

„Ulrich Jumar, Christian Diedrich (Hrsg.):  
EKA 2024 - Entwurf komplexer Automatisierungssysteme, 18. Fachtagung“

## Modellbasierter Entwurf und Anwendung einer Eigenschaftsregelung zur Automatisierung eines innovativen Drückwalzprozesses

Lukas Kersting<sup>1</sup>, Bahman Arian<sup>2</sup>, Julian Rozo Vasquez<sup>3</sup>, Ansgar Trächtler<sup>4</sup>, Werner Homberg<sup>5</sup> und Frank Walther<sup>6</sup>

**Abstract:** Das Konzept der Eigenschaftsregelung mit einer Online-Messung und Rückkopplung der Bauteileigenschaften ist ein derzeit in der Umformtechnik viel diskutiertes – aber bislang kaum umgesetztes Konzept, um den Automatisierungsgrad bei der Bauteilfertigung weiter zu erhöhen und um innovative, neue Produkte mit gradierten Eigenschaften herstellen zu können. Dieser Beitrag soll helfen, diese Lücke zu schließen und befasst sich daher mit den Schritten des Entwurfs bis hin zur Anwendung / Validierung einer neuen Eigenschaftsregelung für das Drückwalzen metastabiler austenitischer Edelstähle. Hierbei handelt es sich um einen Fertigungsprozess für rotationssymmetrische Edelstahlbauteile in kleinen bis mittleren Losgrößen. Der metastabile austenitische Edelstahl ändert während der Verformung seinen  $\alpha'$ -Martensitgehalt und damit verbunden u.a. die magnetischen Eigenschaften. Deshalb soll über die Eigenschaftsregelung ein definiertes Einstellen des  $\alpha'$ -Martensitgehaltes ermöglicht werden. Die Entwicklung der neuen Eigenschaftsregelung erfordert allerdings aufgrund der Prozesskomplexität ein modellbasiertes Vorgehen. Im Rahmen dieses Beitrags wird daher insbesondere gezeigt, wie mittels des modellbasierten Entwurfs und eines regelungstechnischen Systemmodells die Eigenschaftsregelung ausgelegt werden kann. Zudem beinhaltet der Beitrag erste experimentelle Validierungsergebnisse der zuvor entworfenen Eigenschaftsregelung unter Nutzung eines innovativen mikromagnetischen Softsensorsystems.

**Keywords:** Drückwalzprozess, Eigenschaftsregelung intelligenter Umformprozesse, modellbasierter Regelungsentwurf, experimentelle Validierung

### 1 Einleitung

Der wirtschaftliche Wandel zu Industrie 4.0 und cyberphysischen Systemen erfordert eine steigende Automatisierung industrieller Fertigungsprozesse. Insbesondere im Bereich der

<sup>1</sup> Fraunhofer Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM, Scientific Automation, Zukunftsmeile 1, 33102 Paderborn, [lukas.kersting@iem.fraunhofer.de](mailto:lukas.kersting@iem.fraunhofer.de), <https://orcid.org/0000-0002-9733-7528>

<sup>2</sup> Universität Paderborn, Umformende und Spanende Fertigungstechnik LUF, Warburger Straße 100, 33098 Paderborn, [ba.luf@uni-paderborn.de](mailto:ba.luf@uni-paderborn.de)

<sup>3</sup> TU Dortmund, Lehrstuhl für Werkstoffprüftechnik (WPT), Baroper Straße 303, 44227 Dortmund, [julian.rozo@tu-dortmund.de](mailto:julian.rozo@tu-dortmund.de), <https://orcid.org/0000-0002-5377-1795>

<sup>4</sup> Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Fürstenallee 11, 33102 Paderborn, [ansgar.traechtler@hni.upb.de](mailto:ansgar.traechtler@hni.upb.de), <https://orcid.org/0000-0001-9987-1655>

<sup>5</sup> Universität Paderborn, Umformende und Spanende Fertigungstechnik LUF, Warburger Straße 100, 33098 Paderborn, [wh.luf@uni-paderborn.de](mailto:wh.luf@uni-paderborn.de), <https://orcid.org/0000-0003-4081-1249>

<sup>6</sup> TU Dortmund, Lehrstuhl für Werkstoffprüftechnik (WPT), Baroper Straße 303, 44227 Dortmund, [frank.walther@tu-dortmund.de](mailto:frank.walther@tu-dortmund.de), <https://orcid.org/0000-0003-2287-2099>

Umformtechnik, einer Gruppe von Fertigungsverfahren, die aufgrund des fehlenden Materialabtrages besonders ressourcenschonend und somit zukunftssträchtig erscheinen, wird aus diesem Grund in letzter Zeit das Konzept der Eigenschaftsregelung mit einer Online-Messung der Produkteigenschaften inkl. Rückkopplung in den Prozess diskutiert (siehe z.B. [Al16, St24]). Hierdurch ist es möglich, den Automatisierungsgrad nachhaltig zu erhöhen, denn bislang erfordern einige Umformprozesse teils zeitintensive, manuelle Fertigungsschritte, um Produkte mit gewünschter Genauigkeit, Qualität und definierten Eigenschaften herstellen zu können. Beispielhaft sei hier die Ermittlung der geeigneten Stellgroen / umformtechnischer Prozessparameter für neue Produkte im Trial-and-Error-Verfahren genannt. Zudem ist teils manuelle Nacharbeit am gefertigten Produkt notwendig, um gewünschte Toleranzen zu erreichen.

### 1.1 Drückwalzen metastabiler austenitischer Edelstähle

Zu jenen aus Sicht der Prozessautomatisierung problematischen Umformprozessen gehört das Drückwalzen metastabiler austenitischer Edelstähle. Hierbei handelt es sich um ein Verfahren zur Herstellung von rotationssymmetrischen Bauteilen aus zylindrischen Rohren. Das Drückwalzen wird generell bereits in der Luft- und Raumfahrtindustrie sowie in der Fahrzeugindustrie zur Herstellung von Strahltriebwerken, Hydraulikzylinder und Antriebswellen eingesetzt. Hier erfolgt die Bauteilfertigung auf CNC-gesteuerten Drckwalzmaschinen, die aus einer oder mehreren, in zwei Achsen verfahrbaren Drückwalzen sowie einem rotierenden Spindeltrieb mit Dorn bestehen [Ru93] (siehe Abb. 1).

