

SGA – ASSPA – SSAC BULLETIN

Nr. 82 – «Positionsregelung nachgebender Roboterarme»

Editorial

Sehr verehrte Leserin, sehr verehrter Leser

im vorliegenden Bulletin finden Sie den Beitrag des Preisträgers Lukas Spannagl für die beste Bachelorarbeit. Die Positionsregelung von sogenannten weichen, nachgebenden Roboterarmen stellt eine spezielle Herausforderung dar, die von Herrn Spannagl gut gemeistert wurde.

Neben diesem Beitrag möchte ich als erstes den Bericht von sensors.ch über den Besuch bei der Firma Belimo in Hinwil erwähnen. Er gibt einen guten Überblick der weltweiten Tätigkeit der Firma im Aktuator und Sensorbereich.

Als letztes möchte ich aber speziell auf den Beitrag «Neues zum Messen – Revision des Internationalen Einheitensystems» hinweisen. Am 20. Mai 2019, dem Weltmetrologietag des Jahres 2019, wird das neue SI in Kraft treten. Dabei wurden die Masseinheiten neu nur über Naturkonstanten abgeleitet. Dies wurde durch aufwendige Experimente an metrologischen Instituten weltweit erreicht. Für den Normalverbraucher wird sich durch das neue SI nichts ändern. Für den Schulbetrieb wird es dagegen Anpassungen geben müssen. Das neue SI wird deutlich abstrakter und intellektuell anspruchsvoller als das bisherige System – eine Herausforderung für Lehrer und Schüler.

Ich wünsche Ihnen somit eine unterhaltsame Lektüre und einen angenehmen Frühling.

Mit freundlichen Grüßen
 Peter Gruber



Kontakt

Dr. Peter Gruber
 Grenzacherweg 116
 4125 Riehen
pgconsult@gmx.ch

HSLU Technik & Architektur

Technikumstr. 21
 6048 Horw
 E-Mail: peter.gruber@hslu.ch

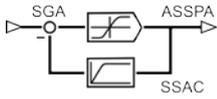
Ankündigung SGA Generalversammlung 4. Juni 2019

Bitte beachten Sie Seite 15 – hier finden Sie Details zur diesjährigen [Generalversammlung](#). Eine persönliche Einladung zur GV erhalten Sie mit der Jahresrechnung Mitgliederbeitrag 2019 Anfang Mai.

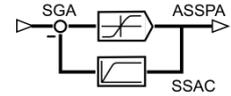


Inhalt

Editorial	1
Rückblick SGA Meeting und SGA Förderpreisverleihung	2
Norm Optimal Iterative Learning Control for Aggressive Position Tracking with a Soft Robotic Arm	4
Neues zum «MESSEN» - Revision des Internationalen Einheitensystems	10
SENSOR+TEST Die Messtechnik Messe in Nürnberg	14
SGA Generalversammlung	15
Termine – Links IFAC	16
sensors.ch – Besuch Belimo Hinwil	17
Kommende Veranstaltungen	20



Rückblick SGA Meeting und SGA Förderpreisverleihung



SGA Meeting mit 2 Preisträgern von der ETH

Das diesjährige SGA Meeting stand in diesem Jahr ganz im Zeichen der ETH. Es fand am *Institut für Automatik* von Prof. Dr. John Lygeros statt und beide Preisträger für die beste Bachelor- und die beste Masterarbeit stammten von ETH Absolventen.

Professor Lygeros stellte in einer kurzen Übersicht das sehr international besetzte Team des Instituts vor sowie einige beispielhafte Projekte. Seitens der Forschung gibt es Projekte in den verschiedensten Bereichen, auch hier ist das Thema «Energie» und «Energieeffizienz» ein grosses Thema.

Seitens der Lehre ist das Institut intensiv in der Grundausbildung im Bachelor eingebunden und bietet zahlreiche weiterführende Kurse auf Masterstufe an.



Autor und © Bilder
Prof. Dr. Ruprecht Altenburger
 ZHAW School of Engineering
 Technikumstrasse 9
 8400 Winterthur



Als Preisträger im Bereich «Bachelor» konnte Herr Lukas Spannagl seine prämierte Arbeit «*Norm Optimal Iterative Learning Control for Aggressive Position Tracking with a Soft Robotic Arm*» präsentieren. Ein ILC Verfahren hat er erfolgreich an einem weichen, pressluftgetriebenen Aktuator angewendet und für die spezifischen Belange angepasst. Innerhalb weniger Iterationen wird eine sehr gute Sollwertfolge erreicht.



Im Bereich von «Quadrocoptern» war die zweite prämierte Arbeit angesiedelt. Mit seiner Masterarbeit mit dem Titel «*State Estimate Recovery for Autonomous Quadcopters*» konnte Herr Luciano Beffa die Jury überzeugen. Ohne Vorinformation über die Orientierung des Quadrocopters ist es mit geeigneten Schätzern möglich, die Orientierung des Fluggerätes im Raum mit genügender Genauigkeit zu bestimmen. Z.B. nach einem Absturz, kann das System dann ggf. wieder stabilisiert werden.

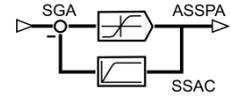
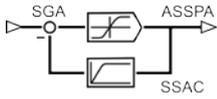


Die Schätzung basiert einerseits auf den Messdaten der IMU auf dem Copter sowie einem heuristisch gewonnenen Systemmodell, in welchem die «Freiflugeigenschaften» des Fluggerätes enthalten sind. Dieses wurde experimentell mit einem externen Messsystem gewonnen.

Der SGA Präsident Jürg Keller konnte den beiden Preisträgern jeweils einen Siegercheck von CHF1000,- überreichen.

Ein Fachvortrag von Frau Dr. Annika Eichler aus dem Institut rundete den Vortragsteil ab. Sie berichtete in «*Humans in the loop: How to consider thermal comfort by the building energy management system*», wie Komfortbedürfnisse der Menschen bei der Büroarbeit in das Energiemanagementsystem des Gebäudes eingebracht werden kann. Die Nutzer als Teil der Regelschleife. Übergeordnetes Ziel dabei ist einerseits Energieeinsparung, vor allem aber die Produktivität der Angestellten hoch zu halten.





Danach wurden 3 Projekte im Labor vorgestellt, die vor allem im Bereich der Ausbildung auf Bachelor- und Masterstufe angesiedelt sind. Das Studententeam «NomadZ» nimmt mit ihren humanoiden Robotern an Fussballwettbewerben teil. Die Demonstration zeigte eindrücklich, wie anspruchsvoll es auch in diesem klar definierten Umfeld/Spielfeld ist, technische Systeme sinnvoll agieren zu lassen. Auch beruhigend zu sehen, dass Ronaldo & Co. in absehbarer Zeit noch keine Konkurrenz von dieser Seite befürchten müssen.

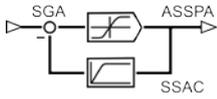


Zwei weitere Projekte zeigten den Einsatz von Minidrohnen im Praktikumsunterricht für Bachelorstudenten sowie einen automatisierten Snooker Roboter, der sich jedoch noch im frühen Aufbaustadium befindet.



Beim anschliessenden Apéro war Gelegenheit, sich auszutauschen und bei den Preisträgern noch die eine oder andere Frage zu stellen.





Norm Optimal Iterative Learning Control for Aggressive Position Tracking with a Soft Robotic Arm



Prämierte Bachelorarbeit 2018 – Einführung

Diese Arbeit wurde am Institut für Dynamische Systeme und Regelungstechnik (IDSC) der ETH Zürich erstellt. Im Rahmen eines Projektes am IDSC werden zurzeit Roboterarme untersucht, welche durch weiche, pneumatische Strukturen aktuiert werden. Solche Aktuatoren werden unter anderem eingesetzt, da sie dem Roboterarm Nachgiebigkeit verleihen, was ihn bei Interaktionen mit Menschen sicher macht.

