

**Raiser Innovationspreis**

## **Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reibschweißen**

Kurzerläuterung:

Verbesserung der erreichbaren Toleranzen für den Stauchweg und die Drehlage durch den Einsatz modellbasierter Regelungsmethoden.

Verfasser:

**Lotz, Marc**

**Löhe, Johannes**

Kontaktdaten:

Marc Lotz

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

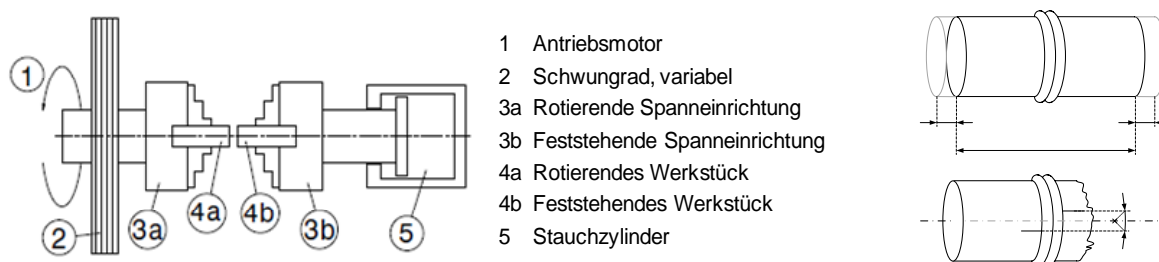
85748 Garching b. München

Tel.: 089/289-15480

marc.lotz@iwb.tum.de

## – Kurzbeschreibung –

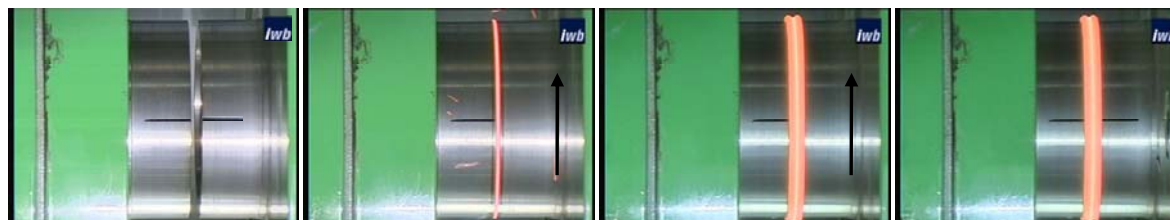
Das Schwungrad-Reibschweißen ist ein Pressschweißverfahren, bei dem die Fügepartner relativ zueinander in eine Drehbewegung versetzt und mit definierter Stauchkraft gegeneinander gepresst werden. Infolge der entstehenden Reibung kommt es zur Plastifizierung und schließlich zum Stoffschluss. Die Schweißenergie wird von einem rotierenden Schwungrad zur Verfügung gestellt, welchem infolge der Reibung fortwährend Energie entzogen wird, bis der Prozess selbstgeregelt zum Stillstand kommt (siehe Abbildung 1, links).



*Abbildung 1: Links: Prinzip des Reibschweißens nach DIN EN ISO 15620  
Rechts: Prinzipdarstellung von Stauchweg und Drehlage*

Da die einzig geregelte Größe während des Prozesses der Stauchdruck ist, sind die Verläufe von Stauchweg und Drehlage (siehe Abbildung 1, rechts), trotz gleicher Schweißbedingungen, einer großen Streuung innerhalb einer Fertigungscharge unterworfen. Dies hat zur Folge, dass im Anschluss an den Schweißvorgang aufwendige und kostenintensive Nacharbeit erforderlich ist. Um diese Zusatzkosten zu vermeiden und außerdem die Möglichkeit für ein drehwinkelgenaues Fügen zu ermöglichen, wurden Verfahren entwickelt, mit denen beide Größen innerhalb enger Toleranzen geführt werden können.

Den bisherigen Ansätzen ist gemeinsam, dass sie konventionelle Regelungsalgorithmen verwenden. Im Gegensatz dazu besteht der Ansatz dieser Arbeit darin, ein modellbasiertes, prädiktives Regelungsverfahren einzusetzen, um das nichtlineare Materialverhalten besser beherrschen zu können. Die Untersuchungen zeigen, dass die erreichbaren Fertigungsgenauigkeiten, verglichen mit den Ergebnissen bislang eingesetzter Regelungsmethoden, um ein Vielfaches verbessert werden. Die mit dieser Strategie erreichbaren Genauigkeiten liegen im Bereich von unter 0,005 mm für den Stauchweg und unter 0,5 ° für die Drehlage (siehe Abbildung 2). Damit wird es möglich, Fertigteile ohne Nacharbeit herzustellen.



Ausrichtung bzw. Initialisierung der Bauteile (hier: Aufbringen von Strichmarkierungen)

Start des Prozesses, wobei der Winkelversatz bei Bauteilkontakt erfasst wird

Kontinuierliche Regelung entsprechend der Sollkurve

Bei Prozessende muss die Regelabweichung innerhalb der Toleranz liegen (hier: Strichmarkierungen fluchten nach Stillstand)

*Abbildung 2: Bildausschnitte aus einer Filmaufnahme des Schwungrad-Reibschweißprozesses mit MPC-Drehlageregelung (siehe Video auf beigefügter CD)*

## – Langfassung –

### 1 Ausgangssituation

Das Schwungrad-Reibschweißen gehört, ebenso wie das kontinuierliche Reibschweißen, zur Gruppe der Pressschweißverfahren. Bei dieser Verfahrensart werden die Fügeteile relativ zueinander in eine Drehbewegung versetzt und mit definierter Stauchkraft gegeneinander gepresst, um so die Stoßflächen infolge der Reibung zu erwärmen. Beim Schwungrad-Reibschweißen wird die erforderliche Schweißenergie vor Prozessbeginn in einem rotierenden Schwungradmassenwerk gespeichert und anschließend dem Prozess zur Verfügung gestellt. Die Abbremsung der Drehung ist, infolge der stetigen Umwandlung der Schwungradmassenenergie in Reibungswärme, durch den Prozess selbst geregelt. Der Stoffschluss, der nach Beendigung der Drehbewegung ausgebildet ist, erfolgt durch die Plastifizierung und örtliche Verformung der Fügepartner und den dabei hervorgerufenen Diffusionsvorgängen (siehe Abbildung 1) (vgl. auch SCHOBER & APPEL ET AL. 2002, NEUMANN & SCHOBER 1991, MATTHES & RICHTER 2008).

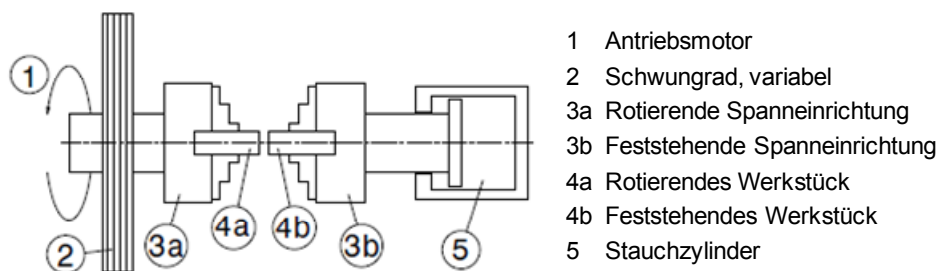


Abbildung 1: Prinzip des Reibschweißens nach DIN EN ISO 15620

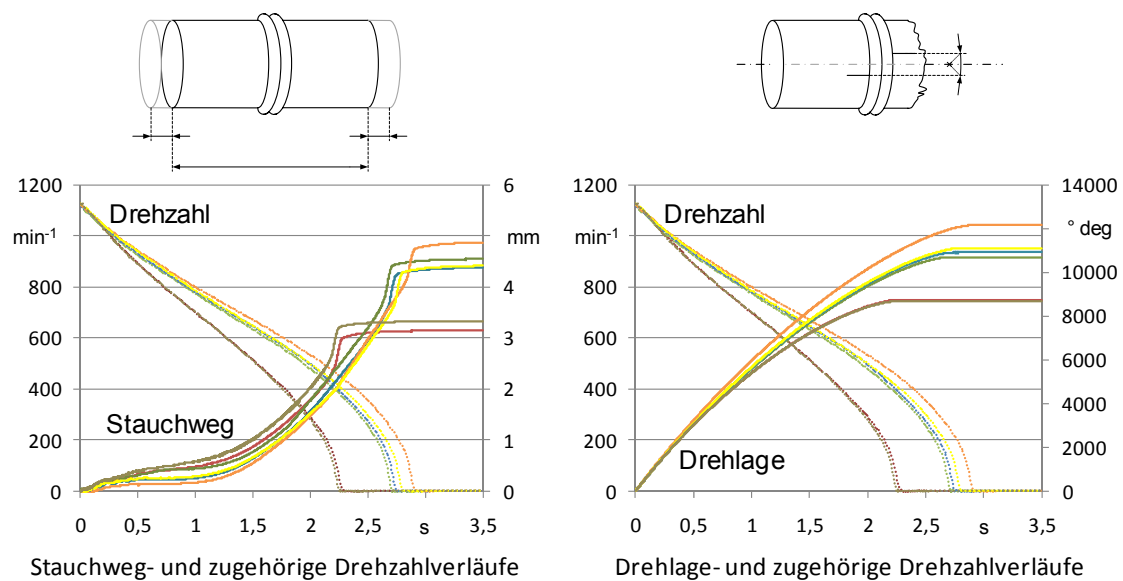
Das Verfahren zeichnet sich durch eine sehr hohe Schweißqualität, eine einfache Prozessführung sowie die Möglichkeit, unterschiedliche Werkstoffe miteinander zu verbinden, aus. Da die Energiebereitstellung durch ein Schwungrad erfolgt, kann dem Prozess, im Vergleich zu einem kontinuierlich antreibenden Motor, beliebig hohe Schweißenergie zur Verfügung gestellt werden, wodurch auch sehr große sowie warmfeste Bauteile gefügt werden können. Aufgrund dieser Vorzüge hat sich das Reibschweißen zu einer Schlüsseltechnologie in vielen Bereichen der Fertigungstechnik entwickelt. Hierzu gehören z. B. die Herstellung von Flugzeug-Triebwerkswellen, die Getriebefertigung sowie die Produktion von Antriebssträngen in der Automobil- und Nutzfahrzeugindustrie (GRÜNAUER 1987, NEUMANN & SCHOBER 1991).

