für ein Predictive Maintenance Tool	Zaugg Maschinenbau AG	Anderegg Roland	Hoffmann Florian

## Studiengang

  Elektro- und Informationstechnik
   Systemtechnik

# Vertiefungsprojekte der Master-Studierenden

Projektthema	Auftraggeber	Advisor	Studierende
Genauigkeitsoptimierung eines Industrieroboters mittels externem Messsystem	Ruag AG	Anderegg Roland	Flucher Gianin
Modellbasierte, digitale Fertigung von hochpräzisen Metallteilen: Modellierung des Fräsprozesses	FAES-PWR ESTECH AG	Gysin Hans	Pedolin Kilian
Adaptive Model Predictive Control für Temperaturregelung	Fr. Sauter AG	Gysin Hans	Pedolin Kilian
Modellierung und Identifikation einer Akro-«fixed-wing»-Drohne	TELLnet AG	Keller Jürg	Jakober Daniel
Vision basierte Saatereinerkennung	Strebel Maschinen AG	Keller Jürg	Kuhn Thomas
Intelligente Werkzeugverschleisserkennung	Fraisa SA	Anderegg Roland	Lerf Marius
Ferrum Verschleissprozessüberwachung	Ferrum AG	Schleuniger Pascal	Schiltges David
Optimierung einer mechatronischen Dosenverschleissanlage	Ferrum AG	Anderegg Roland	Winkler Noah
Energieeffiziente Grossbildschirme	Schaltag AG	Gysin Hans	Ammann Nils
Aligner 4.0: Inbetriebnahme eines Prototyps zur Laserbearbeitung von Zahnschienen	nivellmedical AG	Anderegg Roland	Pyrochta Jan
Eingebettete modellprädiktive Temperaturregelung für komplexe Bauten	Fr. Sauter AG	Zihlmann Albert	Sonderegger Andrej
Entwicklung eines Regelverfahrens zur Kompensation der Haftreibung von Linearmotoren.	NTI AG	Besselmann Thomas	Geissmann Matthias
Intelligente Werkzeugverschleisserkennung	Fraisa SA	Besselmann Thomas	Bruno Antonio

# Publikationsliste

Polysun Webinar 09/2022: Anleitung zu den PolySun-Vorlagen „Wärmepumpen mit Photovoltaik-Optimierung“, D. Zogg

BFE 03/2022: Areal Möriken-Wildegg, Vergleich verschiedener Regelalgorithmen, Gebäude als Speicher, D. Zogg et al.

Wärmepumpen und PV Planungsgrundlagen für Wohnbauten (EFH und MFH) – EnergieSchweiz / BFE, 1.10.2021, D. Zogg

WP-Tagung Burgdorf 2021: Eigenverbrauchsoptimierung von Wärmepumpen im Areal über moderne Schnittstellen

HK-Gebäudetechnik 1-21: Auswertung der innovativen Areal-Überbauung in Möriken-Wildegg

BFE 11/2020: Areal Möriken-Wildegg mit innovativer Strombörse, Schlussbericht Phase I

EnergieSchweiz 08/2020: Wärmepumpen und PV – die clevere Kombination

HK-Gebäudetechnik 11-19: Eigenverbrauchsmanager – Der Strom bekennt Farbe, D. Zogg

# Preise



## SGA Förderpreis

Dominique Torti hat am 09.02.2023 an der OST (Campus Rapperswil) den SGA-Förderpreis für seine exzellente Bachelor-Thesis "Regelungs-optimierung Ölkreislauf" erhalten (Auftraggeber: Firma Accelleron Industries in Baden). Bei seiner innovativen Arbeit auf dem Gebiet der Regelung von totzeitbehafteten Systemen wurde er von Kollegen des Institutes für Automation FHNW vorzüglich unterstützt.

# Ihre Weiterbildung in Automatisierungstechnik

**CAS Industrielle Bildverarbeitung** – die Weiterbildung für Berufsleute, die ihre Kompetenzen vertiefen und aktualisieren möchten.

Die Teilnehmenden profitieren von einem interdisziplinären Team von Dozierenden aus Informatik und Automation.