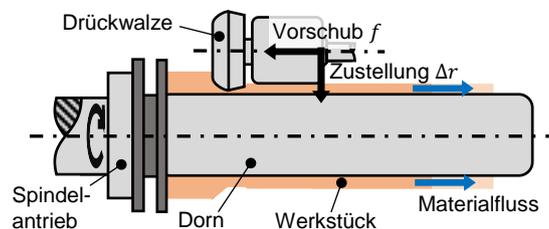


Abb. 1: Funktionsprinzip des Drückwalzens

An der Drckwalzmaschine wird im Verlauf der Bauteilfertigung ein rohrförmiges Halbzeug auf den Dorn aufgesetzt und in Rotation versetzt. Dann wird die Drückwalze mit einem definierten axialen Vorschub und einer radialen Zustellung entlang des Bauteils bewegt und die Bauteiloberfläche berwalzt. Hieraus resultieren eine charakteristische Wanddickenreduktion und eine Längenänderung. Bei den Halbzeugen aus metastabilen austenitischen Edelstählen (z.B. 1.4307, AISI 304L, X2CrNi18-9) kommt es zudem zur verformungsinduzierten Phasenumwandlung des Gefüges von Austenit zu  $\alpha'$ -Martensit, verbunden mit einer Änderung der Produkteigenschaften, wie z.B. der Härte, Festigkeit und Magnetik. Die Menge an gebildetem  $\alpha'$ -Martensit unterliegt neben den Prozessparametern Vorschub und Zustellung allerdings vielen weiteren Einflussfaktoren wie etwaigen Materialinhomogenitäten, der exakten Legierungszusammensetzung der Werkstoffcharge

und der Umgebungstemperatur. Zudem ist auch die tatsächliche Geometrie des gefertigten Bauteils vielen Einflussfaktoren unterworfen, z.B. dem Rückfederungsverhalten der Maschine. Diese Prozesskomplexität macht den Prozess nur schwer reproduzierbar und führt zu Abweichungen, die in der industriellen Umsetzung zurzeit ansatzweise durch eine Kombination aus Erfahrungswissen, Trial-and-Error-Vorgehen und manueller Nachbearbeitung (z.B. Nachschleifen oder Abdrehen des Bauteils) kompensiert werden. Allerdings steht dieses Vorgehen der Automatisierung des Umformprozesses entgegen. Auch ist aufgrund der steigenden Entwicklungszeit die mögliche Produktkomplexität limitiert. Dies verhindert bspw. die Realisierung von innovativen funktionsintegrierten Hochleistungsbauteilen mit gradierten Eigenschaftsstrukturen (z.B. unsichtbare magnetische Bar- und QR-Codes) zur Vorbeugung von Bauteilfälschung. Somit bietet hier die Idee einer Eigenschaftsregelung viele neue Chancen und Möglichkeiten für die Prozessautomatisierung.

## 1.2 Stand der Forschung für eigenschaftsgerichtete Umformprozesse

Das Konzept einer Eigenschaftsregelung erweitert Umformprozesse um eine übergeordnete Reglerkaskade für die Werkstückeigenschaften der produzierten Bauteile [PAD14, A116]. Diese regelt die programmierte Werkzeugbahn der positionsgeregelten bzw. CNC-gesteuerten Werkzeugmaschine als Stellgröße abhängig einer Eigenschaftsmessung am Bauteil. Hierdurch sollen aufgrund der Prozessstörgrößen vorliegende Eigenschaftsabweichungen im Bauteil direkt online im Prozess erkannt und während der Bauteilfertigung kompensiert werden, um Ausschuss zu reduzieren bzw. manuelle Nachbearbeitung zu vermeiden und somit den Fertigungsprozess effizienter und nachhaltiger zu machen [St24].

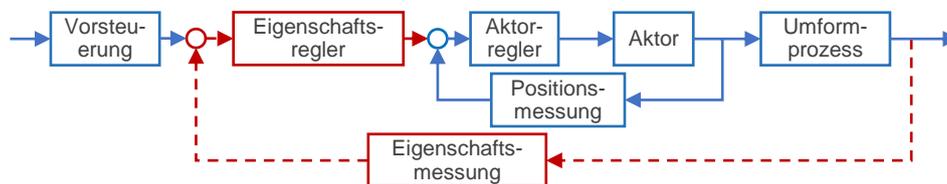


Abb. 2: Erweiterung des Umformprozesses (blau) um eine Eigenschaftsregelung (rot gestrichelt)

Die Regelgrößen der Eigenschaftsregelung umfassen generell sowohl geometrische Eigenschaften (z.B. Wanddicke, Länge) als auch Material- und Werkstückeigenschaften (z.B. Härte). Insbesondere im Bereich der geometrischen Eigenschaften sind bereits einige Anwendungen Stand der Forschung, insb. im Bereich des Tiefziehens. So regeln *Endelt et al.* und *Tricarico et al.* den Flanscheinzug beim Tiefziehen durch eine Online-Anpassung der Niederhaltkraft [ETD13, TP23]. Zudem sind weitere Anwendungen bekannt, bei denen allerdings die Stellgrößenänderung u.a. aufgrund der begrenzten Aktordynamik oder der Messdauer von Bauteil zu Bauteil erfolgt [En17, Fi20]. Eine weitere Anwendung der Geometrie-Eigenschaftsregelung, die zumindest in der Forschung weit verbreitet ist, findet sich im Incremental Sheet Forming. Hier erfolgt in mehreren Literaturquellen unterschiedlicher Autoren eine Regelung der Bauteilgeometrie zur Kompensation der Rückfederung im Prozess (siehe z.B. [HD11, Lu16, FBL23]). Hier muss allerdings

einschränkend ergänzt werden, dass es sich beim ISF um einen stark inkrementellen Prozess handelt mit mehreren sequenziell umgeformten Schichten. In der genannten Literatur erfolgt die Stellgrößenänderung immer von Schicht zu Schicht, unterbrochen durch die Messung mittels 3D-Scanner bzw. Stereokamera mit einer Messdauer- und Datenverarbeitungsdauer von 11 s [HD11] bis hin zu 15 min [Wa23]. Somit handelt es sich hier nur bedingt um Online-Regelung der Eigenschaften im eigentlichen Sinn.

Auch hinsichtlich der Regelung von Material- bzw. Werkstückeigenschaften existieren bereits einige Veröffentlichungen, wenngleich in einem deutlich geringeren Umfang als bei den geometrischen Eigenschaften. *Lafarge et al.* stellen eine Regelung der Härte beim thermomechanischen Ringwalzen vor und validieren das Konzept in Co-Simulation zwischen Python und LS-Dyna [La21]. *Ismael et al.* präsentieren einen Regelungsansatz für die kombinierte Regelung der Eigenspannungen und Krümmung beim Freiformbiegen und zeigen ersten Regelungsergebnisse anhand eines aus der FE-Simulation abgeleiteten Regressionsmodells in MATLAB/Simulink [Is22]. Zudem wird in [Spi23] ein Regelungskonzept für das Stanzlochwalzen vorgestellt. Hier ist – genauso wie bei den anderen genannten Veröffentlichungen – keine experimentelle Umsetzung und Validierung an einer Werkzeugmaschine als Stand der Forschung bekannt. Ausnahme ist der Prozess des Kaltwalzens eines Stahlbandes. In [Sc21] validieren *Schulte et al.* eine modellprädiktive Regelung der Oberflächenrauheit durch Anpassung des Walzspalts.

Für den Drückwalzprozess, der im Fokus dieses Beitrags steht, existieren Stand heute nur wenige Arbeiten hinsichtlich des Einsatzes von Regelungstechnik. Diese kommt beim Drückwalzen vor allem in Form des Lageregelkreises der CNC-gesteuerten Maschinenaktorik zum Einsatz [Ru93]. Forschungsarbeiten zur Regelung beim Drückwalzen erstrecken sich vor allem auf dem Gebiet der Regelung der Umformkräfte. In [Di92] wird eine adaptive Kraftregelung für das Drücken mit abschließendem Drückwalzprozess entworfen und umgesetzt. In [La24] wird eine Drückwalz-Kraftregelung mittels FE-Simulation entwickelt. Die hierdurch generierten Werkzeugbahnen werden in Form einer Steuerung auch experimentell an der Versuchsanlage validiert, allerdings erfolgt in [La24] keine Validierung im geschlossenen Regelkreis.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Konzept der Eigenschaftsregelung zwar bereits für eine Vielzahl von Umformprozessen existiert, aber insb. hinsichtlich der Regelung von Materialeigenschaften selten über das Konzeptstadium hinausgekommen ist und bislang kaum an Werkzeugmaschinen umgesetzt und validiert wurde. Für den Drückwalzprozess – insb. bei Verwendung von metastabilen austenitischen Edelstählen – ist aktuell keine Online-Eigenschaftsregelung bekannt. Um den Stand der Forschung zu ergänzen, wurde von den Autoren dieses Beitrags bereits in [Ke22a] ein Regelungskonzept für das Drückwalzen metastabiler austenitischer Edelstähle vorgestellt.

