

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 18863 N/1

## Thema

Elektromagnetischer Vorschub für Rundstangen und Profile unter Einsatz magnetfeldformender Elemente

## Berichtszeitraum

01.10.2015 - 31.03.2018

## Forschungsvereinigung

VDW-Forschungsinstitut e.V.

## Forschungseinrichtung(en)

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

Leibniz Universität Hannover

An der Universität 2

30823 Garbsen

Garbsen, 24.07.2018

Oliver Commichau

---

Ort, Datum

---

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	1
I. Abbildungsverzeichnis.....	3
1 Kurzfassung .....	5
2 Einleitung.....	6
3 Stand der Forschung.....	7
3.1 Mechanische Vorschubsysteme.....	7
3.2 Antriebe in Positioniervorrichtungen .....	9
3.3 Projektbezogene eigene Vorarbeiten .....	11
3.3.1 Kontaktfreier Vorschub für elektrisch leitfähige Bleche .....	11
3.3.2 Elektromagnetischer Rundstangenvorschub .....	12
4 Zielsetzung und Lösungsweg .....	16
4.1 Zielsetzung .....	16
4.2 Lösungsweg .....	17
5 Funktionsweise des Vorschubsystems.....	18
6 Auslegung und Simulation des Vorschubs .....	23
6.1 Aufbau des Simulationsmodells .....	24
6.2 Simulationsergebnisse .....	26
6.2.1 Magnetfeldverteilung.....	26
6.2.2 Wirbelstromverteilung .....	26
6.2.3 Kippfrequenz.....	27
6.3 Eigenschaften der Feldformer .....	30
6.3.1 Feldformeradaption auf weitere Profilformen .....	32
6.4 Zweckmäßigkeit der durchgeführten Arbeiten .....	33
7 Konstruktion und Fertigung eines Demonstrators .....	34
7.1 Konstruktion .....	34

---

7.2	Fertigung .....	36
7.3	Zusammenfassung .....	42
7.3.1	Ein-Auslauf der Stange .....	43
7.4	Notwendigkeit der durchgeführten Maßnahmen .....	44
8	Experimentelle Untersuchungen .....	44
8.1	Validierung der Simulation am Kraftprüfstand .....	44
8.1.1	Versuchsaufbau und –durchführung der statischen Zugkraftversuche .	45
8.1.2	Ergebnisse der Zugkraftmessung .....	47
8.2	Dynamische Vorschubuntersuchungen .....	49
8.2.1	Versuchsaufbau und –durchführung im dynamischen Betrieb .....	49
8.2.2	Aufbau des Regelkreises .....	50
8.2.3	Positioniersversuche - Durchführung und Ergebnisse .....	51
8.2.4	Ermittlung der maximalen Hubzahl .....	53
8.3	Zweckmäßigkeit der durchgeführten Arbeiten .....	56
9	Zusammenfassung und Ausblick .....	57
10	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse .....	58
10.1	Einschätzung zur industriellen Umsetzbarkeit .....	58
10.1.1	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	59
10.1.2	Wissenschaftlich-technischer Nutzen für KMU .....	59
10.1.3	Verwendung der Zuwendung .....	59
10.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten .....	60
11	Symbolverzeichnis .....	61
12	Literaturverzeichnis .....	62
13	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und Veröffentlichungen sowie die Realisierbarkeit des aktualisierten Transferkonzepts .....	65
14	Danksagung .....	68

## I. Abbildungsverzeichnis

Bild 2-1: Konventionelle Vorschubkonzepte: a) Walzenvorschub, b) Zangenvorschub am Beispiel eines Rundstangenvorschubs .....	6
Bild 3-1: Vorschubkonzepte bei unterschiedlichen Werkstückanforderungen am Beispiel der Sägeanlagen der Fa. RSA cutting systems GmbH [RSA-12] .....	8
Bild 3-2: a) Konzept eines Längswellen Direktantriebs [RAST-13] , b) direktangetriebene Servopresse der Fa. Andritz Kaiser [ANDR-10] .....	10
Bild 3-3: Abwicklung eines Linearmotors in Doppelkammbauweise .....	11
Bild 3-4: Funktionsprinzip des auf dem Asynchronmotor basierenden Blechvorschubs .....	12
Bild 3-5: Aufbau des kontaktfreien Vorschubs für dünne Bleche .....	13
Bild 3-6: Prinzip des elektromagnetischen Vorschubs von Rundstangen .....	14
Bild 3-7: a) axialsymmetrisches FE Modell des Vorschubs für Rundstangen, b) ermittelte Vorschubkraft in Abhängigkeit des Stangenradius .....	15
Bild 3-8: Hoher Luftspaltanteil beim Vorschub von Rundstangen mit konventioneller Primärteiltopologie .....	16
Bild 4-1: Lösungsansatz für einen elektromagnetischen Rundstangenvorschub .....	17
Bild 4-2: Arbeitsschritte .....	18
Bild 5-1: Verteilung der Drehmoment-/Vorschubkraft Verteilung auf die Bestandteile beim mechanischen und elektromagnetischen Vorschub .....	19
Bild 5-2: Funktionsprinzip des kontaktfreien Vorschubs .....	20
Bild 5-3: Simulativer charakteristischer Verlauf der Vorschubkräfte .....	22
Bild 5-4: Phasenverschiebung zwischen den Wirbelströmen im Werkstück und dem Magnetfeld .....	23
Bild 6-1: 3D-Symmetriemodell des Rundstangenvorschubs .....	24
Bild 6-2: Vernetzung des Vorschubmodells .....	25
Bild 6-3: Im Modell hinterlegte Magnetisierungskennlinie des E-Blechs M350-50A .	25
Bild 6-4: Magnetische Induktionsverteilung im Werkstück .....	26
Bild 6-5: Magnetfeldverteilung in Eisenkern und Feldformer, aufgeklappt .....	27
Bild 6-6: Wirbelstromverlauf im Werkstück .....	28
Bild 6-7: Simulierte Kippfrequenzen verschiedener Werkstoffe, Rohr mit Ø60 mm..	28
Bild 6-8: Vorschubkraft bei unterschiedlichen Wanddicken .....	29
Bild 6-9: Eindringtiefe des Magnetfeldes .....	30
Bild 6-10: Kraftverlauf mit / ohne angepassten Feldformern .....	31
Bild 6-11: a) Überdeckungswinkel zwischen Feldformer und Werkstück und b) Feldlinien-verläufe .....	32
Bild 6-12: Vorschubkraft in Abhängigkeit der Feldformerüberdeckung .....	32
Bild 6-13: Simulation weiterer Profilformen .....	33
Bild 6-14: Simulationsergebnisse Vierkantprofil .....	33
Bild 7-1: CAD Modell des Rundstangenvorschubs .....	34
Bild 7-2: Vorrichtung zur Führung der Rundstangen .....	35
Bild 7-3: Sensorvorrichtung .....	36
Bild 7-4: CAD Modell des Feldformers .....	36
Bild 7-5: Spulenwickelwerkzeug .....	37
Bild 7-6: Eisenkern des Motors .....	38
Bild 7-7: Fertigungsschritte der Statoren .....	39
Bild 7-8: Maximale Nennfrequenzen bei Nennstrom .....	41
Bild 7-9: Feldformerpaket .....	42
Bild 7-10: Aufbau des Demonstrators .....	43