Bei Roboterarmen mit weichen Aktuatoren ist die genaue Positionsregelung aufgrund der Nachgiebigkeit solcher Systeme und ihrer nichtlinearen Dynamik eine Herausforderung. Um die Regelgüte zu verbessern, wurde ein iterativ lernender Regelansatz (Iterative Learning Control – ILC) eingesetzt. ILC ist für diese Art von System gut geeignet, da Roboterarme häufig repetitive Aufgaben ausführen und der lernende Regler die in früheren Wiederholungen gesammelten Informationen verwenden kann, um das zukünftige Tracking zu verbessern. Darüber hinaus können die Nichtlinearitäten des Systems, beispielsweise aufgrund des viskoelastischen Verhaltens der verwendeten weichen Materialien, als sich wiederholende Störungen beschrieben werden, die von der ILC-Kompensation gelernt werden können.

Vor Beginn der Arbeit war bereits eine erste Version der Hardware des behandelten Roboterarms vorhanden. Eine zweite Version wurde gerade entwickelt und im Zuge dieser Arbeit gebaut und getestet. Zur Analyse der Regelgüte von Iterative Learning Control wurden sowohl die ursprüngliche als auch die überarbeitete zweite Version der Hardware verwendet (siehe Abb.1).



Autor
 Lukas Spannagl
 ETH Zürich
 Institute for Dynamic
 Systems and Control
spalukas@ethz.ch

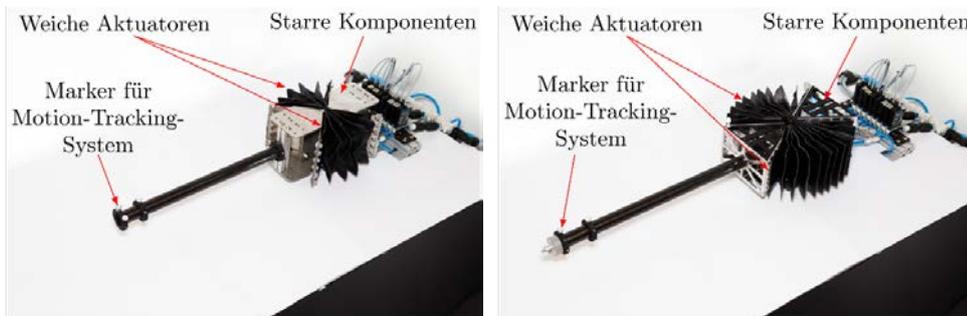
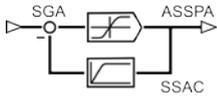


Abbildung 1: Gegenüberstellung von Version 1 (links) und 2 (rechts) des Roboterarms

Die wichtigsten Verbesserungen des neu konzipierten Arms sind ein grösserer Bewegungsbereich, geringere Trägheit und niedrigere Betätigungsdrücke. Während des Übergangs zum neuen Arm wurde die für die erste Version des Arms verwendete MATLAB/Simulink-Softwareumgebung durch eine Open-Source-C++-Umgebung ersetzt. Die Hauptaufgaben der Bachelorarbeit bestanden darin, einen Python-Simulator zu erstellen, die neue Softwareumgebung in C++ zu erstellen und die Regelgüte mittels ILC auf beiden Versionen des Roboterarms zu verbessern. Die Regelalgorithmen wurden vorab auf dem Simulator getestet, der auf physikalischen und identifizierten Modellen des Systems aufgebaut ist. Die weiterentwickelte Version des Arms erlaubt es aufgrund der reduzierten Trägheit aggressiveren Trajektorien genauer zu folgen.

In diesem Artikel möchte ich zunächst die nötigen Hardware- und Modellierungsaspekte beschreiben und anschliessend auf die Regelung inklusive ILC eingehen.



Hardware

Beide Versionen des Roboterarms bestehen aus zwei aufblasbaren weichen Aktuatoren und einer starren Verbindung (siehe Abb. 2). Die zwei antagonistisch angeordneten Balgstrukturen bestehen aus einer einzigen Schicht hochfrequenzverschweisstem Gewebe (polyurethanbeschichtetes Nylon) (siehe [1]).

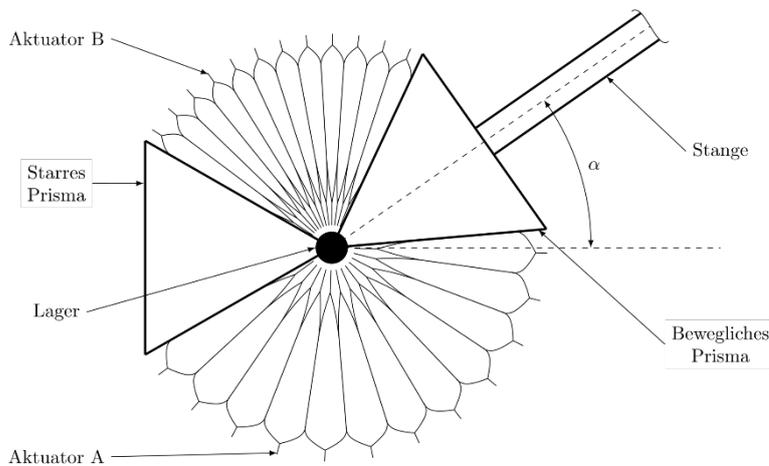


Abbildung 2: Aufbau des hybriden Roboterarms mit weichen Aktuatoren und starren Aufnahmen. Durch die Regelung des Druckes in den beiden weichen Aktuatoren kann dessen Ausdehnung und damit der Freiheitsgrad des Roboterarms geregelt werden.

Der Druck in jedem Aktuator wird separat geregelt und die resultierende Druckdifferenz erzeugt ein Drehmoment um die Mittelachse der Verbindung. Mit diesem Drehmoment wird die Drehbewegung des Arms gesteuert. Da ein Aktuator immer auf Umgebungsdruck gehalten wird, wird die Nachgiebigkeit des Arms maximiert.

Modell

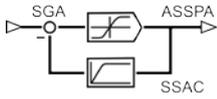
Das Modell dient dazu die prinzipielle Dynamik zu erfassen. Ungenauigkeiten und Modellunsicherheiten werden durch den ILC-Ansatz kompensiert. Das Modell des Roboterarms kann in zwei Subsysteme zerlegt werden. Zunächst wird das pneumatische System mit den weichen Aktuatoren und den Ventilen beschrieben, und die Dynamik des starren Körpers des Roboterarms wird in einem zweiten Teil erläutert.

Um die Druckdynamik eines Aktuators zu beschreiben, wird das ideale Gasgesetz abgeleitet. Dabei werden isotherme Bedingungen angenommen und Änderungen des Volumens vernachlässigt. Damit ergibt sich der folgende Ausdruck:

$$\dot{p} = \dot{m} \frac{RT}{V} + \dot{T} \frac{mR}{V} - \dot{V} \frac{p}{V} \approx \dot{m} \frac{RT}{V}, \quad (1)$$

wobei R die ideale Gaskonstante ist, m die Luftmasse im Aktuator, \dot{m} der Massenstrom in oder aus dem Aktuator, T , \dot{T} die Temperatur und ihre Ableitung und V , \dot{V} das Volumen und dessen Ableitung. Unter der isochoren Annahme wird das Volumen des Aktuators als konstant angenähert und ist somit unabhängig vom Winkel des Roboterarms. Das vorgestellte Modell vernachlässigt die Wechselwirkungen mit dem antagonistischen Aktuator, wobei die Näherung durch den ILC-Ansatz kompensiert wird.

Ein statisches Modell der verwendeten Ventile, das auch in dieser Arbeit eingesetzt wurde, wird in [1] präsentiert. Diese Ventile sind diskret schaltend und werden mit einem PWM-Signal angesteuert, um den gewünschten Massenstrom einstellen zu können. Das experimentell ermittelte Modell bezieht den Massenstrom eines Aktuators auf den Druck vor und nach dem Ventil und dessen PWM-Tastverhältnisse.



$$\dot{m} = f_{ventile}(p_u, p_d, dc_{in}, dc_{out}) \quad (2)$$

wobei p_u und p_d Druck stromauf- und stromabwärts und dc_{in} , dc_{out} die PWM-Tastverhältnisse der Einlass- und Auslassventile sind. Bei den Einlassventilen entspricht p_u dem Druck der Druckluftquelle und p_d dem geregelten Druck im Aktuator. Bei den Auslassventilen bezieht sich p_u auf den Druck im Aktuator und p_d auf den Umgebungsdruck. Es wird angenommen, dass die Starrkörperdynamik des Roboterarms durch die Druckdifferenz zwischen den beiden Aktuatoren (definiert als $\Delta p = p_A - p_B$) angetrieben wird. Eine positive Druckdifferenz Δp beschleunigt den Arm in die positive α -Richtung (siehe Abb. 2). Die Dynamik des Roboterarms mit Δp als Eingang und dem Armwinkel α als Ausgang wird anhand einer Systemidentifikation identifiziert. Für die Dynamik des Roboterarms wird ein Modell zweiter Ordnung angenommen. Die resultierende Übertragungsfunktion ist

$$P(s) = \frac{\alpha(s)}{\Delta p(s)} = k \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 + 2 \cdot \delta \cdot \omega_0 \cdot s + s^2}$$

Regelung

Zunächst wird der Feedback-Regler beschrieben, auf welchem der ILC im zweiten Abschnitt aufbaut.