**Nächster Start: September 2023**

**[fhnw.ch/cas-industrielle-bildverarbeitung](http://fhnw.ch/cas-industrielle-bildverarbeitung)**

## Kontakt

Prof. Dr. Christoph Stamm, Studiengangleiter CAS,  
T +41 56 202 78 32, [christoph.stamm@fhnw.ch](mailto:christoph.stamm@fhnw.ch)

Corinne Schuler, Sekretariat, T +41 56 202 87 81,  
[weiterbildung.technik@fhnw.ch](mailto:weiterbildung.technik@fhnw.ch)

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

Mittwoch, 3. Mai 2023, 18.15 Uhr

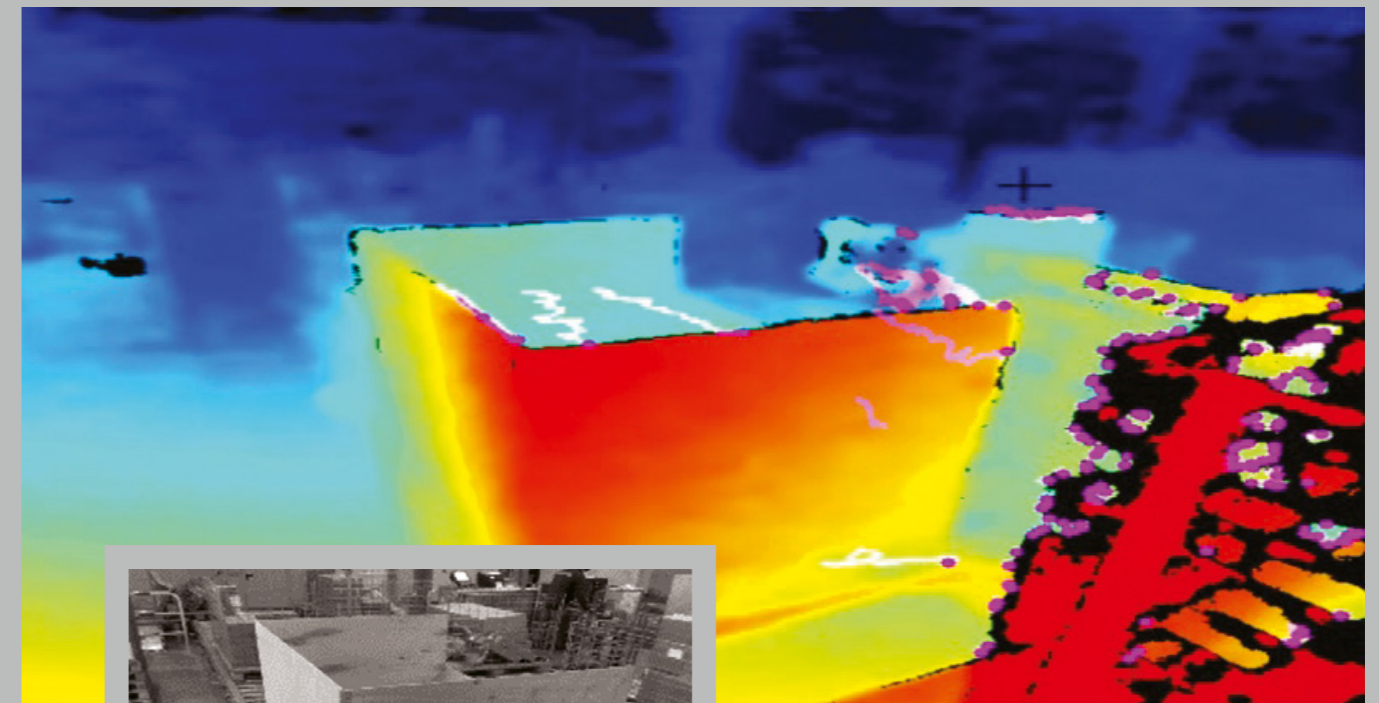
Montag, 26. Juni 2023, 18.15 Uhr

Montag, 30. Oktober 2023, 18.15 Uhr

Mittwoch, 24. Januar 2024, 18.15 Uhr

## Details siehe:

**[www.fhnw.ch/de/weiterbildung/technik/infoabend](http://www.fhnw.ch/de/weiterbildung/technik/infoabend)**





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

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

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

Weiterbildung MAS Automation Management  
Studiengangleiter Prof. Michael Böller  
T +41 56 202 77 92, [michael.boeller@fhnw.ch](mailto:michael.boeller@fhnw.ch)  
[www.fhnw.ch/mas-automation](http://www.fhnw.ch/mas-automation)



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

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