---

Bild 7-11: Prinzipskizze Stangennachfütterung .....	43
Bild 8-1: Kenndaten des Umrichters .....	45
Bild 8-2: Aufbau des Zugkraftversuchs und verwendete Messtechnik.....	46
Bild 8-3: Labview VI zur Steuerung des Vorschubs .....	46
Bild 8-4: Kraftmessdaten des Zugversuchs bei 55 Hz .....	47
Bild 8-5: Ergebnisse der Vorschubkraftmessung .....	48
Bild 8-6: Eingesetztes optisches Verlagerungsmesssystem (a), optische Messpunkte (b), Kalibrierkreuz (c) und Messaufbau (d) .....	50
Bild 8-7: Aufbau der Kaskadenregelung des Vorschubs.....	51
Bild 8-8: Geschwindigkeits- und Weg-Zeit Verlauf.....	51
Bild 8-9: Übersetzung von Rohr zu Drehgeber .....	52
Bild 8-10: Ergebnisse der Positioniersuche .....	53
Bild 8-11: Positioniergenauigkeit .....	53
Bild 8-12: Positionsdaten der Vorschubbewegung .....	54
Bild 8-13: Maximale erreichbare Hubzahlen .....	55
Bild 8-14: Maximal erreichbare Hubzahlen in Abhängigkeit des Stangengewichts bei Aluminiumstangen .....	55

## 1 Kurzfassung

Neue Technologiefortschritte zur Steigerung der Ausbringungsrate von automatisierten Systemen stellen neue Herausforderungen an die eingesetzten Vorschubsysteme für die Zuführung von Stangenmaterial. Die derzeitigen Systeme basieren ausschließlich auf mechanischen Walzen-, sowie Zangenvorschüben, mit welchen sich die Vorschubkräfte- und damit die erzielbaren Taktraten kaum mehr steigern lassen. Dadurch kann das Leistungspotential moderner Bearbeitungszentren nicht optimal ausgenutzt werden. Zusätzlich kann die Oberfläche der Werkstücke durch diese Handhabung beschädigt werden, was zu Ausschussteilen führt. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde ein neuartiges innovatives Vorschubsystem entwickelt, mit welchem elektrisch leitfähiges Rundstangenmaterial mittels elektromagnetischer Kräfte berührungslos vorgeschoben wird. Das System basiert auf dem Prinzip des asynchronen Linearmotors in Doppelkammbauweise mit Wirbelstromläufer, bei welchem das zu transportierende Werkstück als Läufer fungiert. Das im Luftspalt über die Statoren erzeugte magnetische Wanderfeld induziert Wirbelströme in das sich dort befindliche Material. Das Magnetfeld wird über speziell angefertigte Feldformer auf die Geometrie des Werkstücks ausgerichtet, damit der Luftspalt zwischen Primärteil und Werkstück möglichst gering ist. Infolge der Wechselwirkung zwischen dem Magnetfeld und den Wirbelströmen wird gemäß der Lorentz-Regel eine translatorische Vorschubkraft senkrecht zum Magnetfeld auf das Werkstück ausgeübt. Das elektromagnetische Vorschubkonzept wurde zunächst mittels eines parametrierbaren FEM-Simulationsmodells mit der Software Ansys Classic untersucht und der Aufbau anschließend optimiert. Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurde ein Demonstrator des Vorschubsystems am Institut gefertigt. Die experimentellen und simulativen Ergebnisse zeigen mit einer sehr guten Übereinstimmung, dass mit dem realisierten System hohe Vorschubkräfte erzielt werden können.