Feedback-Regler

Die Struktur des Reglers ist so ausgelegt, dass er die unterschiedlichen Zeitskalen des Systems nutzt. Die schnellere Druckdynamik wird in einem inneren Regelkreis mit 200 Hz und die langsamere Armdynamik in einem äusseren Regelkreis mit 50Hz geregelt. Die resultierende Kaskadenregelung ist in Abb. 3 gezeigt.

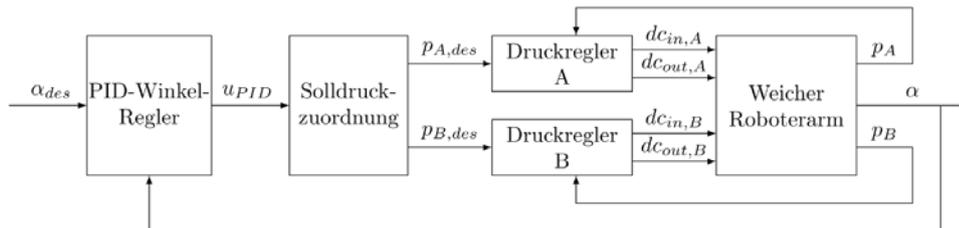


Abbildung 3: Kaskadenregler ohne ILC. Der äussere Regelkreis besteht aus einem PID-Regler mit Vorsteuerung, welcher einen gewünschten Armwinkel als Eingang hat und eine gewünschte Druckdifferenz ausgibt. Diese Druckdifferenz wird dann in zwei Solldrücke übersetzt (siehe unten). Der innere Regelkreis besteht aus einem Proportionalregler pro Aktuator mit dem Solldruck als Eingang und den Ein- und Auslass-PWM-Tastverhältnissen als Ausgang.

Winkel-Regler

Ein Proportional-Integral-Differential-Regler (PID-Regler) mit Vorsteuerung wird im äusseren Regelkreis verwendet. Dieser berechnet eine erforderliche Druckdifferenz u_{PID} , um einen gewünschten Armwinkel zu erreichen und hat die folgende Form:

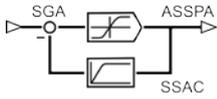
$$u_{PID} = k_{ff} \alpha_{des} + k_p (\alpha_{des} - \alpha) + k_i \int (\alpha_{des} - \alpha) dt + k_d \dot{\alpha}$$

Der gewünschte Winkel wird mit α_{des} und der gemessene Winkel mit α bezeichnet. Der Sollwert für die Druckdifferenz wird dann in die einzelnen Drucksollwerte für die inneren Regelkreise übersetzt. Die zugrundeliegende Annahme ist, dass Sollwertänderungen des Drucks vom inneren Regelkreis instantan umgesetzt werden können. Aus u_{PID} werden die Solldrücke berechnet als

$$p_{A,des} = \max(p_0, p_0 + u_{PID})$$

$$p_{B,des} = \max(p_0, p_0 - u_{PID})$$

wobei p_0 der Umgebungsdruck ist.



Druckregler

In der inneren Schleife wird ein Proportional-Regler (P-Regler) verwendet, der auf dem Modell der Druckdynamik des Aktuators basiert (1). Es wurde ein Modell erster Ordnung für die Druckdynamik angenommen:

$$\dot{p}_i = \frac{1}{\tau_p} (p_{i,des} - p_i)$$

Dabei ist τ_p die Zeitkonstante der gewünschten Druckdynamik, welche als Einstellungsparameter für die Steuerung verwendet wird. Der Index i wird entweder mit A oder B ersetzt – je nachdem, um welchen Aktuator es sich handelt. Es wird dieser Ausdruck mit (1) kombiniert, um den gewünschten Massenstrom $\dot{m}_{i,des}$ als Funktion der aktuellen Druckabweichung zu erhalten.

$$\dot{m}_{i,des} = \frac{V}{RT\tau_p} (p_{i,des} - p_i)$$

Das Ventilmodell (2) wird verwendet, um die erforderlichen PWM-Tastverhältnisse dc_{in}, dc_{out} für die Einlass- und Auslassventile aus dem gewünschten Massenstrom und den bekannten Drücken stromauf- und -abwärts vom Ventil zu berechnen.

ILC

Ein normoptimaler, iterativer Lernansatz wurde in Kombination mit dem oben beschriebenen Feedback-Regler verwendet, um die Regelgenauigkeit zu verbessern, wenn dieselbe Trajektorie mehrmals getrackt wird. Dabei wird mit dem ILC das Verhalten des Systems gelernt, und der Feedback-Regler kompensiert sich nicht wiederholende Störungen. Der ILC verwendet die während der letzten Iteration gesammelten Informationen (Fehler), um die nächste zu verbessern. Nicht-lernende Regler hätten den gleichen Tracking-Fehler bei jeder Iteration, und die Informationen aus vorherigen Iterationen würden nicht genutzt werden. Da die gesamte letzte Iteration der Vergangenheit bekannt ist, können Störungen in der aktuellen Iteration nicht-kausal basierend auf der Annahme, dass sich Störungen wiederholen, antizipiert werden. Dadurch kann auch die Verzögerung zwischen der Solltrajektorie und der realen Trajektorie deutlich reduziert werden. Dies gilt unter der Annahme, dass sich die Störung über verschiedene Iterationen wiederholt. Ansonsten würde der lernende Regler versuchen, Störungen zu kompensieren, die bei der nächsten Iteration nicht vorhanden sind. Dies wirkt sich negativ auf die Regelgüte aus. In dieser Arbeit wurde der ILC für das linearisierte System entworfen und dann auf die nichtlineare Version angewandt. Dies war möglich, da die Nichtlinearitäten als sich wiederholende Störungen des Systems behandelt wurden.

Verschiedene ILC-Ansätze wurden untersucht. Dazu gehören ILC des PD-Typs, Modellinversion-ILC und Norm Optimal ILC (NOILC) mit unterschiedlichen Kostenfunktionen. In einem ersten Schritt wurden drei standardisierte iterative Lernansätze in Simulation verglichen. Der PD-ILC erwies sich als schwierig einzustellen und benötigte viele Iterationen, um zu konvergieren, sobald ein stabiler Parametersatz gefunden wurde. Im Gegensatz dazu konvergiert der Modellinversion-ILC in einer einzigen Iteration, wenn das Modell perfekt ist. Modellunsicherheiten sind jedoch Teil der Motivation für die Verwendung von ILC,

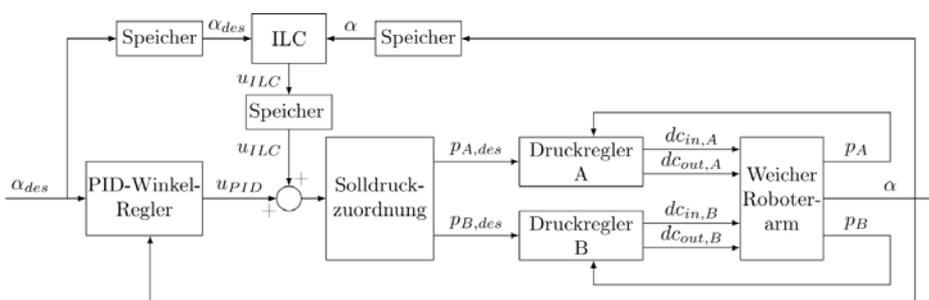
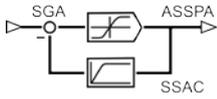