Die Hauptschweißparameter für das Schwungrad-Reibschweißen sind (DIN EN ISO 15620, MEYER 1978):

- Anfangsdrehzahl der Spindel
- Schwungradmasse bzw. rotatorisches Massenträgheitsmoment
- Flächenbezogene Axialkraft

- Gegebenenfalls Stauchzeit und -kraft nach Beendigung der Relativbewegung zwischen den Fügepartnern

In der Praxis werden für die jeweilige Schweißaufgabe die erforderlichen Parameterwerte empirisch ermittelt und zu Prozessbeginn eingestellt. Da der ablaufende Prozess selbst geregelt ist, kann nach Prozessstart nur noch indirekt eingegriffen werden. Die herkömmliche Regelung hat die Aufgabe, lediglich die Stauchkraft auf einem konstanten Niveau zu halten. Der Nachteil dabei ist jedoch, dass es aufgrund der variierenden Materialeigenschaften sowie veränderlichen externen Prozesseinflüssen zu stark schwankenden Fertigungsmaßen von Stauchweg und Drehlage kommt (siehe Abbildung 2).

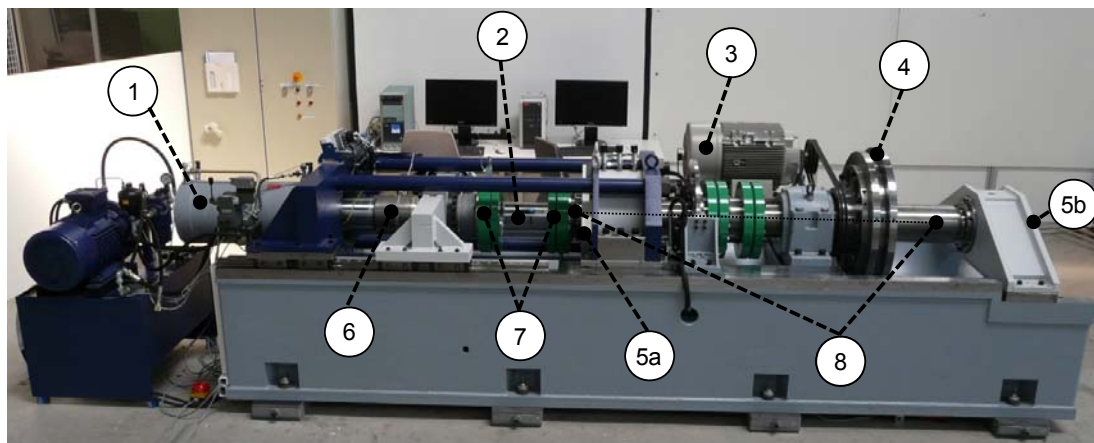


**Abbildung 2: Streuung von Stauchweg und Drehlage über mehrere Versuche mit herkömmlicher Druckregelung bei gleicher Schweißaufgabe und unter Verwendung identischer Schweißparameter**

Es gibt inzwischen Ansätze, durch eine geeignete Aktorik den Stauchweg und die Drehlage gezielt zu beeinflussen (SCHUTZRECHT US 7080770B2 2006, SCHUTZRECHT US 5858142 1999, SCHUTZRECHT DE 3226362 1984). Jedoch ist festzustellen, dass sich eine direkte Regelung dieser Größen aufgrund des stark nichtlinearen Prozessverhaltens trotzdem noch als äußerst schwierig erweist und weiterhin einer deutlichen Verbesserung bedarf. Typischerweise erfolgt deshalb bei Bauteilen, die hinsichtlich ihrer Länge im gefügten Zustand eng toleriert sind, nach dem Schweißprozess oftmals eine spanende Nachbearbeitung, um das geforderte Gesamtmaß der gefügten Bauteile sicherzustellen. Da dieser zusätzliche Bearbeitungsschritt die Herstellkosten erhöht und zudem für hoch komplexe Bauteilgeometrien nur mit hohem Aufwand oder ggf. gar nicht möglich ist, besteht die Forderung nach einer signifikanten Verbesserung der erreichbaren Fertigungsgenauigkeiten, sodass bereits nach dem Schweißvorgang Fertigteile vorliegen. Ein bedeutendes Beispiel hierfür ist die Fertigung von

Flugzeugtriebwerken. Mit Hilfe des Schwungrad-Reibschweißens wird die Turbinenwelle aus einer Reihe einzelner Teilkomponenten aufgebaut. Der Trend nach gewichts- und leistungsoptimierten Triebwerken führt zu einer immer komplexer werdenden Integralbauweise. Da sich nachträgliche Bearbeitungen zur Sicherstellung des Endmaßes an derartigen Strukturen als kostenintensiv oder teilweise sogar als unmöglich erweisen, muss eine Pressschweißung innerhalb sehr enger Stauchwegtoleranzen möglich werden.

Des Weiteren besteht die Forderung, auch die Winkellage zwischen den Bauteilen prozesssicher zu beherrschen. Hintergrund hierfür ist ebenfalls der Bedarf, Fertigteile zu verschweißen. Jedoch konnte sich eine Regelung der Winkellage für das Schwungradreibschweißen in der industriellen Anwendung bislang noch nicht etablieren. Um diesem beschriebenen Handlungsbedarf gerecht zu werden, ist das von der Bayerischen Forschungsstiftung geförderte Projekt „Geregeltes Schwungradreibschweißen“ gemeinsam mit der Firma MTU Aero Engines GmbH initiiert worden. Das Ziel dieses Vorhabens bestand in einer signifikanten Verbesserung der erreichbaren Fertigungsgenauigkeiten beim Schwungrad-Reibschweißen. Um die hierfür erforderlichen Experimente zur Prozessidentifikation und zur Validierung der Regelungsstrategie durchführen zu können, wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts am *iwb* – von einem Team bestehend aus zwei wissenschaftlichen Mitarbeitern und mehreren studentischen Hilfskräften sowie der Unterstützung durch die mechanische und elektrische Werkstatt – ein Schwungrad-Reibschweißprüfstand konstruiert, aufgebaut und in Betrieb genommen (siehe Abbildung 3).



1	Druckzylinder (max. Stauchkraft 800 kN)	5	Winkelmessgerät (a) und Drehgeber (b)
2	Längenmessgerät (Stauchweg)	6	Stauchkraft und Prozessmoment (DMS)
3	Externer Motor	7	Bauteilspannung
4	Schwungradmassenwerk (max. Trägheitsmasse 130 kgm <sup>2</sup> )	8	Spindelsystem (max. Drehzahl 1500 min <sup>-1</sup> ; max. Prozessmoment 80 kNm)

Abbildung 3: Aufbau der *iwb*-Reibschweißmaschine

Da sich die Regelung des Prozesses aufgrund des stark nichtlinearen Systemverhaltens als komplexe Aufgabe darstellt, empfiehlt sich zunächst der

Aufbau eines Simulationsmodells. Anhand dieses Modells erfolgen eine Analyse des Systemverhaltens und anschließend die Reglerauslegung. Hiernach kann der Regler auf der realen Anlage implementiert und optimiert werden. Eine simulationsgestützte Reglerauslegung erlaubt es, die Anzahl der Einfahrversuche zu reduzieren und damit Kosten einzusparen. Darüber hinaus kann so die Anlagensicherheit bei der Inbetriebnahme erhöht werden.

## **2 Modellierung der Regelstrecke**

### **2.1 Modellbasierte Reglerauslegung**

Um die physikalischen Vorgänge detailliert abbilden zu können, bedarf es eines analytischen Modells. Insbesondere zur präzisen Beschreibung des Werkstoffverhaltens während des Schweißprozesses, wird in den meisten Fällen auf die nichtlineare Finite-Elemente-Methode zurückgegriffen. Jedoch sind derartige Modelle komplex in ihrer Erstellung sowie zeitaufwendig in der Simulation. Hingegen bedarf es oftmals umfangreicher Parameterstudien, um eine geeignete Reglerkonfiguration zu finden. Erforderlich sind schnelle Aussagen über das Verhalten der Regelgrößen sowie die erreichbaren Fertigungstoleranzen. Als weitere Anforderung kommt hinzu, dass das Prozessmodell als Prädiktor in einem Regler eingesetzt werden soll, um so die bestmöglichen Stellgrößen zu berechnen. Da dieses Modell online eingesetzt wird, muss es in der Lage sein, das Systemverhalten innerhalb der kurzen Regelzykluszeit von wenigen Millisekunden zu berechnen. Aufgrund der genannten Anforderungen empfiehlt sich der Aufbau eines Verhaltensmodells bzw. Black-Box-Modells mit einem effizient zu berechnendem Übertragungsverhalten. Der Einsatz von Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) gewinnt dabei an immer größerer Bedeutung. Diese besitzen die Fähigkeit, nahezu jede beliebige nichtlineare Funktion mit ausreichend hoher Genauigkeit approximieren zu können. Des Weiteren haben sie ein hohes Abstraktionsvermögen, um so auch nicht explizit bekannte Prozessverläufe korrekt abzubilden. Deshalb soll das Verhalten dieses Gesamtsystems mit Hilfe eines KNN beschrieben werden.