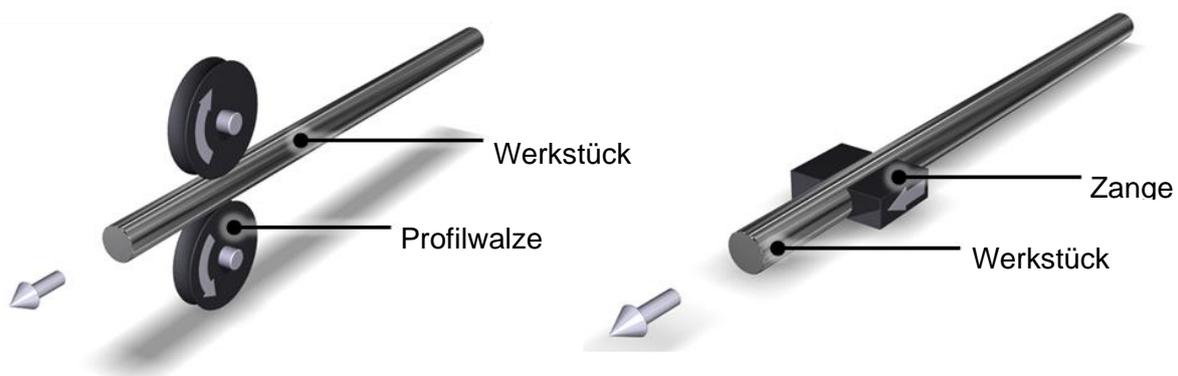
Das IGF-Vorhaben 18863 N/1 der Forschungsvereinigung VDW-Forschungsinstitut wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für

Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.

## 2 Einleitung

Zur wirtschaftlichen Fertigung von Bauteilen in großen Stückzahlen weisen die gegenwärtigen Produktionsanlagen einen zunehmend steigenden Automatisierungsgrad auf. Für eine qualitativ hochwertige Produktion ist die Genauigkeit der Maschinenführungselemente, des Werkzeugs aber auch die Arbeitsgenauigkeit des eingesetzten Positioniersystems maßgebend. Im Bereich der Verarbeitung von Rundstangen und Profilen basiert die derzeitige Vorschubtechnik ausschließlich auf den Walzen- sowie Zangenvorschubsystemen, s. Bild 2-1. Hierbei wird das Werkstück zwischen die beiden Vorschubelemente, den Zangen, bzw. Walzen, eingeklemmt und unter Reibkontakt in Vorschubrichtung transportiert.



*Bild 2-1: Konventionelle Vorschubkonzepte: a) Walzenvorschub, b) Zangenvorschub am Beispiel eines Rundstangenvorschubs*

Zur Beförderung von druckempfindlichen, beschichteten oder schweren Werkstücken werden vorwiegend Zangenvorschübe eingesetzt [WANZ86], da bei diesen Systemen die Flächenpressung zwischen Werkstück und Zangen im Vergleich zur linienförmigen Druckbelastung beim Walzenvorschub geringer ist [HAUR-74]. Gleichzeitig wird durch das Anpressen der Zangenelemente die Haftreibung erhöht und so ein schlupffreier Vorschub realisiert. Bei unebenen Werkstückoberflächen, wie beispielsweise Rundstangen, weisen diese meist eine an die Oberflächenkontur angepasste Profilierung auf. Der Antrieb der Zangen erfolgt durch pneumatisch oder

elektrisch angetriebene Linearmotoren, selten auch über eine rotatorisch angetriebene Spindel. Ein wesentlicher Nachteil besteht jedoch darin, dass nach jedem Vorschubtakt die Zangen in die Ausgangslage wieder zurückverfahren werden müssen sowie auch in dem durch den konstruktiven Aufbau eingeschränkten Vorschubweg. Die maximal erzielbaren Vorschubtakte werden dadurch stark reduziert, sodass Zangenvorschübe zum einen in Produktionsbereichen eingesetzt werden, in denen mit geringer Ausbringungsrate gearbeitet wird, zum anderen aber auch in Bereichen, in denen eine hohe Oberflächengüte der Werkstücke eingehalten werden muss und entsprechend die Flächenpressung nicht beliebig erhöht werden darf.

Sind hingegen hohe Taktraten gefordert, werden vorwiegend Walzenvorschübe eingesetzt. Diese weisen den Vorteil eines deutlich geringeren konstruktiven Aufwands auf, sodass entsprechend auch ein geringerer Raumbedarf in der Produktionsanlage erforderlich ist. Hierbei werden die Walzen über einen Rotationsmotor, häufig auch über eine Getriebestufe, angetrieben. Neben der höheren Dynamik ist bei Walzenvorschüben darüber hinaus die Vorschublänge uneingeschränkt, sodass eine sehr flexible Fertigung möglich ist.