Abbildung 4: Reglerstruktur mit ILC. Der ILC wird parallel zum oben beschriebenen Kaskadenregler eingesetzt. Das Korrektursignal des ILC und die gewünschte Druckdifferenz des PID-Winkel-Reglers werden addiert, bevor die Summe in die Solldrücke der einzelnen Aktuatoren umgerechnet wird.



und es kann nicht garantiert werden, dass das Modell genau genug ist, um eine Konvergenz mit dem realen System zu erreichen. Aus diesen Gründen und wegen der schnellen und robusten Konvergenz-Eigenschaften von NOILC wurde der Fokus auf diesen Typ von ILC gelegt. NOILC verwendet das lineare Modell des Systems und berechnet sein Korrektursignal, indem er eine quadratische Kostenfunktion minimiert. Der implementierte NOILC-Ansatz erforderte ursprünglich einen Q-Filter (siehe [1]), mit dem man die notwendige Konvergenz zu Lasten der Regelgüte erreichen kann. Dieser konnte durch Erweiterung der Kostenfunktion um einen Term, der die Ableitung des ILC-Korrektursignals bestraft, entfernt werden. Folgende Kostenfunktion wurde gewählt:

$$J_{j+1}(u_{j+1}) = e_{j+1}^T \cdot M \cdot e_{j+1} + (u_{j+1} - u_j)^T \cdot S \cdot (u_{j+1} - u_j) + (V \cdot u_{j+1} - u_{j+1})^T \cdot W \cdot (V \cdot u_{j+1} - u_{j+1})$$

wobei u_j und e_j das Korrektursignal bzw. der Fehler der j -ten Iteration sind. Der erste Term bestraft den vorhergesagten Tracking-Fehler der nächsten Iteration. Der zweite Term bestraft eine Änderung des Korrektursignals zwischen aufeinanderfolgenden Iterationen und der letzte Term die Ableitung des Korrektursignals. Die beiden letzten Terme sind enthalten, um ein stabiles Lernverhalten zu gewährleisten, indem eine Überkompensation der Störung vermieden wird. Das Einbeziehen von Kosten für die absolute Änderung der Korrekturereingabe stellt sicher, dass der NOILC-Ansatz den vorherigen Tracking-Fehler nicht überkompensiert, bevor das berechnete Korrektursignal Wirkung zeigen kann. Durch die Bestrafung der Ableitung der Korrekturereingabe wird der Hochfrequenzinhalt des Korrektursignals begrenzt, der bei herkömmlichen ILC-Ansätzen durch den sogenannten Q-Filter begrenzt wird (siehe [2]). M , S und W sind Gewichtungsmatrizen der drei Teile der Kostenfunktion und V verschiebt den Vektor um einen Zeitschritt:

$$V = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & 0 & 1 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N \times N}$$

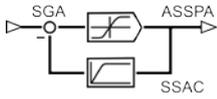
Hier beschreibt N die Anzahl an Zeitschritten innerhalb einer Iteration. Um e_{j+1} als Funktion der Vektoren der j -ten Iteration auszudrücken, wird folgende Systemmatrix verwendet:

$$P = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & CB & 0 \\ CA^{N-1}B & \dots & CAB & CB \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N \times N}$$

Mit dieser Definition kann e_{j+1} mit $e_{j+1} = e_j - P(u_{j+1} - u_j)$ approximiert werden. Die quadratische Kostenfunktion kann nun analytisch minimiert werden, um das Korrektursignal der nächsten Iteration zu berechnen. Man erhält:

$$u_{j+1}^* = \underset{u_{j+1}}{\operatorname{argmin}} J(u_{j+1}) = (P^T \cdot M \cdot P + S + (V - \mathbb{I})^T \cdot W \cdot (V - \mathbb{I}))^{-1} \cdot [(P^T \cdot M \cdot P + S) \cdot u_j + P^T \cdot M \cdot e_j]$$

Dieses Korrektursignal wird dann zum Ausgangssignal des PID-Winkel-Reglers addiert (Abb. 4), um ein besseres Tracking zu erhalten.



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zurich

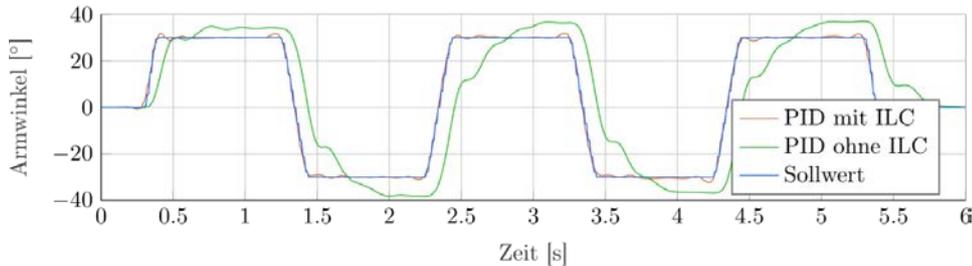


Abbildung 5: Regelgüte mit ILC nach 20 Iterationen und ohne ILC. Die Grafik zeigt, dass der ILC die Verzögerung zwischen Sollwert und gemessenem Winkel drastisch reduziert.

Resultate

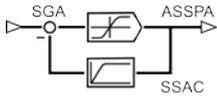
Im Rahmen dieser Arbeit konnte experimentell gezeigt werden, dass die Regelgüte dieser Klasse von Roboterarmen mittels Iterative Learning Control für aggressive Manöver deutlich verbessert werden kann (siehe Abb. 5). Weitere wichtige Resultate bestehen in der Inbetriebnahme eines optimierten Prototyps, der Erweiterung der Kostenfunktion des ILC-Algorithmus mit einem Ableitungsterm, welcher das Verzichten auf einen Q-Filter erlaubt. Zudem wurde eine Softwareumgebung mit grafischer Benutzeroberfläche in C++ implementiert. Detailliertere Informationen inklusive eines theoretischen Beweises zur monotonen Konvergenz des Tracking-Fehlers können [1] und [3] entnommen werden.

Danksagung

Mein spezieller Dank geht an Professor Raffaello D'Andrea und meinem Betreuer Matthias Hofer vom Institut für Dynamische Systeme und Regelungstechnik (IDSC) der ETH Zürich für ihre hervorragende Betreuung bei meiner Bachelorarbeit.

Referenzen

- [1] M. Hofer and R. D'Andrea, «Design, modeling and control of a soft robotic arm», in Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018.
- [2] D. A. Bristow, M. Tharayil, and A. G. Alleyne, «A survey of iterative learning control», IEEE Control Systems, vol. 26, no. 3, pp. 96–114, 2006.
- [3] M. Hofer, L. Spannagl and R. D'Andrea, «Iterative Learning Control for Fast and Accurate Position Tracking with a Soft Robotic Arm», submitted to International Conference on Intelligent robots and Systems (IROS) 2019.
 Preprint available: <https://arxiv.org/pdf/1901.10187.pdf>



Neues zum «MESSEN» Revision des Internationalen Einheitensystems



Auf der Webseite der Physikalisch Technischen Bundesanstalt ist zu lesen, dass die Staaten der Meterkonvention auf ihrer 26. Generalkonferenz für Masse und Gewichte (CGPM) im November 2018 in Versailles eine grundlegende Revision des Internationalen Einheitensystems (SI) beschlossen haben. In Zukunft werden sich alle SI-Einheiten auf die festgelegten Werte von sieben ausgewählten Naturkonstanten beziehen. Die Generalkonferenz folgt damit einer Empfehlung des Internationalen Komitees für Masse und Gewichte (Comité international des Poids et Mesures, CIPM), des höchsten Expertengremiums in der Welt der Metrologie. Die Neudefinitionen werden am 20. Mai 2019, dem Weltmetrologietag, in Kraft treten.

© Quelle Webseite PTB
 PTB
 Physikalisch-Technische
 Bundesanstalt
 38116 Braunschweig
www.ptb.de

Im neuen Internationalen Einheitensystem (SI) werden sieben Naturkonstanten als definierende Bezugsgrößen festgelegt. Die sieben Basiseinheiten – in der Grafik im äußeren Kreis angeordnet – verlieren ihre herausgehobene Stellung.