### **2.2 Prozessanalyse und -beschreibung**

Bei dem Schwungrad-Reibschweißprozess wird eines der Bauteile auf der drehbar gelagerten Antriebswelle montiert, die durch ein Schwungrad angetrieben ist. Diese Spindel wird vor Prozessbeginn durch einen externen Motor auf eine definierte Drehzahl beschleunigt, der nach Erreichen der erforderlichen Drehzahl ausgeschaltet wird. Das drehstarr eingespannte Gegenstück wird mit definierter Stauchkraft auf das drehende Bauteil gepresst. Aufgrund der hierbei entstehenden Reibungswärme und der vorliegenden Materialspannungen plastifizieren die Werkstoffe in der Fügezone und es setzt ein Stauchen der Bauteile ein. Die stetige Umwandlung der Rotationsenergie in Reibleistung führt zum Abbremsen der Drehbewegung. Sobald die Restenergie des Schwunghmassenwerkes nicht mehr ausreicht, um die in der Schweißzone wirkenden Reibungskräfte zu überwinden, kommt der Prozess zum

Stillstand. Abbildung 4 verdeutlicht den beschriebenen Prozess anhand des Verlaufs der wichtigsten Schweißparameter.

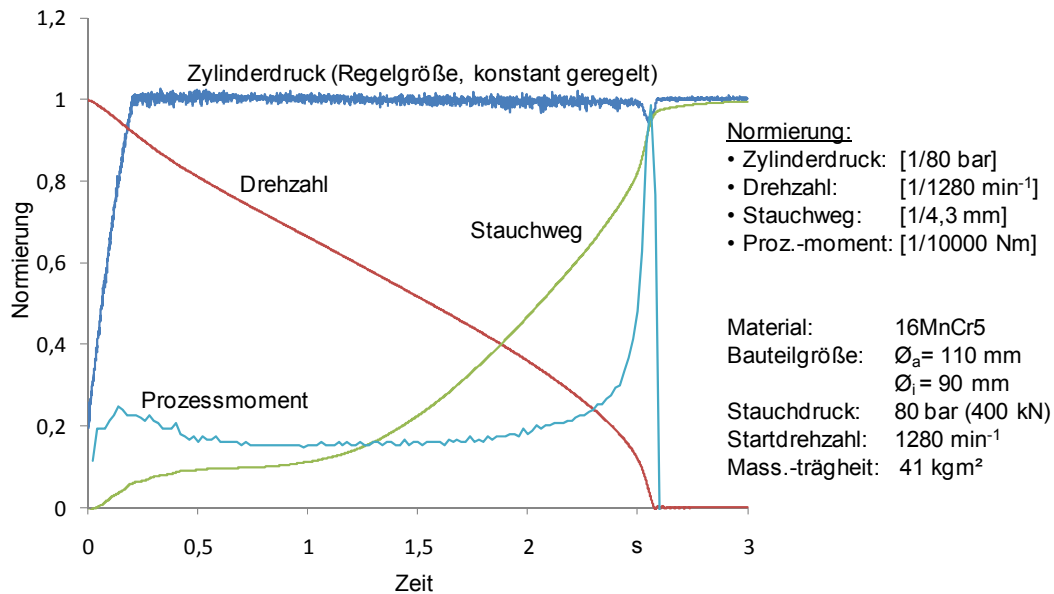


Abbildung 4: Verlauf der charakteristischen Schweißparameter (normiert)

Bevor mit dem Aufbau eines KNN zur Abbildung des beschriebenen Prozessverhaltens begonnen werden kann, ist zunächst eine exakte Beschreibung des Ein- und Ausgangsverhalten des Systems vorzunehmen. Abbildung 5 zeigt die Systemgrenzen mit den zugehörigen Ein- und Ausgängen.

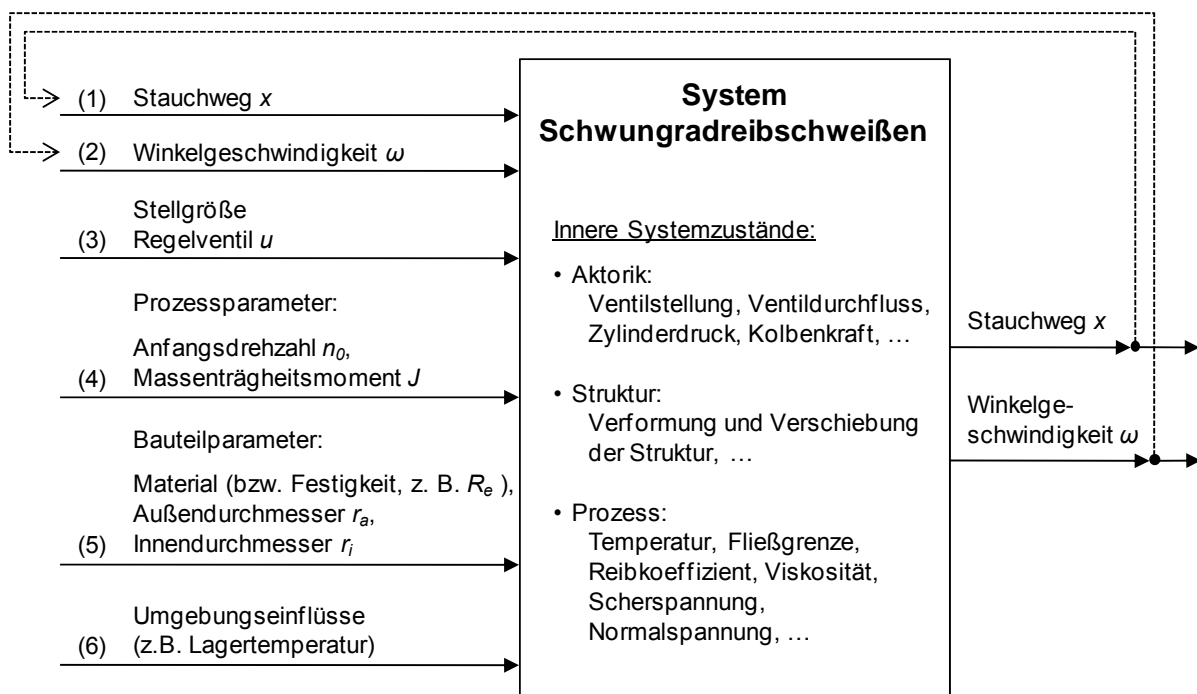


Abbildung 5: Ein- und Ausgangsgrößen des Reibschweißprozesses

Die aus regelungstechnischer Sicht relevanten Prozessgrößen sind der Stauchweg  $x$  und die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ . Diese werden als Systemausgang definiert, weil es das Ziel der Prozessregelung ist, diese Parameter in den vorgegebenen

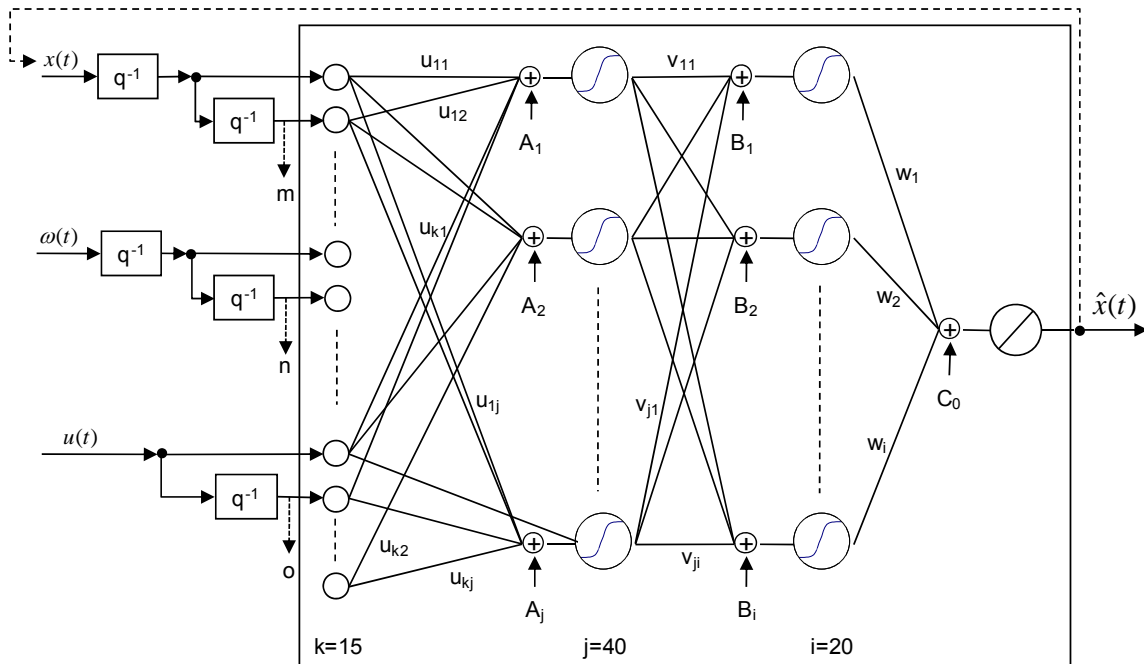
Toleranzbereichen zu halten. Da zukünftige Systemzustände sowohl von den aktuellen als auch vergangenen Werten dieser beiden Systemausgänge abhängen, wirken diese wiederum als Systemeingänge (1) und (2). Die einzige Größe, die aktiv auf den Prozess einwirkt, ist die Stellgröße  $u$  (3). Dieses Signal steuert die Kolbenbewegung des Regelventils und beeinflusst damit Stauchkraft und Stauchbewegung. Bei den Eingangsgrößen (4) und (5) handelt es sich um Randbedingungen, die durch die jeweilige Fertigungsaufgabe bestimmt werden. Da diese konstant auf das Prozessgeschehen einwirken, können sie auch implizit im Modell berücksichtigt werden, sodass diese im Folgenden nicht weiter als Eingang betrachtet werden. Das Modell ist in diesem Fall nur für die zuvor festgelegten Randbedingungen gültig. Auch die Umgebungseinflüsse (6) bleiben bei der Modellbildung vernachlässigt. Indem, soweit möglich, ähnliche Versuchsbedingungen sicher gestellt werden, können die hieraus resultierenden Modellfehler reduziert werden. Die Kenntnis der innerhalb des Systems auftretenden physikalischen Wirkprinzipien und der daraus resultierenden Zustandsgrößen ist für die Modellbildung durch ein KNN nicht zwingend erforderlich, jedoch bei der Analyse und Bewertung der Simulationsergebnisse durchaus von Vorteil.