### 1.3 Konzept des eigenschaftsgerichteten Drückwalzprozesses

Das Konzept des eigenschaftsgerichteten Drückwalzprozesses metastabiler austenitischer Edelstähle sieht eine kombinierte Regelung der Wanddickenreduktion  $\Delta w$  als geometrische Regelgröße und des verformungsinduzierten  $\alpha'$ -Martensitgehalts als zu regelnde Materialeigenschaft vor (Abb. 3).

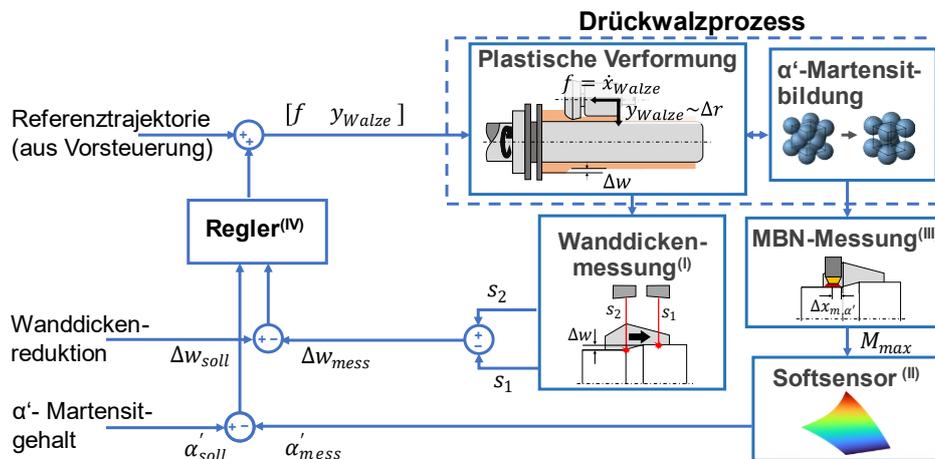


Abb. 3: Konzept des eigenschaftsgerichteten Drückwalzprozesses

Als Stellgröße der Regelung dient die Werkzeugbahn, d.h. der Vorschub  $f = \dot{x}_{Walze}$  und die Zustellung  $\Delta r$  bzw. die radialen Walzenposition  $y_{Walze}$ . Die Werkzeugbahn wird für die Regelung online während der Bauteilfertigung, d.h. am selben Bauteil und im selben Überlauf, angepasst. Die Anpassung erfolgt hierbei auf Basis eines Vergleichs zwischen Soll- und Istwert der Regelgrößen  $\alpha'$ -Martensitgehalt und Wanddickenreduktion  $\Delta w$ . Zur Online-Bestimmung dieser Regelgrößen wird ein bereits in [Ker22] und [Ro24] adaptiertes und validiertes Messkonzept genutzt. Die Messung der Wanddickenreduktion  $\Delta w$  erfolgt hier mittels zwei Laserdistanzsensoren  $S_1$  und  $S_2$  vom Typ OM70 der Fa. Baumer (siehe Abb. 3, I). Diese sind am Maschinensupport befestigt und verfahren somit mit der Drückwalze während des gesamten Umformprozesses. Hierbei ist Sensor  $S_1$  mit ca.  $90^\circ$  Winkelversatz zur Umformzone auf den bereits ungeformten Bereich ausgerichtet, während Sensor  $S_2$  den nicht umgeformten Bauteilbereich vermisst. Die Wanddickenreduktion lässt sich aus der Differenz beider Sensorsignale  $\Delta w_{mess} = s_2 - s_1$  berechnen. Die Ermittlung des  $\alpha'$ -Martensitgehaltes als zweite Regelgröße erfolgt indirekt mittels eines speziellen, von den Autoren dieses Beitrags in [Ro24] vorgestellten Softsensors (II). Der Softsensor besteht aus einem physikalischen (Hard-)Sensor und einem Softsensormodell. Als physikalischer Sensor wird ein 3MA-II-Sensor (Fraunhofer IZFP, III) genutzt. Dieser ist analog zu den Laserdistanzsensoren am Maschinensupport befestigt und misst kontinuierlich mit einem axialen Versatz  $\Delta x_{m,\alpha'} \approx 8$  mm zur Umformzone. Als Messgröße wird für den Softsensor die maximale Amplitude  $M_{max}$  des mikromagnetischen

Barkhausen-Rauschens (MBN) genutzt. Ausgehend von  $M_{max}$  und dem Vorschub  $f = \dot{x}_{Walze}$  erfolgt mittels der Softsensor-Modellgleichung aus [Ro24] die Berechnung des Martensitgehaltes  $\alpha'_{mes}$ . Die so ermittelten Regelgrößen  $\alpha'_{mes}$  und  $\Delta w_{mess}$  werden anschließend mit dem jeweiligen Sollwert  $\alpha'_{soll}$  bzw.  $\Delta w_{soll}$  verglichen. Hierauf basierend erfolgt im Regler (IV) die Berechnung der Stellgrößenänderung.

## 2 Modellbasierter Entwurf der Eigenschaftsregelung

Für die Auslegung der Regelung wird im Rahmen dieses Beitrags aufgrund der Prozesskomplexität ein modellbasiertes Vorgehen gewählt. Das bedeutet, dass unter Nutzung des Modells die Realisierbarkeit der Regelung geprüft und die Parametrierung des Reglers vorgenommen wird. Dies hat den Vorteil, dass sich die Regelung effizienter auslegen lässt sowie Zeit und Kosten für experimentelle Versuche gespart werden können. Grundvoraussetzung für das modellbasierte Vorgehen ist ein geeignetes Modell der Regelstrecke, welches den vollständigen Regelkreis inkl. der Sensorik berücksichtigt und sich „erträglicher“ Rechenzeit simulieren lässt. Ein solches Modell wurde bereits in [Ke22a] von den Autoren dieses Beitrags vorgestellt und in [Ke23, Ke24] erweitert. Dieses Modell wird in diesem Beitrag als Entwurfsmodell für den Regelungsentwurf genutzt. Aus diesem Grund erfolgt im nachfolgenden Abschnitt eine kurze Zusammenfassung über wesentliche Charakteristika des Modells. Für tiefere Details sei auf die genannte Literatur verwiesen.