### **3 Stand der Forschung**

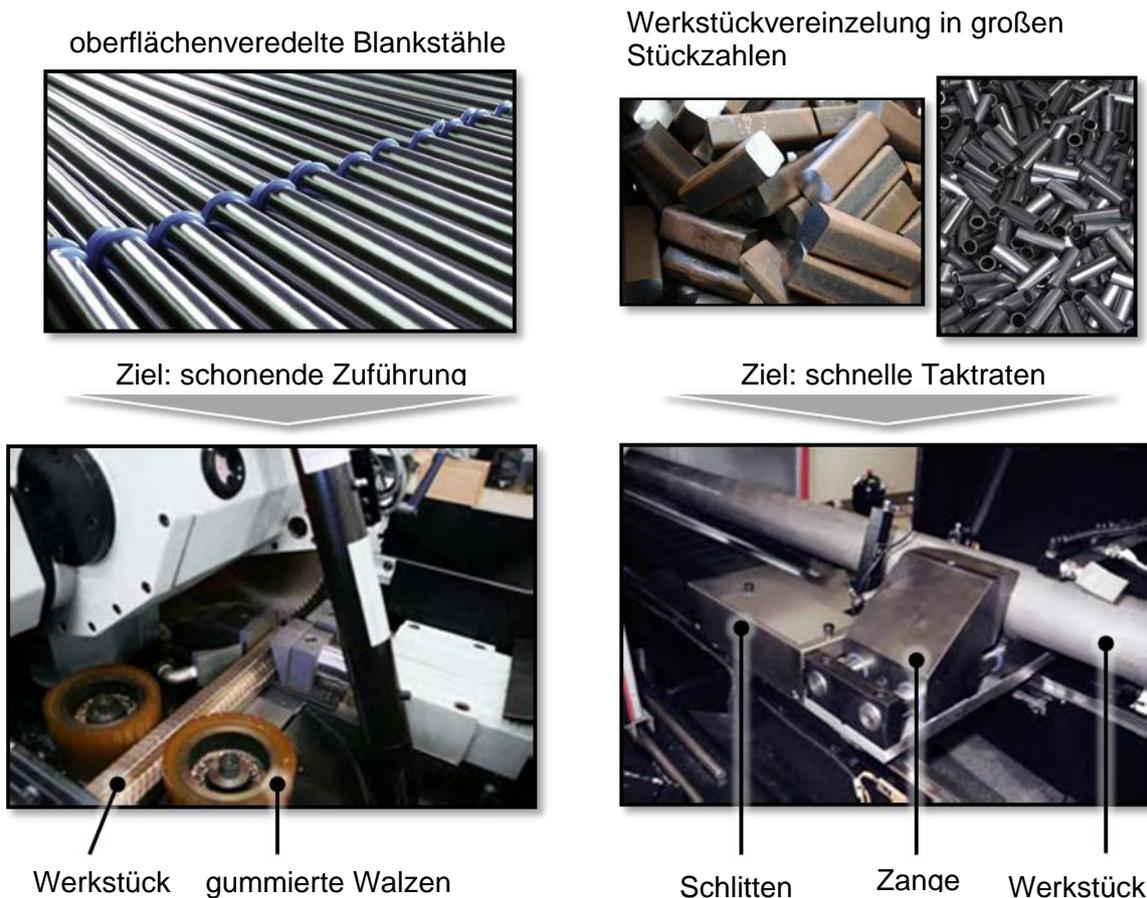
#### **3.1 Mechanische Vorschubsysteme**

Zur Beförderung von Werkstücken in automatisierten Fertigungsanlagen werden derzeit mechanische Vorschubsysteme eingesetzt. Der Aufbau derartiger Vorschübe ist dabei sehr komplex. So muss beim Zangenvorschub der komplette Schlitten samt der Stellvorrichtung für die Zangen in Positionierichtung verfahren werden. Abhängig vom Aufbau müssen hierbei teilweise die Aktorik zum Lüften der Zangen sowie weitere Steuer- und Datenkabel ebenfalls dauernd mitbewegt werden. Durch die zusätzlich zu bewegenden Massen wird die Dynamik und damit unmittelbar die Produktivität des gesamten Systems eingeschränkt.

Neben der Dynamik des Vorschubsystems werden je nach Produktionsbereich unterschiedliche Anforderungen gestellt. So bedarf es bei der Verarbeitung von oberflächenvergüteten Werkstücken, beispielsweise von Blankstählen oder

anderweitigen beschichteten Metallen, gesonderter Vorkehrungen, um eine Beschädigung der Oberfläche zu vermeiden. In den meisten Fällen wird hierbei der direkte Kontakt zwischen dem Werkstück und der Metallwalze, bzw. Zange des Vorschubes vermieden, indem die Vorschubelemente gummiert ausgeführt werden (Bild 3-1). Der wesentliche Nachteil besteht in einem erhöhten Verschleiß, sodass diese Vorschubelemente in kürzeren Intervallen ausgetauscht werden müssen, was wiederum mit dem Stillstand der Produktionsanlage und negativen wirtschaftlichen Folgen aufgrund der unproduktiven Zeitspanne verbunden ist.

Bei der Produktion von Werkstücken in großen Stückzahlen, die keiner besonderen Oberflächenvorbehandlung unterzogen worden sind, werden die Werkstücke mit einer hohen Anpresskraft zwischen verschleißfeste Metallzangen, bzw. –walzen geklemmt und vorgeschoben. Hier steht eine hohe Taktrate im Vordergrund, um



*Bild 3-1: Vorschubkonzepte bei unterschiedlichen Werkstückanforderungen am Bei-spiel der Sägeanlagen der Fa. RSA cutting systems GmbH [RSA-12]*

einen wirtschaftlichen Prozess zu realisieren. Allerdings müssen die Vorschublängen mit einer hohen Präzision eingehalten werden, damit eine gleichbleibende Werkstückqualität, auch nach der Endbearbeitung, gewährleistet werden kann. So muss beispielsweise bei der Vereinzelung von Schmiederohlingen im Bereich der Massivumformung eine hohe Vorschubpräzision eingehalten werden, um diese möglichst gewichtsgenau zusägen zu können. Andernfalls entstehen beim Schmieden zum einen ein hoher Materialabfall, zum anderen auch eine erhöhte Werkzeugbelastung, da eine größere Materialmenge zur Einhaltung der Formgebung verdrängt werden muss, die wiederum zu einer geringeren Werkzeugstandzeit führt [BEHR-10].