## 2.3 Aufbau des Prozessmodells mit Hilfe eines Künstlichen Neuronalen Netzes

Die kleinste strukturelle Einheit eines KNN ist das sogenannte Neuron. Es führt eine festgelegte mathematische Operation mit den ankommenden Informationswerten durch. Infolge einer gerichteten und gewichteten Verknüpfung mehrerer Neuronen entsteht ein neuronales Netz. Die Verwendung einheitlicher Neuronen und die Strukturierung des Netzes erlaubt eine einfache mathematische Beschreibung.

Zur Abbildung des Reibschweißprozesses wird auf ein sogenanntes MLP-Netz (Multi-Layer-Perceptron) zurückgegriffen. Die prinzipielle Netzstruktur zur Berechnung des Stauchwegs ist in Abbildung 6 gezeigt. Der Stauchweg- und der Drehzahlverlauf werden durch ein jeweils separates KNN beschrieben. Da sich beide Netze in ihrem prinzipiellen Aufbau ähneln, wird im Folgenden lediglich die Modellstruktur zur Simulation des Stauchwegs detailliert beschrieben. Das KNN besteht aus der Eingangsschicht, zwei verdeckten Schichten sowie der Ausgangsschicht. Die Eingänge des KNN sind die Stellgröße  $u$ , der Stauchweg  $x$  und die Drehzahl  $\omega$ , wobei die beiden zuletzt genannten Größen vom Modellausgang zurück geführt werden. Da das Verhalten eines dynamischen Systems nicht nur durch die zum aktuellen Zeitpunkt  $t$  vorliegenden Eingangswerte bestimmt wird, sondern außerdem von den vergangenen Verläufen abhängt, sind auch die zurückliegenden Werte durch das Modell zu berücksichtigen. Deshalb wird der zeitdiskrete Verschiebungsvektor  $q^{-1}$  eingeführt, durch den das anliegende Signal um einen Zeitschritt verzögert wird. Da das reale System mit einer Frequenz von 1000 Hz abgetastet und geregelt wird, entspricht die Zeitverzögerung dem Wert 1 ms. Die Anzahl der berücksichtigten Vergangenheitswerte bestimmt die Ordnung des Systems.





Um m, n und o Zeitschritte verzögerte Eingangswerte, wobei  $k = m + n + o$

Zwei Schichten mit Tangens-Hyperbolicus-Übertragungsfunktion (1. Schicht:  $j = 40$  Neuronen; 2. Schicht:  $i = 20$  Neuronen) und einem linearen Ausgangsneuron.

Abbildung 6: Struktur des KNN am Beispiel des Stauchwegs

Die Prädiktionsgröße stellt sich somit als eine Funktion  $g$  der Eingangsgrößen, die in dem Regressor  $\varphi_k(t)$  zusammengefasst werden, sowie der Netzparameter  $\Theta$  dar. Es gilt:

$$\hat{x}(t) = g[\varphi(t), \Theta]$$

$$\varphi_k(t) = [x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-m), \omega(t-1), \omega(t-2), \dots, \omega(t-n), u(t), u(t-1), \dots, u(t-o)]$$

$$\Theta = [u_{kj}, v_{ji}, w_i, A_j, B_i, C_0]$$

Bei der Modellerstellung ist der Regressor, die Anzahl und die Anordnung der Neuronen sowie der Typ der Übertragungsfunktion zu definieren. Da für diese Festlegung keine allgemeingültigen Kriterien existieren, ist bei der Modellbildung entweder auf Erfahrungswerte zurückzugreifen oder es muss auf Grundlage eines iterativen Vorgehens eine geeignete Netzstruktur gefunden werden. In Abbildung 6 sind geeignete Netzdefinitionen zur Modellierung des Stauchwegverlaufs gezeigt. Die zwischen den Neuronen wirkenden Gewichtungen und Offset-Werte werden durch den verwendeten Trainingsalgorithmus bestimmt. Für den gezeigten Fall der Stauchwegmodellierung ergibt sich der Systemausgang zu:

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=1}^{20} \left[ w_i \cdot \tanh \left( \sum_{j=1}^{40} v_{ji} \cdot \tanh \left( \sum_{k=1}^{15} u_{kj} \varphi_k(t) + A_j \right) + B_i \right) \right] + C_0$$

Nachdem das KNN aufgebaut und mit vorhandenen Versuchsdaten trainiert wurde, ist im Rahmen einer Validierung nachzuweisen, inwieweit das KNN das

Prozessverhalten korrekt abbildet. Ein wichtiges Kriterium ist dabei die Approximationsfähigkeit für Eingangsverläufe, die keine Trainingsdatensätze waren.

Abbildung 7 zeigt den Vergleich zwischen einem gemessenem und dem zugehörigem simulierten Verlauf des Stauchwegs. Die maximale Abweichung der Simulationsergebnisse vom realen Messwert beträgt  $x_{Fehler,max} = 0,15 \text{ mm}$ .

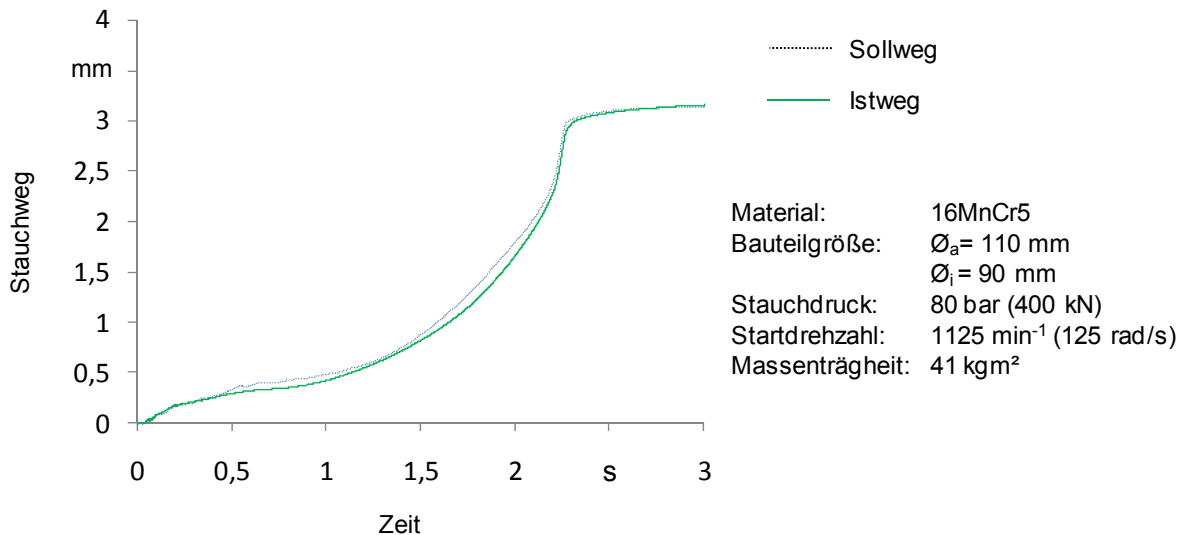


Abbildung 7: Simulationsergebnisse für die Berechnung des Stauchwegs durch das KNN

## 3 Regelung des Prozesses

### 3.1 Regelung des Stauchwegs

#### 3.1.1 Ansätze mit konventionellen Regelungsalgorithmen

Wie bereits ausgeführt, führt die konventionelle Stauchkraftregelung zu einer hohen Streuung des Stauchwegs. Für Anwendungen bei denen harte Anforderungen an die Bauteillänge im gefügten Zustand bestehen, sind entweder nachfolgende Fertigungsschritte für eine Längenkorrektur nötig oder dieses Verfahren kann für bestimmte Anwendungen gar nicht eingesetzt werden. Deshalb soll durch eine direkte Regelung des Stauchwegs die Fertigungsgenauigkeit gesteigert werden. Es wird zunächst untersucht, inwieweit konventionelle Regelungsmethoden (PID-Regler), wie sie bereits vorgeschlagenen Ansätzen zum Einsatz kommen, hierfür geeignet sind.

Anhand von vorab durchgeführten Referenzversuchen ist ein geeigneter Soll-Stauchweg festzulegen, der während des Prozesses als Trajektorie vorgegeben wird. Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, den Prozess mit einer Stauchdruckregelung zu starten und nach der Einreibphase auf die Stauchwegregelung umzuschalten. Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse dieser Methode. Die PI-Reglerparameter wurden auf Grundlage einer vorab durchgeführten Simulationsstudie eingestellt. Erste

Untersuchungen zeigen, dass mit diesem Verfahren Stauchweggenauigkeiten im Bereich von 0,2 mm erzielt werden können.

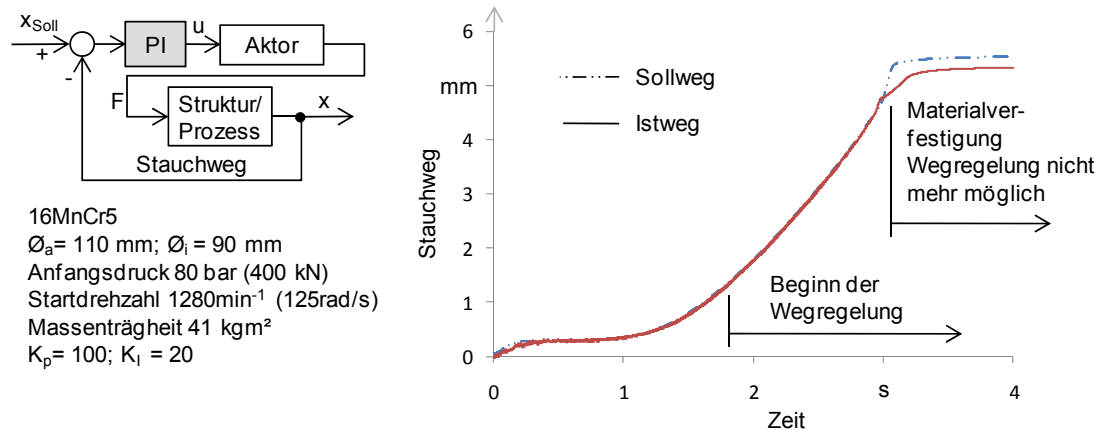


Abbildung 8: Regelung des Stauchwegs mit einem PI-Regler

Für viele Anwendungen sind die erforderlichen Bauteiltoleranzen deutlich geringer, als sie mit der beschriebenen PI-Stauchwegregelung erreicht werden können, sodass entweder weiterhin nachfolgende Fertigungsschritte für eine Längenkorrektur nötig sind oder dieses Verfahren für bestimmte Anwendungen gar nicht eingesetzt werden kann.