### 2.1 Systemmodell des eigenschaftsgeregelten Drückwalzprozesses

Das regelungstechnische Systemmodell bildet die Prozesskinematik und das nichtlineare Umformverhalten im eigenschaftsgeregelten Drückwalzprozess ab. Es ist als signalflussorientiertes Modell in MATLAB/Simulink implementiert und besteht grundsätzlich aus einer Kombination aus Geometriemodell und empirischen Kennlinien (siehe Abb. 4). Zusammenfassend besitzt das modellierte System insb. zwei Charakteristika:

- Es handelt es sich um ein ortsverteilt System. Dieser Aspekt wird im Modell mittels eines Geometriemodells (2) abgebildet. Die Mantelfläche des Bauteils ist hierbei ortsdiskret über  $i = 1 \dots n$  Punkte mit einer Wanddicke  $w_i$  und axialen Position  $z_i$  approximiert. Die einzelnen Diskretisierungspunkte sind beim Drückwalzen aufgrund der spezifischen Prozesskinematik (helixförmige Walzenbahn) allerdings weder kontinuierlich aktuiert noch sensiert. Auch erfolgt die Messung mit einem örtlichen Versatz  $\Delta x_{m,\alpha'}$  zur Umformung. Aus diesem Grund besitzt das Sensormodell (5) und (6) bzw. reale Messglied ein Totzeitverhalten ggü. der Zustandsänderung / Umformung. Die Totzeit  $T_{tot}$  aufgrund des axialen Versatzes errechnet sich nach [Ke23] aus dem axialen Sensorversatz  $\Delta x_{m,\alpha'}$  und dem Vorschub des Aktors  $f$  über:

$$T_{tot} = \frac{\Delta x_{m,\alpha'}}{f} \quad (1)$$

- Die Regelstrecke wird im Modell insb. über die empirischen Teilmodelle (3) und (4) abgebildet. Wie aus Abb. 4 ersichtlich hängen die plastische Verformung und auch die  $\alpha'$ -Martensitbildung sowohl von der Zustellung  $\Delta r$  als auch vom Vorschub  $f$  ab (im Fall der  $\alpha'$ -Martensitbildung zumindest indirekt über  $\Delta w$ ). Es handelt sich daher um ein verkoppeltes MIMO-System (Multiple Input Multiple Output) mit je zwei Eingangs- und Ausgangsgrößen.

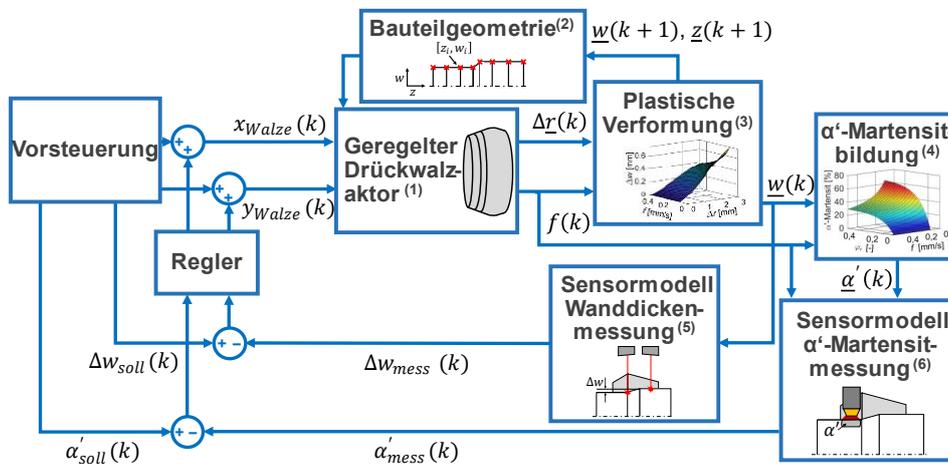


Abb. 4: Regelungstechnisches Modell inkl. Regeleinrichtung (Übersicht)

## 2.2 Festlegung der Reglerstruktur

Die Reglerstruktur eines MIMO-Systems hängt maßgeblich von dem Maß der Verkopplung zwischen den einzelnen Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systems ab. Für das eigenschaftsgeregelte Drückwalzen haben Voruntersuchungen gezeigt, dass die stärksten Kopplungen zwischen Zustellung  $\Delta r$  und Wanddickenreduktion  $\Delta w$  (nachfolgend als nichtlineare Funktion  $G_{11}$  bezeichnet) sowie zwischen Vorschub  $f$  und Martensitgehalt  $\alpha'$  ( $G_{22}$ ) vorliegen, während die Querkopplung zwischen  $\Delta r$  und  $\alpha'$  ( $G_{21}$ ) bzw.  $f$  und  $\Delta w$  ( $G_{12}$ ) eher gering ist. Ist ein System nur schwach gekoppelt, so kann es nach [Lu20] mutmaßlich über einschleifige Regler unter Vernachlässigung der Querkopplungen geregelt werden. Ein mögliches Indiz für die schwache Kopplung ist ein Kopplungsfaktor  $\kappa < 1$  (siehe [Lu20]). Dies ist gemäß Voruntersuchungen für das hier vorliegende System erfüllt. Aus diesem Grund wird die Reglerstruktur für die Eigenschaftsregelung in Form einer sog. dezentralen Regelung (im Sinne der Definition nach [Lu20]) festgelegt (siehe Abb. 5).

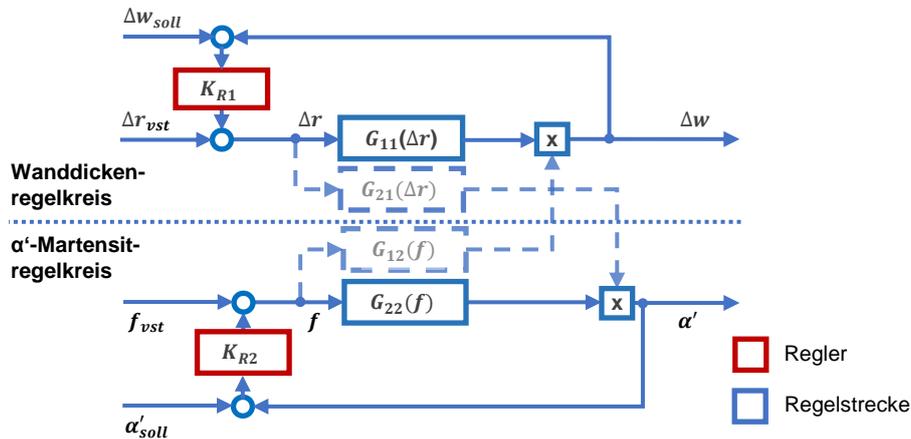


Abb. 5: Regelungsstruktur des Eigenschaftsreglers (Schema), adaptiert nach [Lu20]

Diese besteht aus zwei einschleifigen Regelungen, dem Wanddickenregelkreis und dem  $\alpha'$ -Martensitregelkreis. Im Wanddickenregelkreis wird mithilfe der Stellgröße Zustellung  $\Delta r$  die Wanddickenreduktion  $\Delta w$  geregelt, im  $\alpha'$ -Martensitregelkreis auf Basis der Stellgröße Vorschub  $f$  der Martensitgehalt  $\alpha'$ . Jeder Regelkreis besitzt einen Eingrößenregler  $K_{R1}$  (Wanddickenregler) und  $K_{R2}$  (Martensitregler) zum Einregeln der jeweiligen Regelgröße  $\Delta w$  bzw.  $\alpha'$ . Die Querkopplung zwischen den Regelkreisen ( $G_{12}$  und  $G_{21}$ ) wird hierbei lediglich als Störgröße aufgefasst, die durch  $K_{R1}$  bzw.  $K_{R2}$  mit ausgeregelt wird.