### **3.2 Antriebe in Positioniervorrichtungen**

Im Bereich der Produktionstechnik ist ein stetiger Trend hinsichtlich der Dezentralisierung von Antriebskomponenten in Automatisierungsanlagen zu verzeichnen [KRAU-10]. Durch die mechanische Entkopplung können die konstruktiven und die fertigungstechnischen Aufwendungen erheblich reduziert werden. Die Synchronisation erfolgt heutzutage vielmehr elektrisch durch eine zentrale Steuereinheit. Tendenziell werden darüber hinaus zunehmend Direktantriebe zum Positionieren von Werkstücken eingesetzt, insbesondere in Bereichen, in denen hohe Dynamiken für hohe Taktraten zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit gefordert werden. Durch den Wegfall von Getriebekomponenten können u.a. der Verschleiß gemindert, die Antriebssteifigkeit, die Positioniergenauigkeit, aber auch die Ausbringungsraten oftmals signifikant erhöht werden [KLEM-09].

Für den Antrieb in Positioniersystemen werden insbesondere bei hochdynamischen Prozessen vorwiegend permanentmagneterregte Servomotoren eingesetzt. Diese zeichnen sich durch ihre hohe Leistungsdichte sowie der sehr guten Regeleigenschaften aus. Aufgrund der steigenden Tendenz in der Preisentwicklung bei den „Selten-Erden“, welche für die Herstellung der verhältnismäßig teuren Permanentmagnete benötigt werden, werden vermehrt auch Asynchronmotoren in dynamischen Systemen eingesetzt. Durch neue Regelungsverfahren für asynchronmotorbetriebene Vorrichtungen, können mit diesen Antrieben ebenfalls „servo-ähnliche“ Eigenschaften erzielt werden [BRIN-03; QUES-10].

Durch die Entwicklung immer leistungsstärkerer servoelektrischer Antriebe, beispielsweise den sogenannten Torquemotoren sowie den dazugehörigen Umrichtereinheiten wird der Direktantrieb auch größerer Anlagen ermöglicht. Hierbei handelt es sich um einen hochpoligen Motor, der zwar nur vergleichsweise kleine Drehzahlen, dafür jedoch ein äußerst hohes Drehmoment aufbringen kann [WECK-06]. Aktuelles Beispiel sind die direktangetriebenen Servopressen im Bereich der Umformtechnik (Bild 3-2), welche sich inzwischen fest etabliert haben [KUHN-10]. Durch die neuen Steuerungsmöglichkeiten, wie die Variabilität der Stößelkinematik, ergibt sich für den Anwender eine sehr flexible Fertigung mit höherer Ausbringungsrate bei gleichzeitig reduziertem Energieaufwand [PAPP-08; BEYE-10].

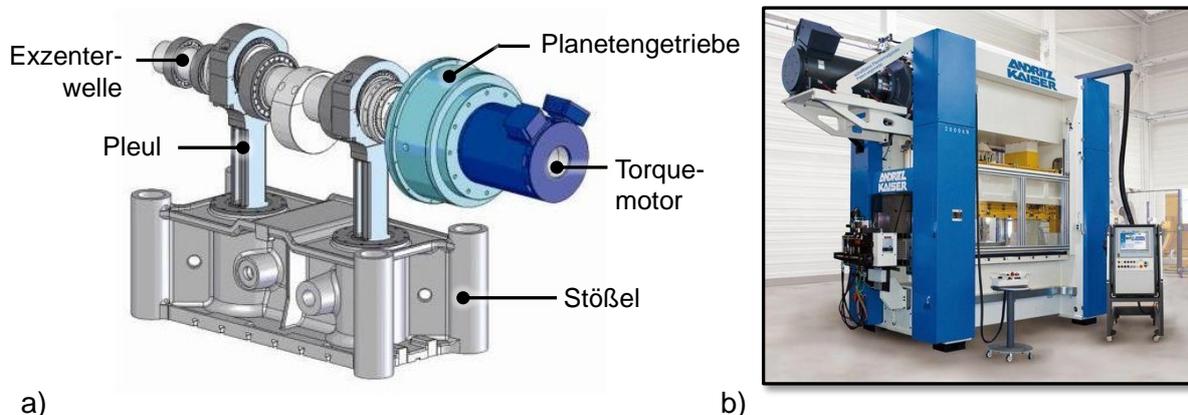
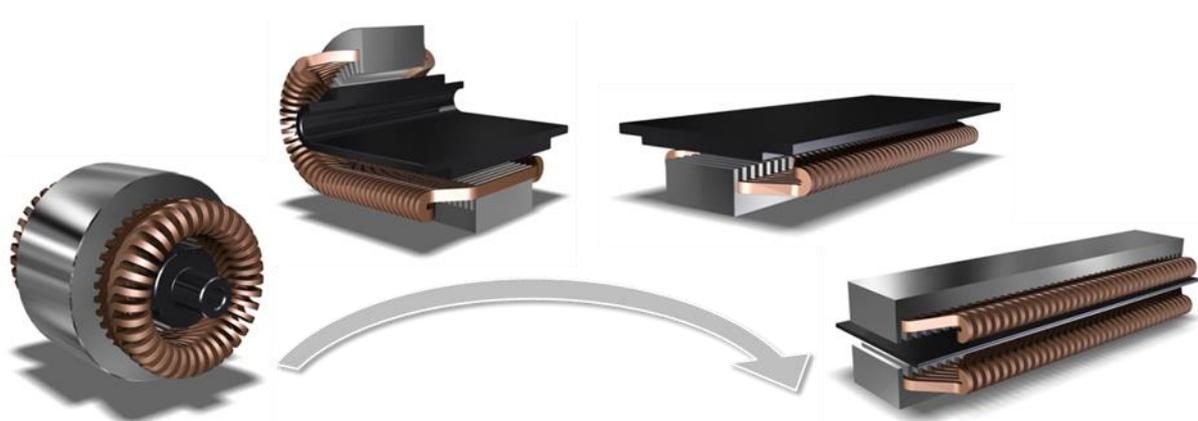