### 3.1.2 Regler mit modellbasierter Vorsteuerung

Aufbauend auf der beschriebenen PI-Regelung wird deshalb untersucht, inwieweit eine Vorsteuerung die Stauchweggenauigkeit weiter steigern kann. Da der Prozess schnellen Arbeitspunktwechseln unterliegt, wurden die möglichen Vorzüge eines inversen Streckenmodells zur Berechnung einer Vorsteuerung analysiert. Die Regelstrecke besteht aus den Subsystemen Aktorik sowie Struktur und Prozess. Eingang dieser Strecke ist die Stellgröße  $u$ . Sie entspricht der Soll-Stellung des Ventilkolbens. Ausgang des Gesamtsystems ist der Stauchweg. Das invertierte Modell gibt den umgekehrten Zusammenhang wieder. Es berechnet die erforderliche Stellgröße  $u$  zur Erreichung des Sollwegs  $x_{Soll}$ . Für den Fall einer absolut genauen Approximation des Prozessverhaltens durch das invertierte Modell folgt der Systemausgang exakt der Führungsgröße. Da jedoch Störgrößen und Modellungenauigkeiten zu Abweichungen führen, ist ein PI-Regler implementiert, um diese Regelabweichungen zu kompensieren.

Als Prozessmodell kommt ein Künstliches Neuronales Netz (KNN) zum Einsatz. Diese Modellform hat den Vorteil, dass der zukünftige Wert der Steuergröße online innerhalb einer Millisekunde berechnet werden kann. Das Vorgehen zur Erstellung des Netzes gleicht dem zuvor erläuterten Vorgehen. Der Unterschied besteht darin, dass die Stauchwegmessungen als Input und die Stellgröße des Ventils als Output gewählt wurden, um so das inverse Systemverhalten abzubilden. Abbildung 9 zeigt die Struktur des untersuchten Regelkreises. Die an das Ventil gegebene Stellgröße

$u$  setzt sich aus dem Feed-Forwardanteil  $u_{ff}$  des KNN sowie dem Feedbackanteil  $u_{fb}$  des PID-Reglers zusammen.

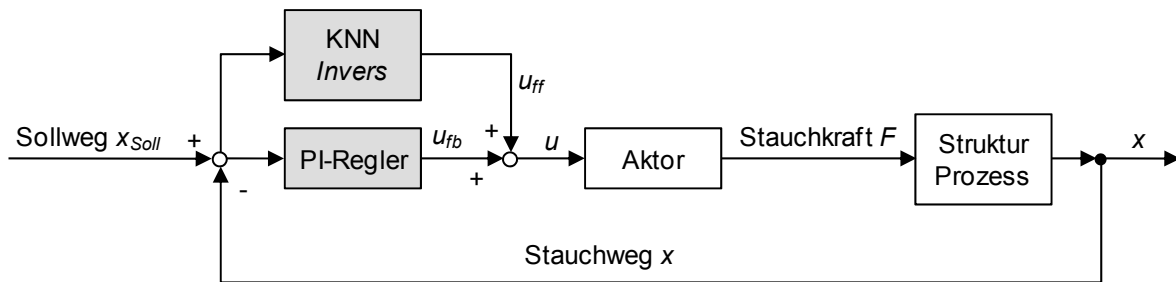


Abbildung 9: Blockschaltbild des Feed-Forward-Regelkreises

Anhand von vorab durchgeführten Referenzversuchen wurde ein geeigneter Soll-Stauchweg festgelegt, der während des Prozesses als Trajektorie vorgegeben wird. Aus dem in Abbildung 10 gezeigten Versuchsergebnis wird ersichtlich, dass die beobachtete Stauchwegabweichung unter 0,02 mm liegt. Vergleicht man diese Ergebnisse mit einer konventionellen PI-Regelung, so zeigt sich, dass sich unter gleichen Versuchsbedingungen die Fertigungsgenauigkeiten durch den Einsatz eines KNN signifikant steigern lassen.

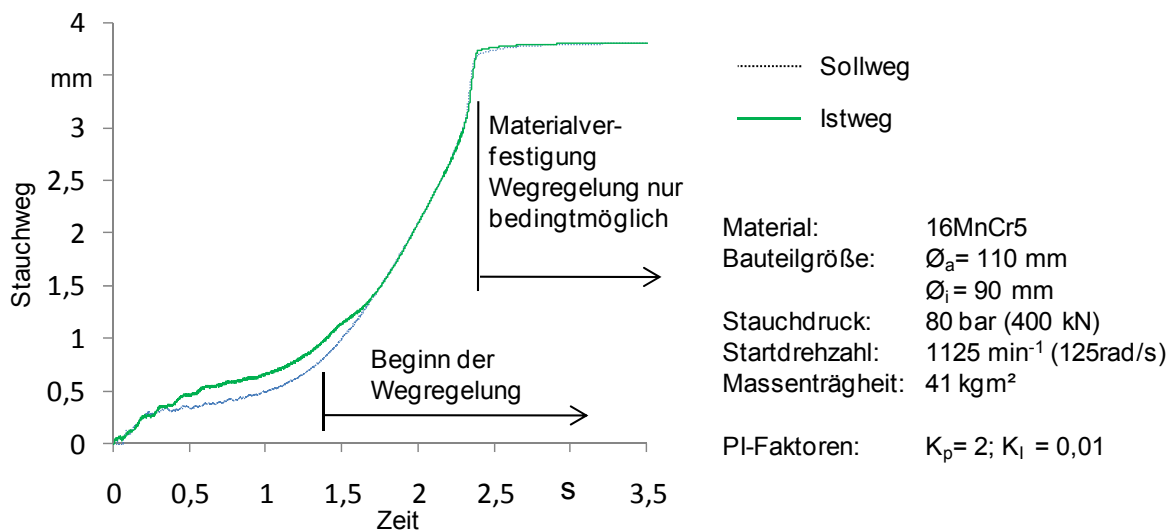


Abbildung 10: Ergebnisse der Feed-Forward-Regelung

### 3.1.3 Entwicklung eines Modellbasierten Prädiktiven Reglers

Der Ansatz, dem Regler ein Modell zu hinterlegen, hat sich als eine leistungsstarke Möglichkeit erwiesen, um die schnellen Arbeitspunktwechsel möglichst gut folgen zu können. Deshalb ist es die logische Konsequenz, den Einsatz rein auf Modellen basierender Regler zu erproben. Ein Solcher ist der sogenannte Modellbasierte Prädiktive Regler (MPC), welcher auf Basis seiner Modellkenntnis zukünftige Stellgrößen ermittelt, um einer vorgegebenen Trajektorie zu folgen. Dieser Regler birgt im Gegensatz zu der vorher beschriebenen Methode den Vorteil, dass er vorausschauend arbeitet. Während die konventionelle Regelung erst auf eine vorliegende Abweichung reagieren kann, werden hier mögliche zukünftige

Abweichungen durch die Prädiktion erkannt und so bereits behoben, bevor sie auftreten können. Die konventionelle Regelung führt so in manchen Fällen zu gewaltigen Sprüngen der Stellgröße. Dagegen verteilt die MPC-Regelung die Stellgröße über den gesamten Prozess gleichmäßig. Diese Sprünge können deshalb vermieden und die Aktorik geschont werden. Neben diesem Vorteil bewegt sich die Stellgröße in einem schmäleren Korridor, weshalb der Aktor in manchen Fällen geringer dimensioniert werden kann.

Als Grundlage dienen dem Regler mehrere Zustandsraummodelle, welche die einzelnen Phasen des Stauchprozesses abbilden können. Auch hier wurden sogenannte „Black-Box“ Modelle, die anhand aufgezeichneter Versuchsdaten validiert wurden, zu Grunde gelegt.

Neben den Modellen benötigt die MPC Regelung eine Kostenfunktion. Hiermit wird eine Funktion betitelt, die die Differenzen zwischen der prädizierten Stellgröße und deren Referenz quadriert und über die Zeit des Prozesses aufsummiert. Ziel der MPC-Regelung ist es dann, diese Kostenfunktion, auch Fehlersumme genannt, zu minimieren. Die Kostenfunktion ist in Gleichung (1) dargestellt, wobei mit  $y_{k+i...N}$  der prädizierte Stauchweg, mit  $y_{k+i...N}^r$  die Referenztrajektorie und mit  $u_{k+i}$  die Stellgröße bezeichnet sind. Die Variable  $R$  stellt eine Gewichtung der Stellgröße in der Kostenfunktion dar und muss vom Anwender so gewählt werden, dass unter Berücksichtigung der absoluten Werte von Stellgröße und des Stauchwegs letzterer immer höher gewichtet wird.

$$J = \sum_{i=0}^N (y_{k+i} - y_{k+i}^r)^2 + R \cdot u_{k+i}^2 \quad (1)$$

Aus der Kostenfunktion und den hinterlegten Modellen wird durch eine Minimierung (geringste Fehlersumme) das Gesetz für die optimale Stellgröße (Formel (2)) hergeleitet. Die Matrix  $K_k$  und der Vektor  $l_k$  können hierbei offline vor Prozessstart aus den Modellen, der Führungsgröße und der Minimierung der Kostenfunktion berechnet werden. Der Vektor  $x_k$  beinhaltet die Zustände eines Zustandsraummodells.

$$u_k = K_k \cdot x_k + l_k \quad (2)$$

Die Struktur dieses Regelkreises ist in Abbildung 11 dargestellt. Hier bezeichnet der Vektor  $x$  den Zustand des Schweißprozesses. Dieser setzt sich aus dem aktuellen und einigen vergangenen Werten der Stellgröße  $u$ , sowie des gemessenen Stauchwegs  $y$  zusammen. Letzterer wird aus der elastischen und der plastischen Verformung ( $y_{elas}$ ,  $y_{plas}$ ) an der Schweißnaht sowie der elastischen Verformung der Maschinenstruktur  $y_{Maschine}$ , die durch die Stauchkraft  $F_{St}$  verursacht werden gebildet.