### 2.3 Regelungsentwurf

Für den Entwurf der Regler  $K_{R1}$  und  $K_{R2}$  wird die Regelungsstruktur in das regelungstechnische Systemmodell in MATLAB/Simulink implementiert. Als Regler  $K_{R1}$  bzw.  $K_{R2}$  sind im ersten Ansatz aufgrund ihrer Robustheit ggü. Modellunsicherheiten und der stationären Genauigkeit PI-Regler ausgewählt. Insgesamt sind daher im Rahmen des Entwurfes zwei Parameter pro Regelkreis einzustellen: der Proportional- und Integralanteil für den Wanddickenregelkreis  $K_{p,w}$  und  $K_{i,w}$  sowie für den  $\alpha'$ -Martensitregelkreis  $K_{p,\alpha'}$  und  $K_{i,\alpha'}$ . Um diese Parameter zu ermitteln, sind aus der Literatur ein Vielzahl von Auslegungsverfahren bekannt, wie z.B. das Frequenzkennlinienverfahren, das Einstellen eines Betragsoptimums oder empirische Einstellregeln von *Ziegler* und *Nichols* [Fö22]. Allerdings lassen sich viele Einstellverfahren im Fall des eigenschaftsgeregelten Drückwalzens aufgrund der nichtlinearen Regelstrecke sowie dem komplexen dynamischen Verhalten inkl. der Totzeit zwischen Sensor und Walze nur eingeschränkt nutzen. Ein Verfahren, welches unter den vorhandenen Rahmenbedingungen auch aufgrund der Verfügbarkeit eines schnellen Simulationsmodells als prädestiniert erscheint, ist der Entwurf eines Reglers durch Parameteroptimierung mittels eines Gütemaßes, wie z.B. in [Fö22] dargestellt. Hierbei ist es generell Ziel, die Parameter eines PI-Reglers mittels numerischer Optimierung

so anzupassen, dass eine Gütefunktion  $J$  minimal wird. Für die Gütefunktion wird in [Fö22] das zeitliche Integral über den Regelfehler  $e(t)^2 = (y_{soll} - y)^2$  mit dem (allgemeinen) Sollwert  $y_{soll}$  und dem Istwert  $y$  angesetzt, die sog. quadratische Regelfläche. Somit wird die Regelung zeitoptimal eingestellt. Für den im Rahmen dieses Beitrags vorliegenden Anwendungsfall erscheint es allerdings als sinnvoll, nicht den zeitlichen Verlauf des Regelfehlers, sondern den örtlichen Verlauf der quadratischen Regelfläche  $e(z)^2$  als Gütemaß zu betrachten (Abb. 6). So ist es doch Ziel der Eigenschaftsregelung in der Umformtechnik, möglichst genaue Bauteile zu produzieren und im speziellen beim eigenschaftsgerichteten Drückwalzen möglichst orts aufgelöste Eigenschaftsstrukturen am Bauteil zu erhalten. Allerdings ist die Totzeit aufgrund des Sensorversatzes bei variierendem Vorschub  $f$  gemäß Gl. (1) zeitvariant. Aus diesem Grund ist jedoch nicht zweifelsfrei sichergestellt, dass ein zeitoptimaler Verlauf des Regelfehlers auch einem ortsoptimalen Verlauf entspricht. Daher wird in diesem Beitrag das Optimierungsproblem zur Bestimmung von  $K_{p,w}$  und  $K_{i,w}$  sowie  $K_{p,\alpha'}$  und  $K_{i,\alpha'}$  wie folgt definiert:

$$\min J = \int_0^{z_{end}} e(z)^2 dz, \quad (2)$$

wobei  $z$  die axiale Koordinate des finalen Bauteils bezeichnet und  $z_{end}$  das Ende des umgeformten Bereiches. Zudem wird beim Drückwalzen ein aperiodisches Reglerverhalten angestrebt. Der Regler sollte daher beim Einregeln eines Sollwertsprunges nicht den Sollwert überschreiten und überschwingen, da dies zu einer zu großen plastischen Verformung am Bauteil führt und diese irreversibel ist. Aus diesem Grund wird hier das Optimierungsproblem noch um folgende Nebenbedingung erweitert:

$$-e(z) \leq 0 \quad \forall \{z \in 0 \leq z \leq z_{end}\} \quad (3)$$

Das heißt, an jedem umgeformten Punkt auf dem Bauteil soll der Regelfehler positiv, also der Istwert der Regelgröße kleiner dem Sollwert, sein.

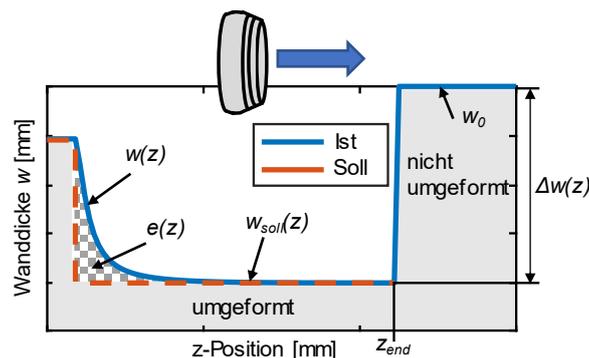


Abb. 6: Fehlerfläche beim Drückwalzen am Beispiel der Wanddicke ( $y = w$ ), Schema

Gl. (2) und (3) stellen ein nichtlineares Optimierungsproblem mit Beschränkung dar, welches in MATLAB mit dem Algorithmus *fmincon* gelöst werden kann. Im Rahmen dieses

Beitrags wird unter Zuhilfenahme des Algorithmus das nichtlineare regelungstechnische Simulationsmodell in MATLAB/Simulink aufgerufen und unter Variation der Reglerparameter (im Fall des Wanddickenregelkreises  $K_{p,w}$  und  $K_{i,w}$ , im Fall des  $\alpha$ -Martensitregelkreises  $K_{p,\alpha}$  und  $K_{i,\alpha}$ ) so lange simuliert, bis die Funktion minimal ist. Der Algorithmus *fmincon* ist allerdings nur geeignet, um lokale Minima von  $J$  zu ermitteln [An09]. Aus diesem Grund wird die Optimierung in 20facher Wiederholung mit verschiedenen, zufällig gewählten Startpunkten wiederholt, um möglichst eine globale Lösung des Optimierungsproblems zu finden. Das Ergebnis ist im Folgenden für beide Regelkreise exemplarisch für jeweils einen Arbeitspunkt der Regelung dargestellt.

### Wanddickenregelkreis

Abb. 7 zeigt das Simulationsergebnis des ausgelegten Wanddickenregelkreises am Beispiel einer Sollwanddickenreduktion  $\Delta w_{soll} = 0,5$  mm, was bei einer Ausgangswanddicke  $w_0 = 4$  mm einer Soll-Wanddicke  $w_{soll}$  von 3,5 mm entspricht. Hier wurde als anfängliche Zustellung durch die Vorsteuerung  $\Delta r_{vst} = 1$  mm vorgegeben, wobei der Vorschub  $f = \dot{x}_{Walze}$  gleichzeitig mit 0,1 mm/s konstant gehalten wurde. An dem genannten Arbeitspunkt führt die Lösung des Optimierungsproblems mit  $e(z) = w_{soll}(z) - w(z)$  zu folgenden Reglerparametern:  $K_{p,w} = 0,5$  und  $K_{i,w} = 0,1062$ .