Die Idee, eine Masseinheit auf der Basis von Naturkonstanten zu definieren, ist prinzipiell nicht neu. Was bei der Definition der Sekunde mittels Atomuhren vor 50 Jahren und bei der Definition des Meters mithilfe der Lichtgeschwindigkeit vor über 30 Jahren begonnen wurde, wird nun für alle Einheiten im Internationalen Einheitensystem fortgesetzt. Vier weitere Konstanten spielen dabei die Hauptrollen: das Planck'sche Wirkungsquantum h , die Avogadrokonstante N_A , die Boltzmannkonstante k und die Ladung des Elektrons e .

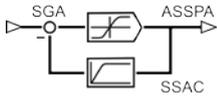


© Grafik: BIPM

In den grossen nationalen Metrologieinstituten fanden in den letzten Jahren aufwendige Experimente statt, um eben diese Konstanten so genau wie möglich zu messen. Und die zuvor gesetzten Zielmarken, u. a. bei den Messunsicherheiten und der Unabhängigkeit der Experimente voneinander, wurden erreicht. Die Werte der betreffenden Naturkonstanten konnten somit sehr genau festgelegt werden.

Das derart grundsätzlich überarbeitete Einheitensystem beseitigt die definitorischen Mängel des bisherigen Systems. Besonders prägnant: Das Urkilogramm und seine Kopien unterscheiden sich in ihrer Masse zum Teil um ein halbes Mikrogramm pro Jahr. Darüber hinaus hat das neue System einen entscheidenden Vorteil: Naturkonstanten gelten prinzipiell an jedem Ort des Universums und zu jeder Zeit. Mit ihnen wird das SI universell. Naturkonstanten bevorzugen, anders z. B. als das Urkilogramm oder der Tripelpunkt von Wasser, keine speziellen Punkte auf der jeweiligen Einheitenskala. Das SI ist damit offen für alle technologischen Innovationen, um die Einheiten zu realisieren.

Mehr dazu finden Sie auf der nächsten Seite



Sieben Naturkonstanten, sogenannte «definierende Konstanten»



Sieben Naturkonstanten, sogenannte «definierende Konstanten», erhalten im neuen SI festgelegte Werte; die Zahlenwerte entstammen den Ausgleichsrechnungen von CODATA im Sommer 2017 (CODATA 2017 special adjustment).

Die hier wiedergegebenen Definitionen der Einheiten sind sinngemässe Übersetzungen des englischen (verbindlichen) Originals. Dieses ist die 9. Auflage der SI-Broschüre des Internationalen Büros für Masse und Gewichte (BIPM).

Quelle: www.bipm.org/en/publications/si-brochure.

© und Quelle: Fotos, Grafiken, Übersetzung: PTB
 Redaktion: Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB
 Physikalisch-Technische Bundesanstalt
 Bundesallee 100
 38116 Braunschweig
www.ptb.de
presse@ptb.de

Die Definitionen treten am 20. Mai 2019, dem Weltmetrologietag dieses Jahres, in Kraft.

- Frequenz des Hyperfeinstrukturübergangs des Grundzustands im ^{133}Cs -Atom
 $\Delta\nu = 9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$
- Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
 $c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$
- Planck-Konstante
 $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}\text{ J s (J s = kg m}^2\text{ s}^{-1}\text{)}$
- Elementarladung
 $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}\text{ C (C = A s)}$
- Boltzmann-Konstante
 $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}\text{ J K}^{-1}\text{ (J K}^{-1} = \text{kg m}^2\text{ s}^{-2}\text{ K}^{-1}\text{)}$
- Avogadro-Konstante
 $N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}\text{ mol}^{-1}$
- Das Photometrische Strahlungsäquivalent K_{cd}
 einer monochromatischen Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}\text{ Hz}$ ist genau gleich 683 Lumen durch Watt.

Neue Definitionen im Internationalen Einheitssystem (SI)

Sekunde

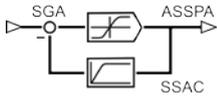
Die Sekunde (Symbol s) ist die SI-Einheit der Zeit. Sie wird definiert durch die Konstante der Cäsiumfrequenz $\Delta\nu$, der Frequenz des ungestörten Hyperfeinübergangs des Grundzustands des Cäsium-Isotops ^{133}Cs . Der Zahlenwert dieser Konstante ist auf 9 192 631 770 festgelegt, wenn sie in der Einheit Hz bzw. s^{-1} angegeben wird.

Diese Definition legt $\Delta\nu$ fest zu $9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$. Löst man diese Beziehung nach der Einheit s auf, so ergibt sich:

$$1\text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu} \quad \text{oder} \quad 1\text{ Hz} = \frac{\Delta\nu}{9\,192\,631\,770}$$

Das heisst, eine Sekunde ist gleich der Dauer von 9 192 631 770 Schwingungen der Strahlung, die der Energie des Übergangs zwischen den zwei Hyperfeinstrukturniveaus des ungestörten Grundzustands im ^{133}Cs -Atom entspricht.





Meter

Der Meter (Symbol m) ist die SI-Einheit der Länge. Er wird definiert durch die Konstante der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c . Der Zahlenwert dieser Konstante ist auf 299 792 458 festgelegt, wenn sie in der Einheit m s^{-1} angegeben wird und die Sekunde durch $\Delta\nu$ definiert ist.

Diese Definition gibt c den Wert $299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$. Löst man diese Beziehung nach der Einheit m auf, so ergibt sich:

$$1\text{ m} = \left(\frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu} \approx 30\,663\,319 \frac{c}{\Delta\nu}$$

Das heisst, ein Meter ist gleich der Strecke, die Licht im Vakuum innerhalb des Bruchteils von $1/299\,792\,458$ einer Sekunde zurücklegt.



Kilogramm

Das Kilogramm (Symbol kg) ist die SI-Einheit der Masse. Es wird definiert durch die Konstante des Planck'schen Wirkungsquantums h . Der Zahlenwert dieser Konstante ist auf $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ festgelegt, wenn sie in der Einheit J s bzw. $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ angegeben wird und die Sekunde und der Meter durch $\Delta\nu$ und c definiert sind.

Diese Definition gibt h den Wert $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$. Löst man diese Beziehung nach der Einheit kg auf, so ergibt sich:

$$1\text{ kg} = \left(\frac{h}{6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}} \right) \text{m}^{-2} \text{s} \\ = \frac{(299\,792\,458)^2}{(6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}) (9\,192\,631\,770)} \frac{h \Delta\nu}{c^2} \approx 1,475\,5214 \cdot 10^{40} \frac{h \Delta\nu}{c^2}$$

Das heisst, die Einheit kg wird mit der Wirkung (Einheit: $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$) verknüpft, einer physikalischen Grösse in der theoretischen Physik. Zusammen mit der Definition für die Sekunde und den Meter ergibt sich die Definition für das Kilogramm als Funktion des Planck'schen Wirkungsquantums h .



Ampere

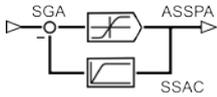
Das Ampere (Symbol A) ist die SI-Einheit der Stromstärke. Es wird definiert durch die Konstante der Elementarladung e . Der Zahlenwert dieser Konstante ist auf $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ festgelegt, wenn sie in der Einheit C bzw. A s angegeben wird und die Sekunde durch $\Delta\nu$ definiert ist.

Diese Definition gibt e den Wert $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ A s}$. Löst man diese Beziehung nach der Einheit A auf, so ergibt sich:

$$1\text{ A} = \left(\frac{e}{1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}} \right) \text{s}^{-1} \\ = \frac{1}{(9\,192\,631\,770)(1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19})} e \Delta\nu \approx 6,789\,687 \cdot 10^8 e \Delta\nu$$

Das heisst, ein Ampere entspricht dem Stromfluss von $1 / (1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19})$ Elementarladungen (Elektronen) pro Sekunde.





Kelvin

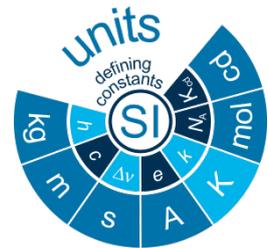
Das Kelvin (Symbol K) ist die SI-Einheit der thermodynamischen Temperatur. Es wird definiert durch die Boltzmann-Konstante k . Der Zahlenwert dieser Konstante ist auf $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ festgelegt, wenn sie in der Einheit J K^{-1} bzw. $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ angegeben wird und das Kilogramm, der Meter und die Sekunde durch h , c und $\Delta\nu$ definiert sind.