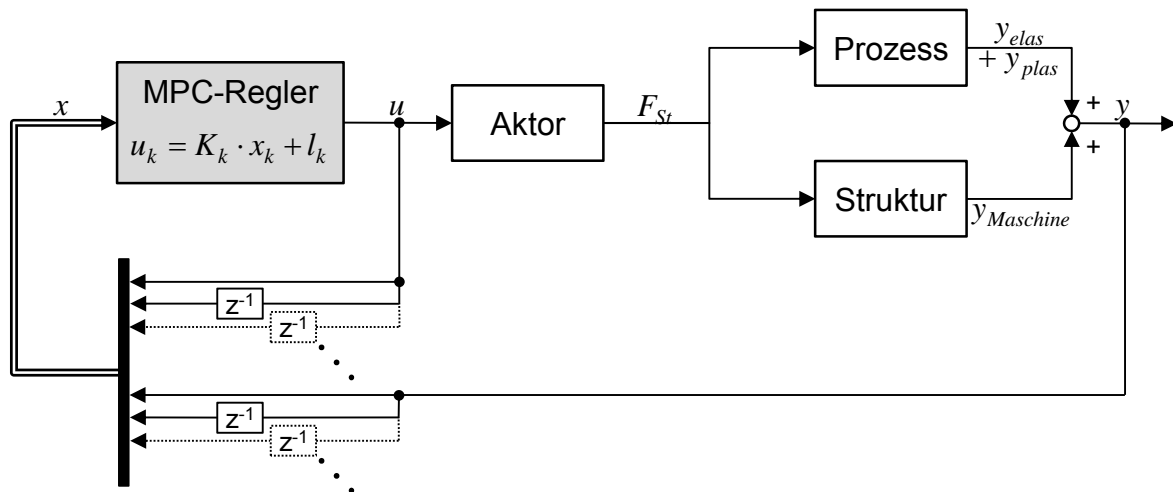


Abbildung 11: Blockschaltbild der MPC-Stauchwegregelung

Abbildung 12 zeigt, dass durch den Einsatz der Modellbasierten Prädiktiven Regelung eine weitere Steigerung der Fertigungsgenauigkeit erzielt werden konnte. Mit diesem Verfahren ist es möglich, Stauchwegabweichungen unter 0,005 mm zu erzielen und damit für die meisten Fälle eine Nachbearbeitung einzusparen.

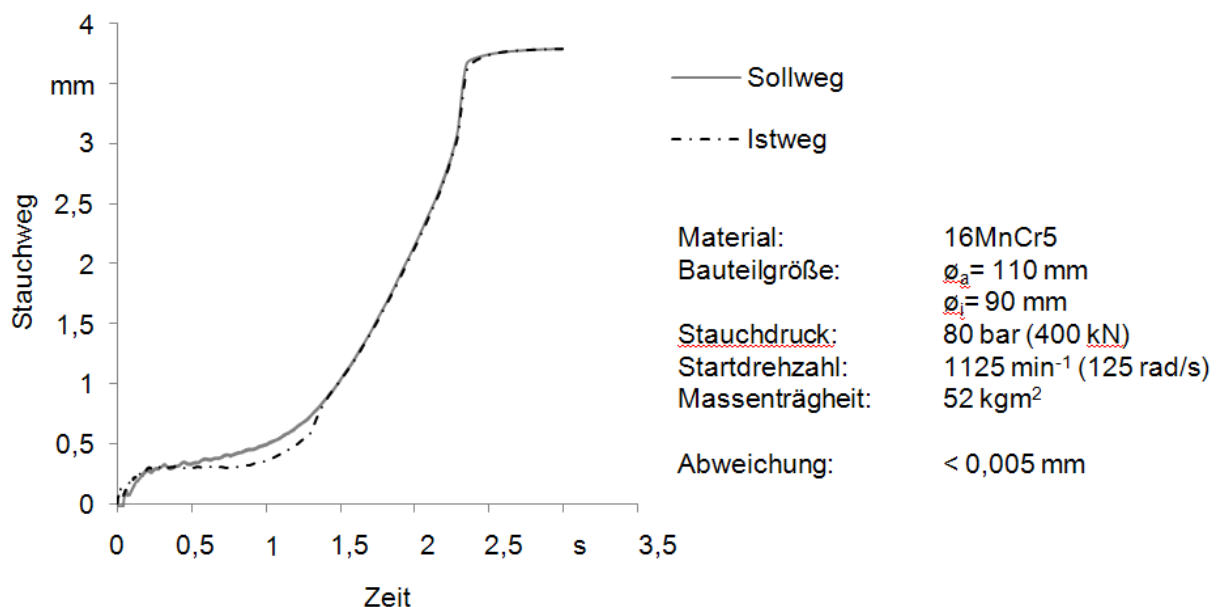


Abbildung 12: Ergebnis bei Modellbasierter Prädiktiver Regelung des Stauchwegs

## 3.2 Regelung der Drehlage

### 3.2.1 Grenzen konventioneller Ansätze

Da sowohl Materialparameter als auch Umgebungseinflüsse, wie z. B. Öltemperatur und somit Lagerreibung, gewissen Streuungen unterliegen, variieren die Prozesszeit sowie der Drehzahl- und der Drehlageverlauf mit jeder Schweißung. Dem Schwungradprozess steht im Gegensatz zum kontinuierlichen Reibschweißen verfahrensbedingt kein Motor zur Verfügung, der je nach Streurichtung Antriebs- oder Bremsmoment einleiten könnte, um die Drehzahl bzw. Drehlage an einer

Sollkurve entlang zu führen. Deshalb sieht das Konzept vor, die Spindel mit einer im Vergleich zu den Standardwerten erhöhten Schwungmasse zu rüsten. Dies würde zu einer verlängerten Schweißzeit und damit erhöhtem Drehlageverlauf führen. Durch das gezielte Einleiten von Bremsmomenten wird der Energieüberschuss so kompensiert, dass der Drehlageverlauf auf eine Sollkurve, die aus einem zuvor durchgeführten Referenzversuch mit Standardschweißparametern bestimmt wurde, herunter geregelt werden kann. Die einfachste Reglerstruktur zur Führung der Drehlage ist in Abbildung 13 gezeigt. Des Weiteren sind das Simulationsergebnis der Drehlage und der Drehzahl sowie ein Ausschnitt aus der durchgeführten Parameterstudie zur Auslegung des Reglers zu sehen. Mit angegeben sind die untersuchten Proportional- und Integralfaktoren KP und KI des PI-Reglers. Da im linken Diagramm in der dargestellten Auflösung kein Unterschied zwischen Soll- und Ist-Lage erkennbar ist, sind im rechten Diagramm deren Abweichungen voneinander gezeigt.

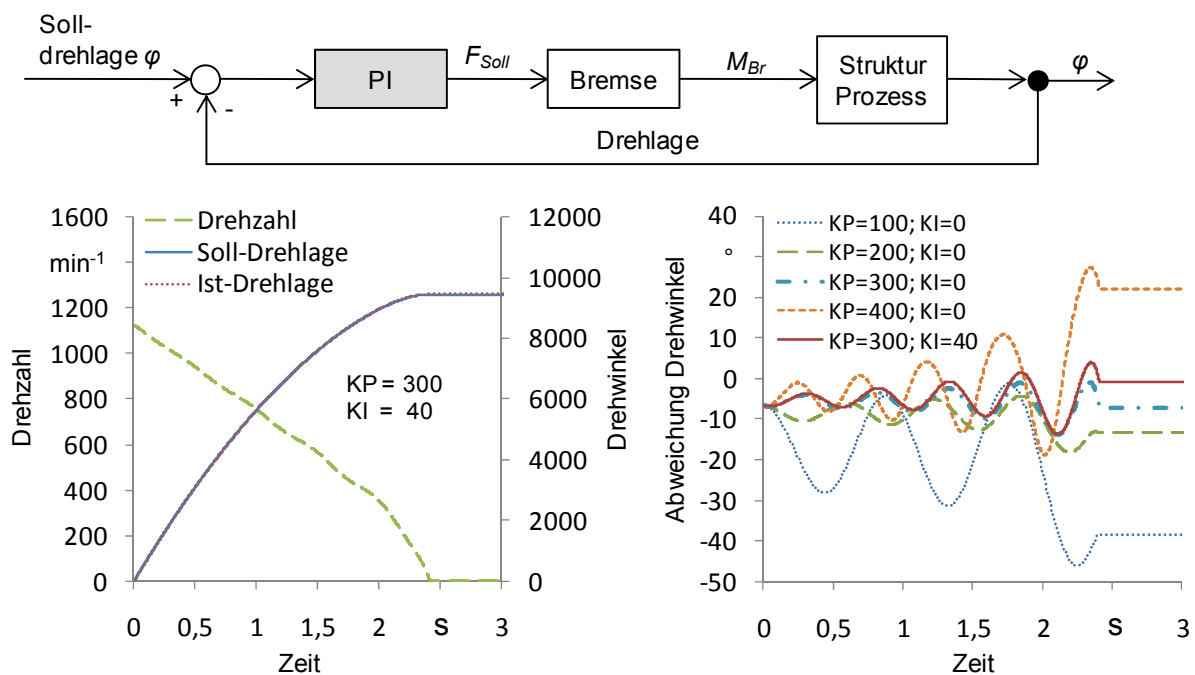


Abbildung 13: Blockschaltbild und Simulationsergebnisse einer konventionellen PI-Regelung der Drehlage

Es zeigt sich, dass eine konventionelle PI-Regelung nicht geeignet ist, die endgültige Drehlage in engen Toleranzen zu führen. Es konnten keine Parametereinstellungen gefunden werden, die eine stabile und enge Führung, insbesondere zum Prozessende, um die Sollkurve herum ermöglichen. Dies konnte ebenso im Versuch beobachtet werden. Die hier auftretenden Abweichungen lagen im Bereich von 40 Winkelgrad. Die Hauptgründe dafür liegen in dem schnellen Prozessverlauf sowie den in der Strecke auftretenden Totzeiten und Verzögerungen. Selbst eine Umdrehung vor Prozessende legt die Spindel noch pro Regelzyklus, der eine Millisekunde beträgt, ca. 2 Winkelgrad zurück. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Solldrehlage eine exponentiell abfallende Bremsbeschleunigung bedingt.