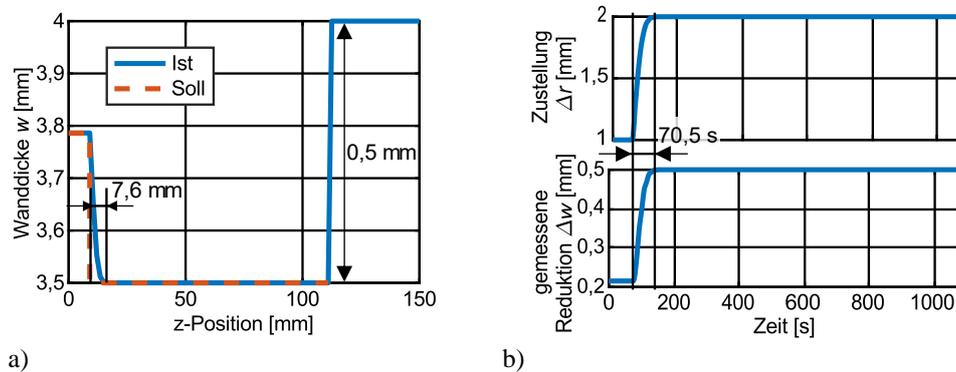


Abb. 7: Simulationsergebnis für die Auslegung des Wanddickenregelkreises

Der dazugehörige Wanddickenverlauf  $w(z)$  ist in Abb. 7a genauer dargestellt. Vor Einschalten der Regelung beträgt die Wanddicke  $w = 3,786$  mm. Nach dem Sollwertsprung bei  $z = 9$  mm wird innerhalb von 7,6 mm der Sollwert  $w_{soll}$  erreicht. Die Regelung ist somit stationär genau, was auf den I-Anteil des PI-Reglers zurückzuführen ist. Die Istwanddicke  $w$  besitzt wie durch die Nebenbedingung Gl. (3) vorgegeben einen aperiodischen Verlauf ohne Überschwingen des Sollwertes. Somit entspricht das örtliche Verhalten der Regelung der vorgegebenen Solldynamik. In Abb. 7b ist zudem der Stellgrößenverlauf und das simulierte Sensorsignal für die Wanddickenreduktion  $\Delta w$  dargestellt. Die Einregelung der Sollwanddicke erfolgt demnach durch eine Erhöhung der Zustellung um 1 mm auf  $\Delta r = 2$  mm innerhalb von 70,5 s, was relativ gut zu dem Einregelweg von

7,6 mm und dem konstanten Vorschub  $f = 0,1$  mm/s korreliert. Eventuelle Abweichungen sind u.a. auf die Längenänderung des Bauteils aufgrund der Volumenkonstanz zurückzuführen. Somit lässt sich auch durch Vergleich von Abb. 7a und b festhalten, dass der örtliche Wanddickenverlauf näherungsweise einer örtlichen Projektion des zeitlichen Verlaufes entspricht.

### $\alpha'$ -Martensitregelkreis

Abb. 8 zeigt das Simulationsergebnis des ausgelegten  $\alpha'$ -Martensitregelkreises am Beispiel eines Soll- $\alpha'$ -Martensitgehaltes  $\alpha'_{soll} = 50$  % (Vol.-%). Hier wurde als anfänglicher Vorschub  $f_{vst} = 0,25$  mm/s bei gleichzeitig während des gesamten Versuches konstanter Zustellung  $\Delta r_{vst} = 2$  mm vorgegeben. An dem genannten Arbeitspunkt führt die Lösung des Optimierungsproblems mit  $e(z) = \alpha'_{soll}(z) - \alpha'(z)$  zu folgenden Reglerparametern:  $K_{p,\alpha'} = 5,3 \cdot 10^{-3}$  und  $K_{i,\alpha'} = 3,25 \cdot 10^{-4}$ .

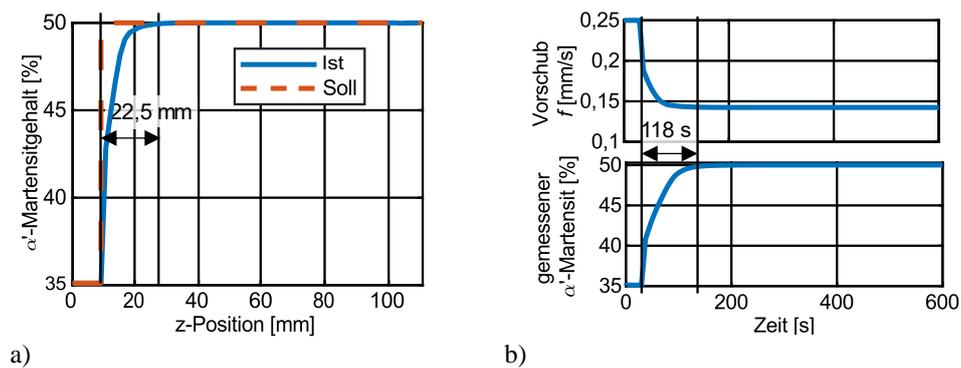


Abb. 8: Simulationsergebnis für die Auslegung des  $\alpha'$ -Martensitregelkreises

Der dazugehörige Wanddickenverlauf  $\alpha'(z)$  sowie die zeitlichen Verläufe von  $\alpha'$ -Martensitmesssignal und Vorschub  $f$  sind in Abb. 8a und b genauer dargestellt. Am Bauteilanfang beträgt der  $\alpha'$ -Martensitgehalt ca. 35%. Nach dem Sollwertsprung bei  $z = 9$  mm wird durch eine Reduktion des Vorschubes von 0,25 mm/s auf 0,14 mm/s innerhalb von 22,5 mm  $\alpha'_{soll}$  erreicht, was einer Dauer von ca. 118 s entspricht. Analog zum Wanddickenregelkreis ist das Regelungsverhalten aperiodisch und ohne Überschwingen. Auffällig ist allerdings, dass der optimal parametrisierte Regler beim  $\alpha'$ -Martensitregelkreis mit dem o.g. Einregelweg von 22,5 mm deutlich langsamer ist als der nach gleichem Vorgehen ausgelegte Wanddickenregler. Somit wird der maximale  $\alpha'$ -Martensitgehalt deutlich später erreicht. Dieses Phänomen lässt sich mit dem axialen Sensorversatz bei der  $\alpha'$ -Martensitmessung mit  $\Delta x_{m,\alpha'} \approx 8$  mm begründen. Somit liegt nach Gl. (1) beim  $\alpha'$ -Martensitregelkreis aufgrund des Versatzes eine deutliche Totzeit vor. Dies führt wiederum, wie allgemein aus der Literatur bekannt, aufgrund der größeren Phasenverschiebung i.d.R. zu einer langsameren Regelung mit geringerer Bandbreite, zumindest wenn in beiden Fällen aperiodisches Verhalten und somit ein ähnlich gedämpftes Verhalten gefordert ist.

### 3 Experimentelle Validierung

Zur experimentellen Validierung der Eigenschaftsregelkreise wurde das Regelungskonzept auf die Drückwalzanlage PLB 400 (Leifeld) an der Universität Paderborn übertragen. Hierbei handelt es sich um eine Einwalzen-Drückwalzanlage mit hydraulischem Kreuzsupport. Der Kreuzsupport besitzt einen universellen Werkzeughalter, an dem die Drückwalze und über eine Tragekonstruktion die Zusatzsensorik für die Eigenschaftsregelung (3MA-II und Laserdistanzsensoren) befestigt sind. Der 3MA-II-Sensor ist hierbei in Kontakt zur Werkstückoberfläche positioniert, während die Laserdistanzsensoren mit leichtem Versatz in Umfangsrichtung zum 3MA-II Sensor berührungsfrei messen (Abb. 9).