Diese Definition gibt k den Wert $1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$. Löst man diese Beziehung nach der Einheit K auf, so ergibt sich:

$$1 \text{ K} = \left(\frac{1,380\,649}{k} \right) \cdot 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{s}^{-2}$$

$$= \frac{1,380\,649 \cdot 10^{-23}}{(6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{\Delta\nu h}{k} \approx 2,266\,6653 \frac{\Delta\nu h}{k}$$

Das heisst, ein Kelvin entspricht einer Änderung der thermodynamischen Temperatur, die mit einer Änderung der thermischen Energie (kT) um $1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J}$ einhergeht.



Mol

Das Mol, Symbol mol, ist die SI-Einheit der Stoffmenge. Ein Mol enthält genau $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ Einzelteilchen. Diese Zahl ist der festgelegte numerische Wert der Avogadrokonstante N_A , ausgedrückt in der Einheit mol^{-1} , und wird als Avogadrozahl bezeichnet.

Die Stoffmenge, Symbol n , eines Systems ist ein Mass für eine Anzahl spezifizierter Einzelteilchen. Dies kann ein Atom, Molekül, Ion, Elektron sowie ein anderes Teilchen oder eine Gruppe solcher Teilchen genau angegebener Zusammensetzung sein.

Diese Definition gibt N_A den Wert $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. Löst man diese Beziehung nach der Einheit mol auf, so ergibt sich:

$$1 \text{ mol} = \frac{6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}}{N_A}$$

Das heisst, ein Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ eines bestimmten Einzelteilchens enthält.



Candela

Die Candela (Symbol cd) ist die SI-Einheit der Lichtstärke in einer bestimmten Raumrichtung. Sie wird definiert durch die Konstante K_{cd} , das photometrische Strahlungsäquivalent einer monochromatischen Strahlung von $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$. Der Zahlenwert dieser Konstante ist auf 683 festgelegt, wenn sie in der Einheit lm W^{-1} bzw. cd sr W^{-1} oder $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$ angegeben wird und das Kilogramm, der Meter und die Sekunde durch h , c und $\Delta\nu$ definiert sind.

Diese Definition gibt K_{cd} den Wert $683 \text{ cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$. Löst man diese Beziehung nach der Einheit cd auf, so ergibt sich:

$$1 \text{ cd} = \left(\frac{K_{cd}}{683} \right) \text{ kg m}^2 \text{s}^{-3} \text{sr}^{-1}$$

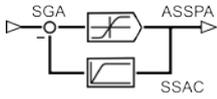
$$= \frac{1}{(6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34})(9\,192\,631\,770)^2 \cdot 683} (\Delta\nu)^2 h K_{cd} \approx 2,614\,830 \cdot 10^{10} (\Delta\nu)^2 h K_{cd}$$

Das heisst, eine Candela ist die Lichtstärke (in eine bestimmte Raumrichtung) einer Strahlquelle, die mit einer Frequenz von $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ emittiert und die eine Strahlungsintensität in dieser Richtung von $1/683 \text{ W sr}^{-1}$ hat.

Anmerkung: Die Definitionen für die Sekunde, den Meter und die Candela entsprechen inhaltlich den bisher gültigen Definitionen für diese drei Einheiten (Sekunde: 1967/1968, Meter: 1983, Candela: 1979). Allerdings sind diese Definitionen in ihrer Formulierung den neuen Definitionen für das Kilogramm, das Ampere, das Mol und das Kelvin angepasst.

* Der Steradian (sr) ist eine Masseinheit für den Raumwinkel. Auf einer Kugel mit 1 m Radius umschliesst ein Steradian eine Fläche von 1 m^2 auf der Kugeloberfläche.





SENSOR+TEST Die Messtechnik Messe in Nürnberg



Die SENSOR+TEST in Nürnberg ist weltweit das führende Forum in den Bereichen Sensorik, Mess- und Prüftechnik. Rund 530 Aussteller präsentieren ihre Kompetenzen aus dem gesamten Spektrum der Messtechnik: angefangen bei Sensorelementen über messtechnische Systeme und Software bis hin zu Labormesstechnik und einer Vielzahl an branchenspezifischen Dienstleistungen.

Sonderthema «Sensorik und Messtechnik für die Prozessautomation»

Ausgehend von den beiden meist gemessenen Größen Druck und Temperatur bildet die Vielfalt der Prozesssensorik und -messtechnik seit jeher den Kern der SENSOR+TEST.

Mit dem flächendeckenden Einzug der Digitalisierung auch in die Prozessautomation sind die Anforderungen an Sensoren und Messsysteme ebenso stark gewachsen, wie deren Bedeutung für die Industrie. Ob neu entwickelte Messverfahren, selbstüberwachende Sensornetzwerke oder Systeme zur Prozessanalyse mit Cloud- und KI-Unterstützung: das Sonderthema der SENSOR+TEST 2019 bietet Anbietern und Nutzern Raum zum Innovationsdialog über neue Konzepte, Produkte und Lösungen für diesen wichtigen Anwendungsbereich.

Auf dem [Sonderforum](#) in Halle 5 können Sie sich gezielt und konzentriert einen Überblick über neue Produkte und Lösungen verschaffen. Das [Vortrags-Forum](#) in Halle 5 steht am 25. Juni 2019 ebenfalls unter dem Motto «Sensorik und Messtechnik für die Prozessautomation».

Messe-Neuheiten Suche

Mit dem SENSOR+TEST-Newsletter sind Sie schon vor der Messe über die Innovationen der Aussteller informiert. Einfach [hier](#) abonnieren und den Messebesuch noch effizienter vorbereiten. Eine Gesamtansicht aller bisher eingereichten Messeneuheiten steht Ihnen hier zur Verfügung.

Nutzen Sie die Möglichkeit und nehmen Sie den elektronischen Vorregistrierungs-Service in Anspruch.

Der Vorteil: Sie sparen den Ticketpreis von 26 Euro

Download für Gratiseintritt: [Klick](#)

[Messeinfos anfordern](#)

Jetzt kostenlosen Eintrittsgutschein sichern:
www.sensor-test.com/gutschein



Willkommen zum

Innovationsdialog!



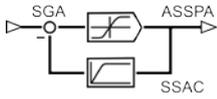
SENSOR+TEST

DIE MESSTECHNIK - MESSE

Nürnberg, 25. – 27. Juni 2019

Effizient und persönlich - Wissenschaftlich fundiert - Vom Sensor bis zur Auswertung

AMA Service GmbH - 31515 Wunstorf, Germany - Tel. +49 5033 96390 - info@sensor-test.com



Besichtigung der Firma MECOS AG Zürich – 4. Juni 2019
 im Anschluss daran SGA Generalversammlung

Die diesjährige Generalversammlung der SGA findet im Anschluss an die Besichtigung der Firma MECOS AG und der Firma MAN Energy Solutions in Zürich statt.

Auf der Webseite der MECOS AG liest man, dass es sich um den Pionier von digital geregelten Magnetlager-Systemen und den führenden Zulieferer der Magnetlager-Technologie für den Einsatz in industriellen Anwendungen handelt. Diese Magnetlager-Technologie erlaubt das kontrollierte, berührungslose Schweben eines Rotors und ermöglicht somit neue Anwendungen. Sie bietet viele Vorteile wie zum Beispiel:

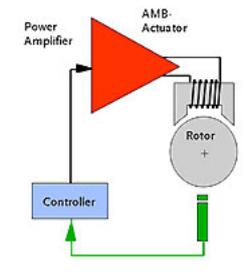
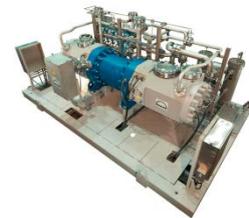
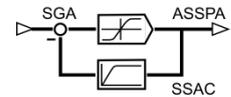
- Berührungsfreie Rotation und somit keine Reibungsverluste
- Ölfreier Betrieb
- Aktive Dämpfung von Vibrationen
- Abstimmung auf hohe Drehzahlen
- Überwachung von Betriebsparametern
- Einsatz bei tiefen und hohen Temperaturen
- und viele mehr...