Bild 3-2: a) Konzept eines Längswellen Direktantriebs [RAST-13] , b) direktangetriebene Servopresse der Fa. Andritz Kaiser [ANDR-10]

Eine zunehmende Verbreitung finden darüber hinaus Linearmotoren als Direktantriebe in geradlinigen Positioniersystemen [SCHR-09]. Ein Linearmotor ist als eine Abwicklung eines rotatorischen Elektromotors zu verstehen (vgl. Bild 3-3)[WEH-74; KIEL-07]. Da ein einfachwirkender Linearmotor nicht unerhebliche Anziehungskraft auf den Läufer ausübt, welche ein Vielfaches der eigentlichen Vorschubkraft beträgt und von den Führungen aufgenommen werden muss, ist die Doppelkammanordnung ebenfalls weit verbreitet. Hierbei werden zwei identische Statoren gegenüber positioniert, deren Anziehungskräfte auf den Läufer sich durch den symmetrischen Aufbau kompensieren [BUDI-83, SCHR-09]. Durch den Einsatz eines Linearmotors besteht zusätzlich der Vorteil in der direkten Kräfteinleitung auf dem kürzesten Wege ohne vorherige mechanische Energiewandlung [WECK-06]. Darüber hinaus wird durch die Reduzierung der sich im Kraftfluss befindlichen

mechanischen Komponenten die Steifigkeit und somit die Positioniergenauigkeit des Systems erhöht [KLEM-09]. In der Praxis sind vorwiegend permanentmagneterregte Linearmotoren vorzufinden, zurückzuführen auf die relativ hohe Kraftdichte.



*Bild 3-3: Abwicklung eines Linearmotors in Doppelkammbauweise*

Der Einsatz asynchroner Linearmotoren ist hingegen weniger verbreitet. Zwar können diese deutlich günstiger hergestellt werden, da der Läufer lediglich aus einem elektrisch gut leitenden Blech, wie beispielsweise Kupfer, appliziert auf einem magnetischen Rückschluss besteht [SEW-13], allerdings sind die erzielbaren Kräfte um ein Vielfaches geringer und für die meisten Anwendungsfälle nicht ausreichend.

### 3.3 Projektbezogene eigene Vorarbeiten

#### 3.3.1 Kontaktfreier Vorschub für elektrisch leitfähige Bleche

Die Arbeitsgruppe des Antragsstellers besitzt auf dem Gebiet der Entwicklung elektrischer Antriebe durch aktuell laufende und bereits abgeschlossene Forschungsprojekte eingehende Erfahrungen. Im AiF Forschungsprojekt „Kontaktfreier Vorschub für hohe Bandgeschwindigkeiten“ (IGF16749N/1) wurde ein elektromagnetischer Vorschub basierend auf dem (Bild 3-4) [BEHR-13] untersucht. Hierbei werden zwei identische Statoren, in welche die Drehstromwicklung integriert ist, zur Kompensation der einseitig wirkenden Anziehungskräfte auf das Blech, symmetrisch gegenüber positioniert. Das mittels der Statoren erzeugte Magnetfeld im Luftspalt, induziert wiederum Wirbelströme im elektrisch leitfähigen Blech. Infolge der Wechselwirkung zwischen dem Magnetfeld und den Wirbelströmen wird gemäß dem Induktionsgesetz eine Tangentialkraft auf das Blech in Vorschubrichtung ausgeübt.