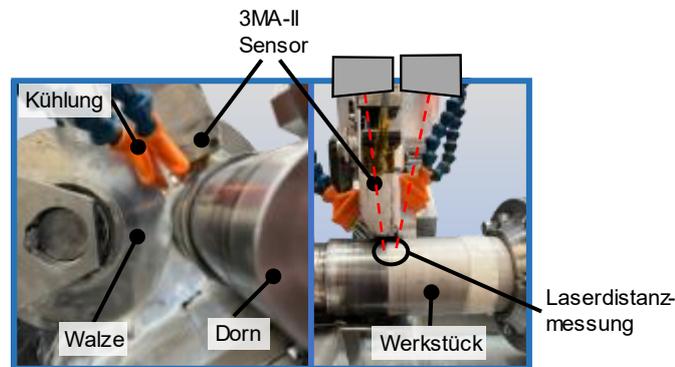


Abb. 9: Umsetzung der Eigenschaftsregelung an der Versuchsanlage

Die Ergebnisse der experimentellen Validierung an der Versuchsanlage sind nachfolgend analog zum modellbasierten Regelungsentwurf separat für den Wanddicken- und Martensitregelkreis und exemplarisch für jeweils einen Arbeitspunkt dargestellt. Beide Versuche wurden bei einer Drehzahl von  $n = 30$  U/min durchgeführt.

#### Wanddickenregelkreis

Abb. 10 zeigt das Versuchsergebnis des Wanddickenregelkreises am Beispiel einer Sollreduktion  $\Delta w_{soll} = 0,5$  mm. Hier wurde als anfängliche Zustellung  $\Delta r_{vst} = 1$  mm vorgegeben, wobei der Vorschub  $f = \dot{x}_{Walze}$  gleichzeitig mit 0,1 mm/s konstant gehalten wurde. Somit ist die Regelungsaufgabe prinzipiell identisch zur Simulation in 2.3. In Abb. 10 (unten) ist die online-gemessene Wanddickenreduktion, gemessen durch die zwei Laserdistanzsensoren, dargestellt. Zu Versuchsbeginn liegt der Messwert für die Wanddickenreduktion  $\Delta w$  bei ca. 0,25 mm. Nach dem Sollwertsprung bei  $t = 17$  s kommt es innerhalb von 80 s zu einer Erhöhung der Wanddickenreduktion auf  $\Delta w \approx 0,5$  mm durch eine Vergrößerung der Stellgröße Zustellung  $\Delta r$  um ca. 1 mm (Abb. 10 (oben)). Die Regelung ist bezogen auf das gefilterte Messsignal bzw. den Mittelwert stationär genau und stabil. Abweichungen im ungefilterten Signal können u.a. auf umfangsseitig unterschiedliche Ausgangswanddicken, welche bei der genutzten Drehzahl  $n = 30$  U/min aufgrund

der begrenzten Aktordynamik nicht ausgeglet werden können, sowie auf Störeinflüsse z.B. durch Oberflächenbeschädigungen am Halbzeug und Vibrationen am Bauteil zurückgeführt werden. Insgesamt aber kann festgehalten werden, dass der Wanddickenregelkreis eine gute Übereinstimmung zur Simulation aufweist. Dies betrifft sowohl die Regelungs-dynamik, welche nur geringfügig langsamer als in der Simulation ist, als auch die notwendige Stellgrößenänderung von  $\Delta r$  zur Einregelung des Sollwertes.

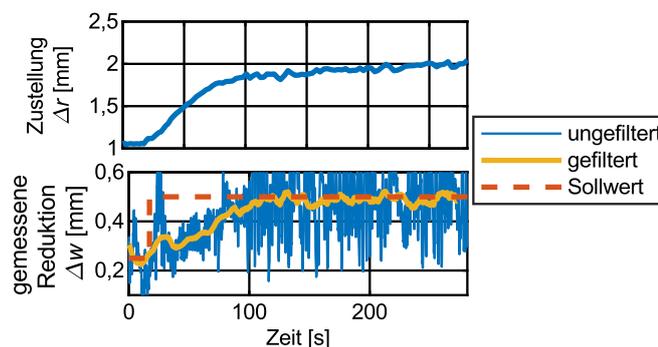


Abb. 10: Validierung des Wanddickenregelkreises

### Martensitregelkreis

Abb. 11 zeigt das Versuchsergebnis des  $\alpha'$ -Martensitregelkreises am Beispiel eines Soll- $\alpha'$ -Martensitgehaltes  $\alpha'_{soll} = 50\%$ . Hier wurde als anfänglicher Vorschub  $f_{vst} = 0,25$  mm/s bei gleichzeitig durchgängig konstanter Zustellung  $\Delta r = 2$  mm vorgegeben.

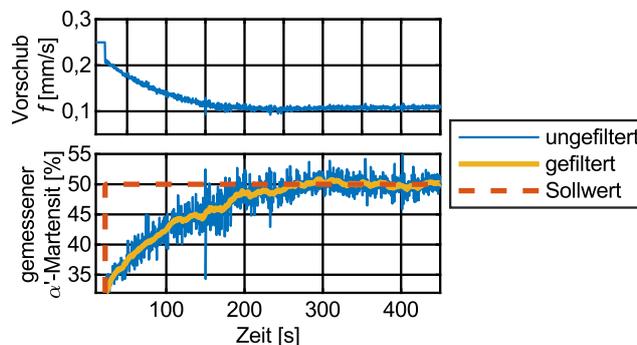


Abb. 11: Validierung des Martensitregelkreises

In Abb. 11 (unten) ist der online-gemessene  $\alpha'$ -Martensitgehalt mittels 3MA-II und Softsensor dargestellt. Zu Versuchsbeginn liegt der  $\alpha'$ -Martensitgehalt bei ca. 28%. Innerhalb von ca. 250 s ist der Sollwert von 50% durch Verringerung des Vorschubes  $f$  von 0,25 auf ca. 0,1 mm/s eingeregelt. Die Regelung ist somit im Rahmen der Messgenauigkeit von 3MA-II und Softsensor stabil und stationär genau. Allerdings weist das Messergebnis im Gegensatz zum Wanddickenregelkreis mehrere Unterschiede zur Simulation auf. Der