Dies wiederum verlangt ein zum Prozessende hin exponentiell ansteigendes Bremsmoment. Der konventionelle PI-Regler ist nicht in der Lage, diesem sich schnell ändernden Arbeitspunkt zu folgen. Die Simulationen zeigen, dass es selbst durch den Einsatz schnellerer Aktorik, wie z.B. kontinuierlich antreibender Motoren, nicht möglich wird, sehr enge Drehlagetoleranzen ( $< 0,5^\circ \dots 1^\circ$ ) prozesssicher einzuhalten. Deshalb verfolgen die Ansätze dieser Arbeit den Einsatz modellbasierter Regler, die aufgrund ihrer Prädiktionsfähigkeit des zukünftigen Prozessverlaufs im Voraus optimale Stellgrößen berechnen können.

### 3.2.2 Potenziale einer kaskadierten Regelung mit modellbasierter Vorsteuerung

Zunächst soll die Kombination einer Kaskadensteuerung mit einer modellbasierten Vorsteuerung untersucht werden (siehe

Abbildung 14).

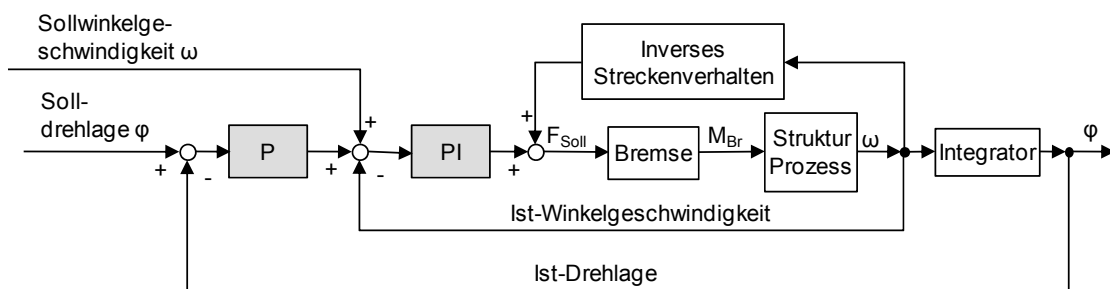


Abbildung 14: Blockschaltbild einer Kaskaden-Regelung der Drehlage

Die Berechnung der Vorsteuerung erfolgt mit Hilfe eines invertierten Modells der Regelstrecke. Das invertierte Streckenverhalten kann auch hier, analog zu dem in Kapitel 3.1.2 beschriebenem Vorgehen, mit einem KNN abgebildet werden. Die Aufgabe des Streckenmodells ist die Prädiktion des Prozessmomentenverlaufs. Dementsprechend ergibt sich das von der Bremse auszuübende Zusatzmoment, um der Soll-Drehlage zu folgen. Des Weiteren muss das Modell die Tot- und Verzögerungszeit der Aktorik berücksichtigt werden. Die Vorsteuerung hat das Ziel, aufgrund der Prozesskenntnis bereits im Voraus die erforderlichen Stellgrößen auszugeben. Damit können die Unzulänglichkeiten des lediglich „reagierenden“ PID-Reglers vermieden werden. Die noch im Regelkreis vorhandenen P- und PI-Regler haben die Aufgabe Modellgenauigkeiten und Störgrößen auszugleichen. Des Weiteren soll durch die Kaskadierung eine schnellere Reaktion auf Regelabweichungen möglich werden.

Die Untersuchungen zeigten, dass der Regler in der Lage ist, Abweichungen von unter  $0,5^\circ$  zu erreichen, wie das Ergebnis eines exemplarisch gezeigten Versuchs in Abbildung 15 verdeutlicht. Entscheidend für die Genauigkeit des Reglers ist die Güte des eingesetzten Prozessmodells.



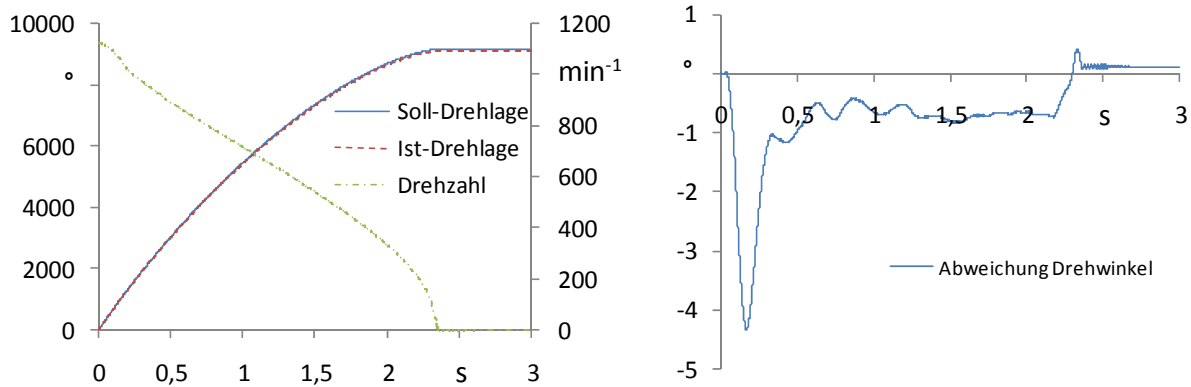


Abbildung 15: Versuchsergebnisse der Drehlageregelung mit Vorsteuerung

### 3.2.3 Optimierung durch eine Modellbasierte Prädiktive Regelung

Auffällig an den Ergebnissen der Kaskadensteuerung ist der kurz vor Prozessstillstand auftretende Sprung der Drehlageabweichung. Zu diesem Zeitpunkt nimmt der Verformungswiderstand an der Schweißnaht immer weiter zu. Wenn die Restenergie im System nicht mehr ausreicht, um den Verformungswiderstand zu überwinden, entlädt sich diese schlagartig und der Prozess kommt zum Stillstand. Dieser plötzlich eingeleitete Stillstand kann durch die Kaskadensteuerung nicht ausreichend schnell kompensiert werden, woraus letztlich der Sprung in der Drehlageabweichung resultiert.

Mit dem Einsatz einer Modellbasierten Prädiktiven Regelung soll durch die Kenntnis des Prozesses ein solches sprunghaftes Verhalten vermindert, oder möglichst ganz kompensiert werden. In diesem Fall wird der in Kapitel 3.1.3 erläuterte MPC-Reglertyp herangezogen und mit einigen Modifizierungen, wie einer winkelgeschwindigkeitsabhängigen Gewichtung versehen. Grundsätzlich ist aber auch in diesem Regler die Kostenfunktion aus Gleichung (1) hinterlegt.

Das Ergebnis einer MPC-Regelung der Drehlage ist exemplarisch in Abbildung 16 gezeigt. Der MPC-Regler ist in der Lage, den Prozess trotz der starken Nichtlinearitäten zu beherrschen, sodass im vorliegenden Experiment eine Abweichung von lediglich  $0,35^\circ$  realisierbar war. Besonders vorteilhaft an der Reglerstrategie ist der geglättete Stellgrößeneingriff, sodass die Abweichung bis zum Prozessende „sanft“ ausgeregelt wird und starke Sprünge der Führungsgröße infolge harter Stellgrößenänderungen vermieden werden. Die nennenswerte Schwierigkeit besteht in dem Aufbau eines Modells mit besonders hoher Güte. Es zeigt sich, dass bereits geringe Modellgenauigkeiten die erreichbare Genauigkeit sehr stark negativ beeinflussen.