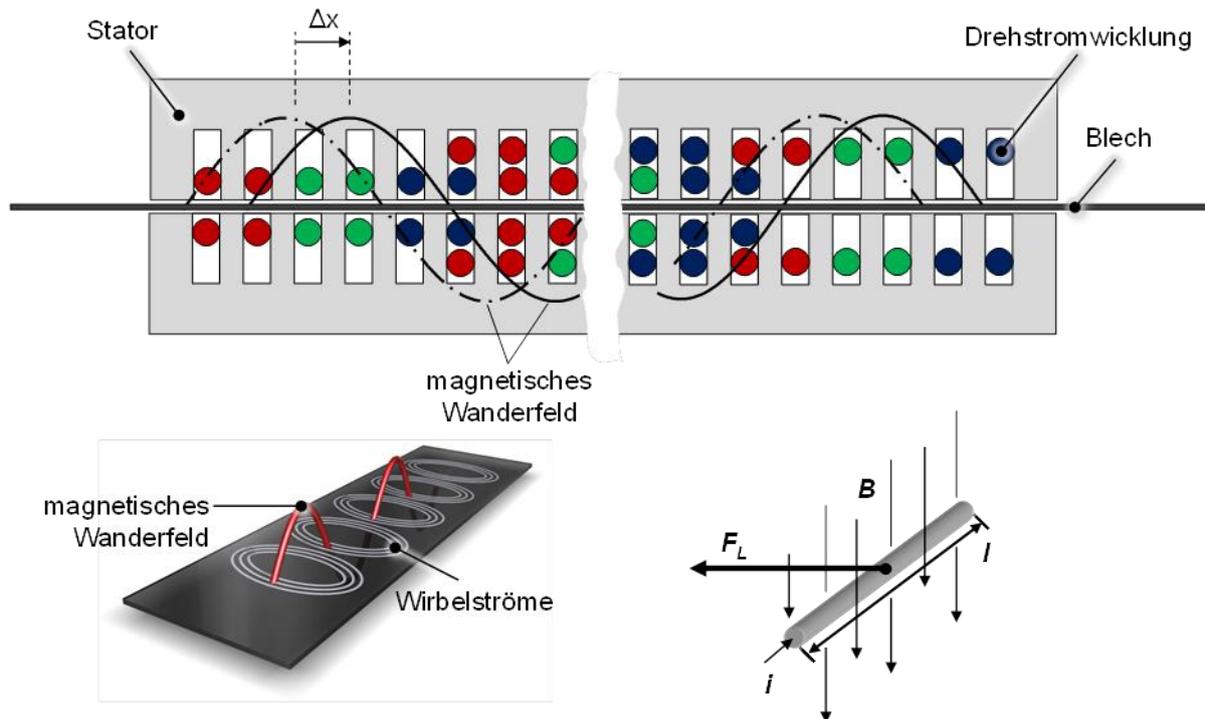
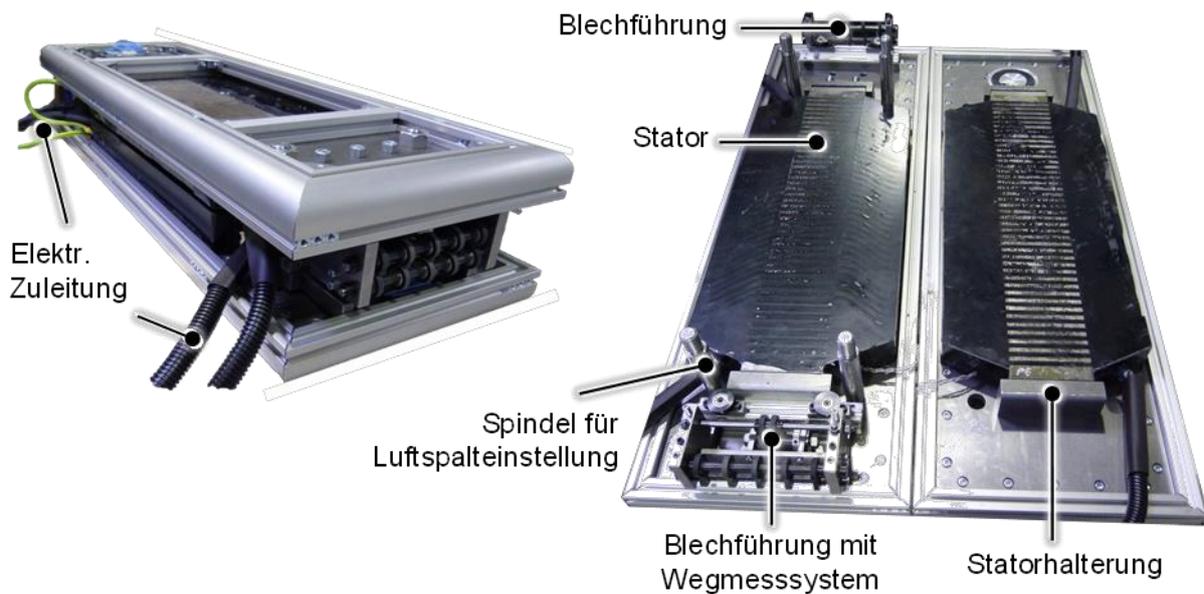


Bild 3-4: Funktionsprinzip des auf dem Asynchronmotor basierenden Blechvorschubs

Mittels des vom IFUM patentierten Vorschubs [BEHR-08d, BEHR-09] können gemäß erster experimenteller Untersuchungen an einem realen Demonstrator (Bild 3-5) gegenüber den konventionellen mechanischen Vorschubtechniken, wie Zangen-, Walzen- und Walzensegmentvorschüben, erheblich höhere Vorschubgeschwindigkeiten, -längen und -kräfte erreicht werden. Je nach Blechmaterial und -geometrie können Vorschubkräfte von über 1000 N erzielt werden [BEHR-13, TEIC-13, TEIC-14], was mehr als einer Verdopplung gegenüber den gegenwärtig eingesetzten Konzepten entspricht. Aufgrund der direkten elektromagnetischen Krafteinwirkung müssen keine zusätzlichen mit Trägheit behafteten Massen bewegt werden, wodurch sehr hohe Beschleunigungen des Bandmaterials realisiert werden. Durch den Wegfall von mechanischen Getriebeübersetzungen wird das Blech zudem klemmfrei und somit oberflächenschonend zugeführt [BEHR-08d; BEHR-11].