anfängliche  $\alpha'$ -Martensitgehalt ist mit ca. 28 % fast 7 % geringer als in der Simulation und der Vorschub wird durch die Regelung deutlich stärker verringert (auf 0,1 statt 0,14 mm/s). Diese Abweichung ist allerdings nicht auf eine schlechte Modellgüte zurückzuführen, sondern durch die Tatsache bedingt, dass das  $\alpha'$ -Martensitbildungsverhalten metastabiler austenitischer Edelstähle stark störgrößenbeeinflusst ist. So haben ergänzende Voruntersuchungen der Autoren gezeigt, dass die Affinität zur  $\alpha'$ -Martensitbildung stark durch die genaue Legierungszusammensetzung des Halbzeugs beeinflusst ist und teils selbst innerhalb einer Halbzeugcharge variiert. Insofern ist positiv hervorzuheben, dass trotz dieser Störbeeinflussung der vorgegebene Sollwert von  $\alpha'_{soll} = 50\%$  im Rahmen der Messgenauigkeit stationär genau durch die Regelung einregelt wird.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde der modellbasierte Entwurf einer neuen Eigenschaftsregelung für das Drückwalzen metastabiler austenitischer Edelstähle vorgestellt. Diese soll über zwei Regelkreise den  $\alpha'$ -Martensitgehalt und die Wanddickenreduktion regeln. Hierzu wurden die Regler mittels numerischer Optimierung und Modellsimulation parametrisiert. Auch erfolgte eine erfolgreiche experimentelle Validierung beider Regelkreise am Realsystem. Somit führt dieser Beitrag zu einer Erweiterung des Standes der Forschung, denn bislang sind – wie eingangs gezeigt – Eigenschaftsregelung nur selten und im Fall des Drückwalzens gar nicht experimentell validiert worden. Die Ergebnisse offenbaren allerdings auch weitere Herausforderungen und Ansätze für die weitere Forschungsarbeit. So unterscheidet sich die Geschwindigkeit des Einregelvorgangs deutlich zwischen beiden Regelkreisen, wofür der bauraumbedingte Sensorversatz ursächlich ist. Hier könnte zukünftig die Nutzung prädiktiver Regelungsansätze (z.B. Smith-Prädiktor, MPC) helfen, die Auswirkung des Versatzes bzw. der resultierenden Totzeit auf die Regelungsdynamik zu minimieren und somit auch eine lokalere Abgrenzung von Bereichen unterschiedlichen  $\alpha'$ -Martensitgehaltes zu ermöglichen. Weitere zukünftige Forschungsfelder könnten zudem sein, das Regelungskonzept auf umfangsseitige, angulare Gradierungen sowie Tiefengradierungen auszuweiten und somit komplexere Bauteilstrukturen zu ermöglichen. Auch ist es denkbar, den Chargeneinfluss auf die Regelung stärker im Regelungskonzept zu berücksichtigen, um z.B. über adaptive Regelungskonzepte eine optimale Einstelldauer der Regelung auch bei abweichender Legierungszusammensetzung zu garantieren.

#### Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 24335026 „Eigenschaftsorientierte Regelung von Verfestigungs- und Phasenumwandlungsprozessen beim Drücken und Drückwalzen metastabiler Austenite“ im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 2183 „Eigenschaftsgerichtete Umformprozesse“.

---

## Literaturverzeichnis

- [Al16] Allwood, J. M. et al.: Closed-loop control of product properties in metal forming. *CIRP Annals* 2/65, S. 573–596, 2016.
- [An09] Angermann, A. et al.: *MATLAB - Simulink - Stateflow. Grundlagen, Toolboxen, Beispiele*. Oldenbourg, München, 2009.
- [Di92] Dierig, H.: *CNC-Drücken mit adaptiver Regelung*. Zugl.: Dortmund, Univ., Diss. VDI-Verl., Düsseldorf, 1992.
- [En17] Endelt, B.: Design strategy for optimal iterative learning control applied on a deep drawing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 1-4/88, S. 3–18, 2017.
- [ETD13] Endelt, B.; Tommerup, S.; Danckert, J.: A novel feedback control system – Controlling the material flow in deep drawing using distributed blank-holder force. *Journal of Materials Processing Technology* 1/213, S. 36–50, 2013.
- [FBL23] D. Fischer, J.; A. Bristow, D.; G. Landers, R.: Layer-to-layer norm-optimal control of incremental sheet forming with a data-driven model. *Manufacturing Letters* 35, S. 1196–1202, 2023.
- [Fi20] Fischer, P. et al.: On part-to-part feedback optimal control in deep drawing. *Journal of Manufacturing Processes* 50, S. 403–411, 2020.
- [Fö22] Föllinger, O. et al.: *Regelungstechnik. Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*. VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, 2022.
- [HD11] Hao, W.; Duncan, S. R.: Constrained model predictive control of an incremental sheet forming process. In (Sarangapani, J. Hrsg.): *2011 IEEE International Conference on Control Applications (CCA 2010)*. Denver, 28 - 30 September 2011. IEEE, Piscataway, S. 1288–1293, 2011.
- [Is22] Ismail, A. et al.: Control system design for a semi-finished product considering over- and underbending. *Engineering Proceedings* 1/26, 2022.
- [Ker22] Kersting, L. et al.: Innovative online measurement and modelling approach for property-controlled flow forming processes. *Key Engineering Materials* 926, S. 862–874, 2022.
- [Ke22a] Kersting, L. et al.: Echtzeitfähige Modellierung eines innovativen Drückwalzprozesses für die eigenschaftsgeregelte Herstellung gradierter Bauteile. In (Jumar, U.; Diedrich, C. Hrsg.): *Entwurf komplexer Automatisierungssysteme. Beschreibungsmittel, Methoden, Werkzeuge und Anwendungen*. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, 2022.
- [Ke23] Kersting, L. et al.: Echtzeitfähige Modellierung eines innovativen Drückwalzprozesses für die eigenschaftsgeregelte Bauteilfertigung. *at - Automatisierungstechnik* 1/71, S. 68–81, 2023.
- [Ke24] Kersting, L. et al.: Der eigenschaftsgeregelte Drückwalzprozess als neues mechatronisches System: Konzept und Modellierung. In (Bertram, T. et al. Hrsg.): *Mechatroniktagung 2024*. Technische Universität Dresden 14. und 15. März 2024, S. 47–52, 2024.

- 
- [La21] Lafarge, R. et al.: Data based model predictive control for ring rolling. *Production Engineering* 6/15, S. 821–831, 2021.
- [La24] Laue, R.: Entwicklung des selbstregelnden Drückwalzens. Dissertation, Chemnitz, 2024.
- [Lu16] Lu, H. et al.: Model predictive control of incremental sheet forming for geometric accuracy improvement. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 9-12/82, S. 1781–1794, 2016.
- [Lu20] Lunze, J.: *Regelungstechnik 2. Mehrgrößensystem, Digitale Regelungen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [PAD14] Polyblank, J. A.; Allwood, J. M.; Duncan, S. R.: Closed-loop control of product properties in metal forming: A review and prospectus. *Journal of Materials Processing Technology* 11/214, S. 2333–2348, 2014.
- [Ro24] Rozo Vasquez, J. et al.: Softsensor model of phase transformation during flow forming of metastable austenitic steel AISI 304L. In (Kusiak, J.; Rauch, Ł.; Regulski, K. Hrsg.): *Numerical Methods in Industrial Forming Processes. Numiform 2023*. Springer, Cham, 2024.
- [Ru93] Runge, M.: *Drücken und Drückwalzen. Umformtechnik, Werkstückgestaltung, Maschinen, Steuerungskonzepte*. Verl. Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 1993.
- [Sc21] Schulte, C. et al.: Model-based Control of the Strip Roughness in Cold Rolling. *IFAC-PapersOnLine* 11/54, S. 109–114, 2021.
- [Spi23] Spies, D. et al.: Conception of a multivariable product property control for punch-hole-rolling. In (Madej, L.; Sitko, M.; Perzyski, K. Hrsg.): *Material Forming. The 26<sup>th</sup> International ESAFORM Conference on Material Forming held in Krakow, Poland, April 19-21, 2023*. Materials Research Forum LLC, S. 2081–2090, 2023.
- [St24] Stebner, S. et al.: Monitoring the evolution of dimensional accuracy and product properties in property-controlled forming processes. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* 8, S. 100133, 2024.
- [TP23] Tricarico, L.; Palmieri, M. E.: Robust design of deep drawing process through in-line feedback control of the draw-in. *Applied Sciences* 3/13, 2023.
- [Wa23] Wang, C. et al.: Learning-based model predictive control for two-point incremental sheet forming. *Journal of Manufacturing Processes* 105, S. 187–198, 2023.