MECOS liefert unter anderem die Magnetlager für einen Multi-Megawatt HOFIM™ Kompressor der Firma MAN Energy Solutions.

Das Grundprinzip

Elektromagnete halten einen Rotor in der Schwebe. Die Rotorposition wird an einen digitalen Controller übermittelt. Der Controller korrigiert eine eventuelle Abweichung von der gewünschten Position des Rotors und liefert das notwendige Signal. Eine Leistungsendstufe wandelt das Signal schlussendlich in einen Strom für die Magnetlagerspulen um.

Die Regelstrecke ist wegen den Elektromagneten instabil und nicht linear. Zusammen mit der Rotordynamik wird das Auslegen von guten Reglern eine anspruchsvolle Aufgabe.

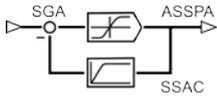


Einladung zur Generalversammlung

Die detaillierte Einladung mit allen Infos finden Sie zu gegebener Zeit auf der SGA Webseite. Unsere Mitglieder finden diese mit der Jahresrechnung in der Post.

Bitte Termin reservieren!





Termine – Links IFAC

Infos zu allen Veranstaltungen der IFAC können Sie direkt auf der SGA Webseite entnehmen. Es sind alle IFAC News aufgeschaltet.

Sollten Sie die Mails, mit denen wir Ihnen jeweils die IFAC News als PDF weiterleiten nicht mehr griffbereit haben, finden Sie diese auch auf unserer Webseite unter: www.sga-asspa.ch

21st IFAC World Congress

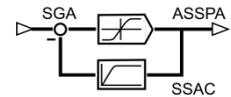
The 21st IFAC World Congress will be hosted by the VDI/VDE Society for Measurement and Automatic Control on the 12th to 17th July 2020 in Berlin.

The Congress takes place at: ESTREL Berlin, Sonnenallee 225, 12057 Berlin

Workshops and tutorials are planned on the 11th and 12th July.

The Council of the International Federation of Automatic Control (IFAC) held in Zurich on 19 July 2013 has selected the German proposal for the organisation of the 21st IFAC World Congress in Berlin, Germany in 2020.

The 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control was held in Toulouse, France, in July 2017.



Termine – IMEKO (International Measurement Confederation)

Infos und Daten zu allen IMEKO Events entnehmen Sie bitte der [IMEKO Webseite](#)

Administration

Wie immer an dieser Stelle, möchte ich mich vom Sekretariat herzlich bedanken, dass Sie einerseits der SGA die Treue halten und vor allem dafür, dass unsere «Mitgliederliste» inzwischen so genau stimmt, dass nur noch Abwesenheitsmeldungen eingehen. Das ist nur Dank Ihnen möglich, die Sie mir Adress- und E-Mail Änderungen mitteilen.

Neue Mitglieder

Wir heissen Herrn **Prof. Dr. Thomas Besselmann**, Dozent an der Fachhochschule Nordwestschweiz herzlich in der SGA willkommen.

Ebenso freuen wir uns, dass sich der Gewinner des 2017 vergebenen Förderpreises Bachelor, **Herr Raphael Agner** zu einer Mitgliedschaft in der SGA entschlossen hat. Auch ihm ein herzliches Willkommen!



© www.freepik.com
 Designed by rawpixel.com

Impressum

Das Bulletin erscheint dreimal jährlich und wird den Mitgliedern per E-Mail zugestellt. Es ist für PDF und Bildschirm optimiert. Die gedruckte Version erscheint daher nicht im doppelseitigen Layout.

Redaktion SGA Dr. Peter Gruber
 sensors.ch Peter Kirchofer

Gestaltung SGA Sekretariat Christl Vogel

Auflage 150 Exemplare SGA + 150 Exemplare sensors.ch

Redaktionsschluss für Bulletin Nr. 83 – August 2019

Herausgeber

Schweizerische Gesellschaft für Automatik

Association Suisse pour l'Automatique

Swiss Society for Automatic Control

Adresse

SGA Sekretariat

Christl Vogel

Eggwilstr. 16a

CH.9552 Bronschhofen

Tel. 076 215 67 57

sekretariat@sga-asspa.ch

Sensors.ch-Besuch vom 04. Februar 2019
BELIMO, Hinwil, ZH



BELIMO wurde 1975 gegründet und beschäftigt heute über 1500 Mitarbeiter. 2017 investierte die Belimo-Gruppe 7,7% des Nettoumsatzes respektive 44,4 Millionen Schweizer Franken in Forschung und Entwicklung. Am Standort Hinwil arbeiten etwa 100 Leute in der aF+E. Das Unternehmen ist global in 80 Ländern zuhause.

BELIMO ist Weltmarktführer bei der Entwicklung, der Herstellung und dem Vertrieb von Antriebslösungen zur Regelung und Steuerung von Heizungs-, Lüftungs- und Klima-Anlagen. Dabei bilden Stellantriebe, Wasser-Stellglieder und Sensoren das Kerngeschäft. Eine intelligente Gebäude-Automation erlaubt die Optimierung des Nutzen/Kosten-Verhältnisses bei der Gebäudenutzung.

Der Firmen-Name ist zusammengesetzt aus den für die Kunden wichtigsten Aktivitäten: BEraten, Liefen und MONTieren.

Das Unternehmen verfolgt mit der Ausgestaltung seiner Produkte-Palette die «CESIM»-Strategie, wo C für den Comfort beim Nutzer des Gebäudes steht, E für Energyefficiency, S für Safety der Menschen, I für einfache Installation und M für Maintenance mit geringem Aufwand.

Folgende «Belimo Quality First» Standards sind das Credo des Unternehmens:

- Wir sind erfolgreich, wenn wir unseren Kunden mehr Wert bieten. Deshalb erbringen wir Topleistungen bei allem, was wir tun. Das Leitbild, die Werte und der Verhaltenskodex sind uns Orientierung und Hilfe bei unserm Aufstieg. Wir verstehen unsere Kunden und konzentrieren uns darauf, diese noch erfolgreicher zu machen.
- Wir helfen unseren Kunden, Komfort, Energieeffizienz und Sicherheit in Gebäuden sowie einfachste Installation und Instandhaltung zu erzielen (CESIM), und dies über die gesamte Nutzungsdauer eines Gebäudes.
- Unsere Prioritäten sind erstens die Qualität, zweitens die Termine und drittens die Kosten.
- Operative Höchstleistung in unseren Geschäftsprozessen gewährleistet, dass unsere Produkte und Dienstleistungen von Top-Qualität sind. Jeder Mitarbeitende ist für die Qualität verantwortlich.
- Wir lernen aus unseren Fehlern und sehen diese als Chance für Höchstleistungen.
- Wir tun nur das selbst, was andere nicht besser können. Das gibt uns mehr Zeit für unsere Hauptaufgaben. Dies bedeutet, dass, wo immer sinnvoll, externe Partner eingebunden werden.

Der Fokus ist dabei auf Fertigung, Prüfung und Customizing gelegt.

Diese Standards spiegeln auch die im Unternehmen gelebte Vertrauens-Kultur unter den Mitarbeitenden und gegenüber den Kunden.

Der Erfolg von Belimo basiert auch auf ursprünglich 23 Engpass-Konzentrierten-Strategiesätzen (EKS) nach Prof. h.c. Wolfgang Mewes, welche vom BELIMO-Gründer Walter Burkhalter und seinen Partnern in ihrer Unternehmensführung beherzigt wurden, und woraus sie alle Führungsentscheidungen ableiteten. Als Pragmatiker haben sie vierzehn komplementäre Belimo-Strategiesätze entwickelt und ihren Entscheiden zu Grunde gelegt, wie z.B.

- > *«Suche den grössten Engpass und löse ihn zuerst. Dann werden sich viele kleinere Probleme von selbst lösen.»*
- > *«Unterscheide zwischen Zielen und Erwartungen.»*
- > *«Vermeide Konfrontation, pflege Kooperation.»*
- > *«Biete dem Kunden immer mehr Nutzen als die Mitbewerber, d.h. über den Zielgruppennutzen wird der eigene Gewinn optimiert.»*
- > *«Du musst nicht perfekt sein, nur immer besser als Deine Mitbewerber.»*

Autor:
Peter Kirchhofer
Tel. 061 281 19 45 (privat)
peter.kirchhofer@alumni.ethz.ch



BELIMO Hauptsitz Hinwil



Daraus resultieren grösser Nutzen für Zielgruppennutzen, grössere Anziehungskraft des Unternehmens, grössere Nachfrage, grössere Stückzahlen, grössere Produktivität, schneller Kostendegression, höherer Gewinn, mehr Liquidität, mehr Bewegungsfreiheit und schnelleres Wachstum.