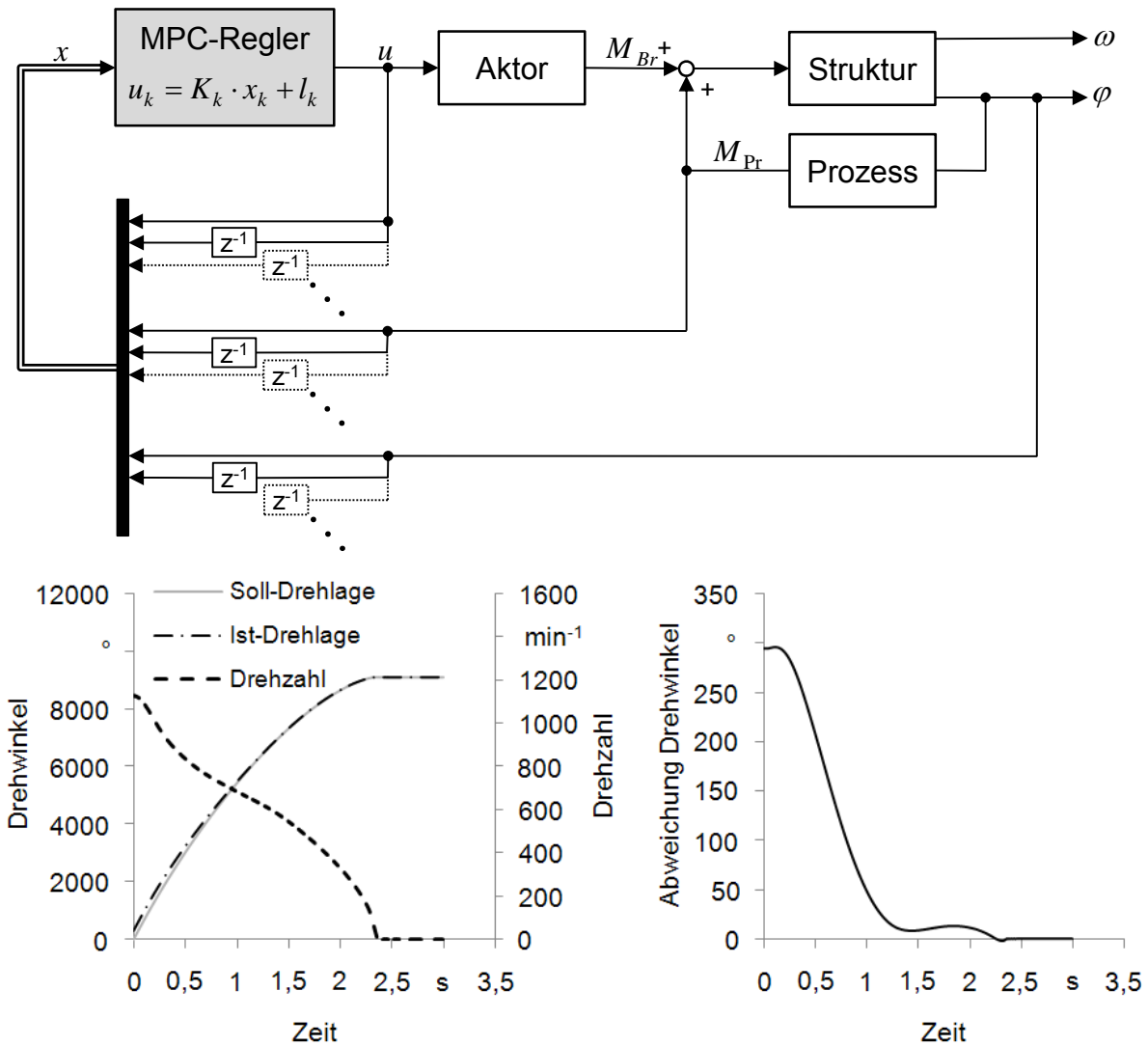


Abbildung 16: Blockschaltbild und Versuchsergebnisse einer MPC-Regelung der Drehlage

Zur Verdeutlichung wurde der Prozessablauf mit MPC-Drehlageregelung auf Video aufgenommen und ist auf der beigelegten CD enthalten. Bildausschnitte sind in Abbildung 17 dargestellt.

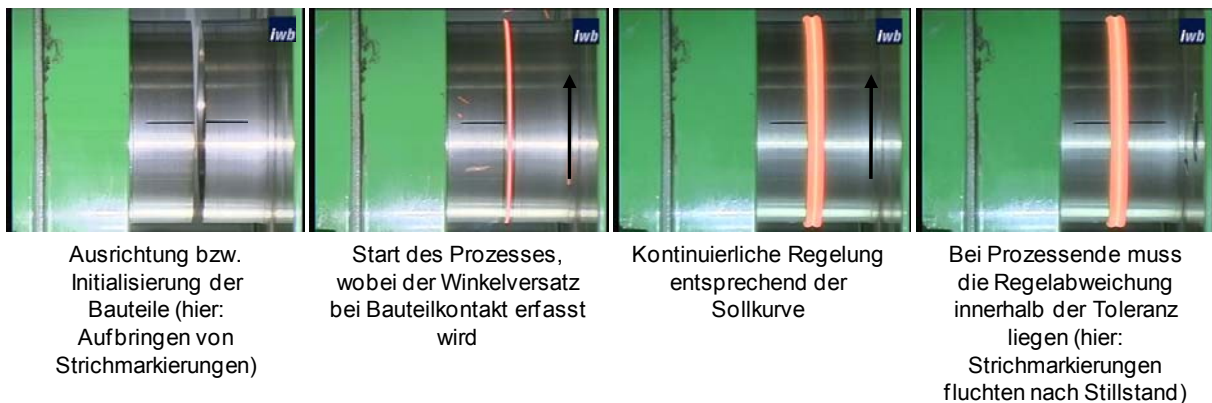


Abbildung 17: Bildausschnitte aus einer Filmaufnahme des Schwungrad-Reibschweißprozesses mit MPC-Drehlageregelung (siehe Video auf beigefügter CD)

## 4 Fazit

Die herkömmliche Regelung des Schwungrad-Reibschweißens – die Regelung des Stauchdrucks auf einem konstanten Wert – führt zu einer großen Streuung des Stauchwegs und der Drehlage. Dies führt dazu, dass je nach Anforderung an das Fügeteil Nacharbeit erforderlich wird, um die geforderten Längentoleranzen einzuhalten. Die Verschweißung von Fertigteilen mit definiertem Phasenwinkel, sodass z.B. angebrachte Flansche nach dem Schweißvorgang fluchten, lässt sich mit der konventionellen Stauchdruckregelung überhaupt nicht realisieren. Deshalb ist in Fertigungsbetrieben das Bestreben ersichtlich, den Stauchweg und die Drehlage aktiv zu regeln, um beide Größen innerhalb enger Toleranzen um die Sollwerte zu führen. Dies hätte den Vorteil, dass bereits Fertigteile verschleißt werden könnten und damit aufwendige und kostenintensive Nacharbeit entfällt.

Bisherige Ansätze verfolgen das Ziel, durch eine geeignete Aktorik die beiden Größen direkt zu beeinflussen. Zum Einsatz kommen hier durchweg konventionelle Regelungsmethoden (z.B. PID-Regler). Diese haben jedoch den Nachteil, dass sie auf die starken Nichtlinearitäten des Prozesses nicht optimal reagieren können. Die Folge ist, dass für viele Anwendungen weiterhin Nacharbeit notwendig ist. Die Regelung der Drehlage konnte sich aufgrund der immer noch großen Fertigungstoleranzen bislang gar nicht etablieren.

Deshalb ist es der Ansatz dieser Arbeit, modellbasierte Regelungsverfahren zu entwickeln und zum Einsatz zu bringen, mit denen die aktuell erreichbaren Toleranzen signifikant gesteigert werden können. Das Vorgehen war das folgende:

1. Identifikation des Prozessverhaltens und Aufbau eines Simulationsmodells
2. Entwicklung einer Regelung mit modellbasierter Vorsteuerung und einer Modellbasierten Prädiktiven Regelung für den Stauchweg und die Drehlage
3. Implementierung der Regler am *iwb*-Prüfstand und Vergleich mit den bisher eingesetzten konventionellen Regelungsmethoden

Die gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass die mit modellbasierten Regelungsmethoden erreichbaren Genauigkeiten für den Stauchweg im Bereich weniger  $\mu\text{m}$  und für die Drehlage im Bereich weniger Zehntel-Winkelgrad liegen. Gegenüber konventionellen Regelungsmethoden, wie sie derzeit durchweg eingesetzt werden, konnten Verbesserungen um mehr als de Faktor 10 festgestellt werden. Mit diesen Genauigkeiten wird es für nahezu jede Anwendung möglich, Fertigteile zu verschweißen.

Die erreichbaren Genauigkeiten mit diesen entwickelten modellbasierten Regelungsmethoden hängen entscheidend von der Güte des eingesetzten Modells ab. Deshalb haben nachfolgende Arbeiten das Ziel, die Prädiktionsfähigkeit der verwendeten Modelle zu verbessern. Des Weiteren sind die Modelle derart zu verallgemeinern, dass sie problemlos für wechselnde Schweißaufgaben eingesetzt werden können.

## 5 Literaturverzeichnis

### DIN EN ISO 15620

DIN EN ISO 15620: Schweißen - Reibschweißen von metallischen Werkstoffen. Berlin: Beuth 2000.

### DVS-MERKBLATT 2909, TEIL 1-3

DVS-Merkblatt 2909, Teil 1-3: Reibschweißen von metallischen Werkstoffen. Düsseldorf: DVS-Verlag 1989.

### GRÜNAUER 1987

GRÜNAUER, H.: REIBSCHWEIßEN VON METALLEN. EHNINGEN BEI BÖBLINGEN: EXPERT-VERLAG 1987.

### MATTHES & RICHTER 2008

Matthes, K.J.; Richter, E. (Hrsg.): Schweißtechnik – Schweißen von metallischen Konstruktivwerkstoffen. 4. Aufl. München: Hanser 2008.

### MEYER 1978

Meyer, B.: Untersuchungen zum Reibschweißprozess unter Einbeziehung des Schwungradverfahrens. Diss. RWTH Aachen (1978).

### NEUMANN & SCHOBER 1991

Neumann, A.; Schober, D.: Reibschweißen von Metallen. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1991.

### SCHOBER & APPEL ET AL. 2002

Schober, D.; Appel, L.; Horn, H.; Sontos dos, J.; Wiesner, P.; Winkel, H. -J: Stand und Zukunftsaussichten der Sonderschweißverfahren - Teil 1: Reibschweißen. Schweißen und Schneiden 54 (2002) 9:

### SCHUTZRECHT DE 3226362

PATENTANMELDUNG (19.01.1984). KUKA SCHWEIßANLAGEN + ROBOTER GMBH. - STEINHART. WILHELM. VERFAHREN ZUM ABBREMSEN UND ANHALTEN EINES MASCHINENTEILS.

### SCHUTZRECHT US 7080770B2

PATENTANMELDUNG (25.07.2006). MANUFACTURING TECHNOLOGY INC. - LOVIN. JEFF. METHOD AND SYSTEM OF INERTIA FRICTION WELDING.

### SCHUTZRECHT US 5858142

PATENTANMELDUNG (12.01.1999). INERTIA FRICTION WELDING INC. - LOWELL. TULLY. ANGULAR ORIENTATION CONTROL SYSTEM FOR FRICTION WELDING.