Siehe auch das Buch «**Das Geheimnis des Belimo Erfolges** – Eine Strategie führt zur Weltmarktführerschaft» von Walter Burkhalter, 2010 erschienen bei Orell Füssli Zürich.

Der **Rundgang durch das Unternehmen** führte zuerst in die firmeneigene HLK-Anlage im 5. Stock wo uns die Wärme-Rückgewinnung aus der warmen Abluft zum Erwärmen der kalten Frischluft mit Hilfe eines rotierenden Wabenrades gezeigt wurde. Das durch die durchströmende Abluft sektoriell erwärmte Wabenrad gibt nach einer halben Umdrehung die Wärme an die dort durchströmende Frischluft ab.

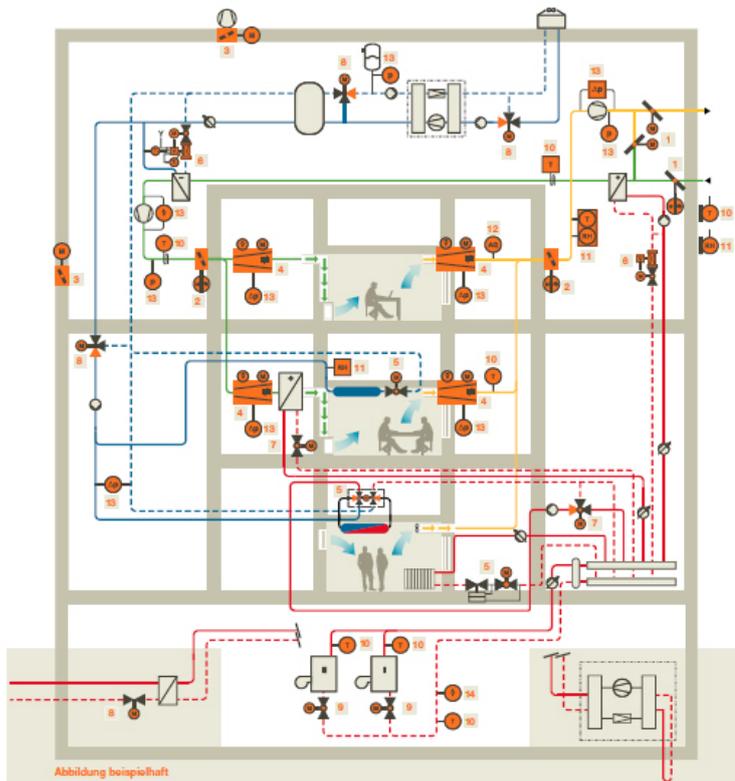


Abb. 2: Alle BELIMO-Produkte unter einem Dach schematische und detaillierte Darstellung © BELIMO

Der erste pneumatisch angetriebene Steckmotor (auch Stellmotor genannt) wurde bei BELIMO aus einem pneumatischen Antrieb der früheren Fa. Stäfa Control Systems AG entwickelt und diente als Linearantrieb mit einer Gestängeanwendung zur Verstellung von Klappen. Zum Antrieb von Brandschutz-Klappen werden Steckmotoren mit Feder-Rücklauf verwendet, damit das Schliessen der Klappen auch nach einem Ausfall der Energiezufuhr erfolgen kann. Bei elektrisch angetriebenen Motoren werden heute auch Module mit Super-Kondensatoren als elektrische Energiespeicher verwendet.

In einer Montage-Werkstatt wurde der Zusammenbau von Antriebsmotoren gezeigt. Dabei werden aus fremdgefertigten Modulen bis zu 22 unterschiedliche Motortypen gefertigt, zum Teil vollautomatisiert unter Zuhilfenahme von Montage-Robotern, computergesteuerten Rollen-Bahnen und Zubringer-Liften. Jeder einzelne Antrieb – ungefähr 6,3 Millionen allein im Jahr 2017 – wird vor seiner Auslieferung auf Herz und Nieren geprüft. Die konsequente Automatisierung erlaubt auch heute noch die kostengünstige Fertigung in der Schweiz.

Die Mitarbeitenden sind im Rahmen des kontinuierlichen Optimierungsprozesses in das Vorschlagswesen eingebunden. Innerhalb der Fertigungs-Teams werden Verbesserungsvorschläge ausgearbeitet und dem Controlling zur Freigabe unterbreitet. Zur Sicherung der Lieferfähigkeit sind die Werkstätten in Brandschutz-Zonen mit zum Teil redundanten Fertigungsmitteln unterteilt.

In einer anderen Werkstätte werden Durchfluss-Sensoren für Wasser gefertigt. Sie basieren auf dem Ultraschall-Messprinzip und werden nach dem Zusammenbau einzeln kalibriert.

Zur Kunden-Demonstration verschiedener Produkte wie auch z.B. des Unterschieds zwischen der Klima-Steuerung mit einfachen gesteuerten Durchlassventilen im Gegensatz zu sensorgeführten Ventilen besteht ein eigener Demonstrationsraum.

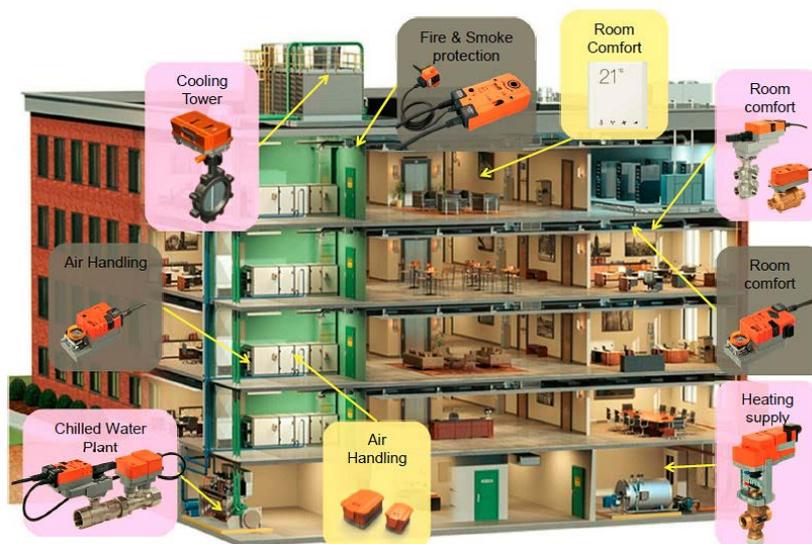


Abb. 3 Anwendungen von BELIMO-Produkten
© BELIMO

Nach Abschluss des Rundgangs wurden noch die bei BELIMO seit 2 Jahren selber produzierten Sensoren vorgestellt. Deren Eigenbau ermöglicht einfacher die Herstellung intelligenter Produkte, deren Integration ins Internet of Things und das Angebot kompletter Applikationslösungen aus einer Hand. Das BELIMO-Sensorprogramm umfasst Fühler für relative und absolute Feuchte, Taupunktmessungen, Sensoren für die Luftqualität, insbesondere den Gehalt an CO₂ und flüchtiger organischer Stoffe, Sensoren für Luft- und Wasser-Druck und Durchfluss. Da Sensor-Ausfälle beim Anwender zu Komfort- und Produktivitäts-Verlusten führen können, wird bei BELIMO grosses Gewicht auf die Untersuchung der Ausfallgründe gelegt (Alterung, Drift, ungeeignete Applikation) und nach Verbesserungsmöglichkeiten geforscht.

Kommende Veranstaltungen

09. Mai 2019

Swiss iCAN'19 Event for the Selection of the Winner Team
Angaben zur Wettbewerbs-Teilnahme unter <www.ican-contest.ch>



Swiss Qualifying Competition 



18. Juni 2019

Sensors-GV bei SIEMENS BUILDING TECHNOLOGIES AG, Zug
mit anschliessendem Besuch des Unternehmens