### 3.3.2 Elektromagnetischer Rundstangenvorschub

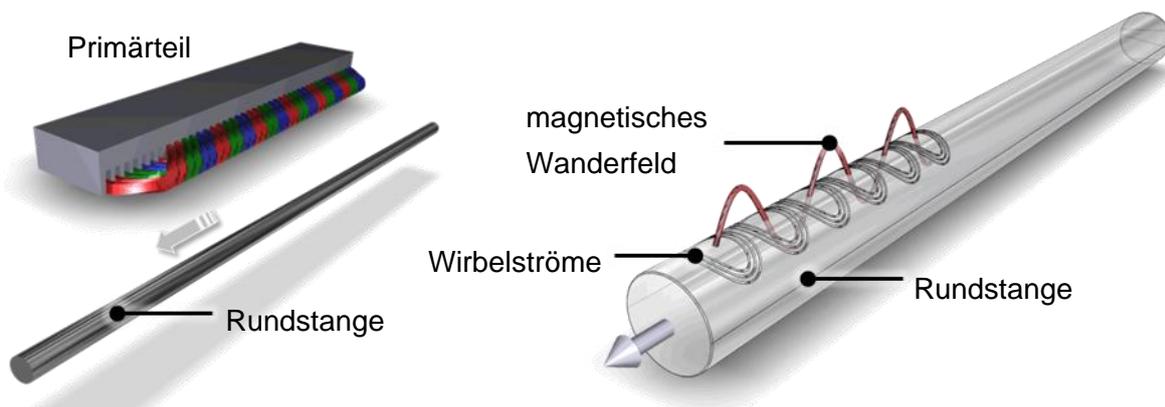
Gespräche mit zahlreichen Vorschubherstellern und Anwendern zeigen, dass ein großes Interesse an dem elektromagnetischen Vorschubprinzip auch in Fertigungsbereichen von Rundstangen, Rohren und anderweitigen Profilen besteht.



*Bild 3-5: Aufbau des kontaktfreien Vorschubs für dünne Bleche*

Für solch relativ komplexe Bauteilgeometrien ist der bislang realisierte Vorschub allerdings ungeeignet. Zwischen den ebenen Primärteilen und dem dazwischen positionierten unebenen Werkstück entsteht insbesondere im Randbereich ein sehr großer Luftspalt. Dieser besitzt jedoch einen entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit, insbesondere auf die erzielbare Vorschubkraft. Der daraus resultierende Nachteil besteht darin, dass die Primärteile an die vorzuschiebende Werkstückgeometrie angepasst werden müssen und lediglich bei den zur Anpassung verwendeten Werkstückabmaßen einen optimalen Wirkungsgrad aufweisen. Bei einer komplexeren Oberflächenstruktur des Transportmaterials, anders als dies bei ebenen Blechen der Fall ist, muss somit das Primärteil die Außenkontur des Werkstücks aufweisen, um den Luftspalt gleichmäßig gering zu halten. Für den industriellen Einsatz müsste somit für jede Werkstückgeometrie ein angepasstes Vorschubsystem eingesetzt werden. In Bereichen, wo häufige Produktionswechsel mit unterschiedlichen Werkstückabmaßen stattfinden, kann eine effiziente Produktion nicht mehr gewährleistet werden. Die Anschaffungskosten und bei einem Produktionswechsel mit anderweitigen Werkstückabmaßen anfallenden Rüst- sowie Stillstandskosten führen somit zu einer geringen Praxistauglichkeit eines solchen Systems.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen des beantragten Vorhabens daher ein Vorschub für Rundstangen und Profile untersucht und praktisch erprobt werden, welcher ebenfalls auf dem elektromagnetischen Vorschubprinzip beruht, s. Bild 3-6. Durch die Wechselwirkung des vom Primärteil im Luftspalt induzierten Magnetfeld und den Wirbelströmen in der Rundstange wird entsprechend eine Vorschubkraft aufgebracht.



*Bild 3-6: Prinzip des elektromagnetischen Vorschubs von Rundstangen*

Zur Prüfung der Funktionstauglichkeit eines solchen Vorschubs für den industriellen Einsatz wurden am IFUM simulationsgestützte Voruntersuchungen durchgeführt. Die Untersuchungen basieren auf einem idealisierten zylindrischen Linearmotoraufbau in dessen Inneren sich die Rundstange befindet. Hierfür wurde ein zweidimensionales axialsymmetrisches Finite-Elemente (FE) - Vorschubmodell erstellt (Bild 3-7), mittels welchem die erzielbaren Vorschubkräfte berechnet wurden. Dem Materialmodell für den Eisenkreis der Primärteile sowie der Rundstange wurden nichtlineare magnetische Eigenschaften zugeordnet, um realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen. Die Primärteile sind neunpolig ausgeführt und weisen eine Gesamtlänge von lediglich 575 mm auf. Der Luftspalt zwischen Stator und Werkstück, welcher die maximal erreichbare Vorschubkraft beeinflusst, beträgt bei dem hier betrachteten Modell 0,5 mm. Der Rundstange wurden die Materialkennwerte, wie die Permeabilität und der elektrische Widerstand, eines herkömmlichen Eisenwerkstoffs zugeordnet.

In Abhängigkeit des Stangenradius lassen sich gemäß den Simulationsergebnissen mit dem nichtoptimierten Vorschubaufbau, hinsichtlich der Wicklungsverteilung sowie der Polteilung und –anzahl, Vorschubkräfte von 2000 N auf eine Rundstange mit 200 mm Durchmesser aufbringen. Durch eine Erhöhung der Statorpole und

Optimierung der Wicklungsverteilung sind jedoch deutlich höhere Vorschubkräfte erreichbar.

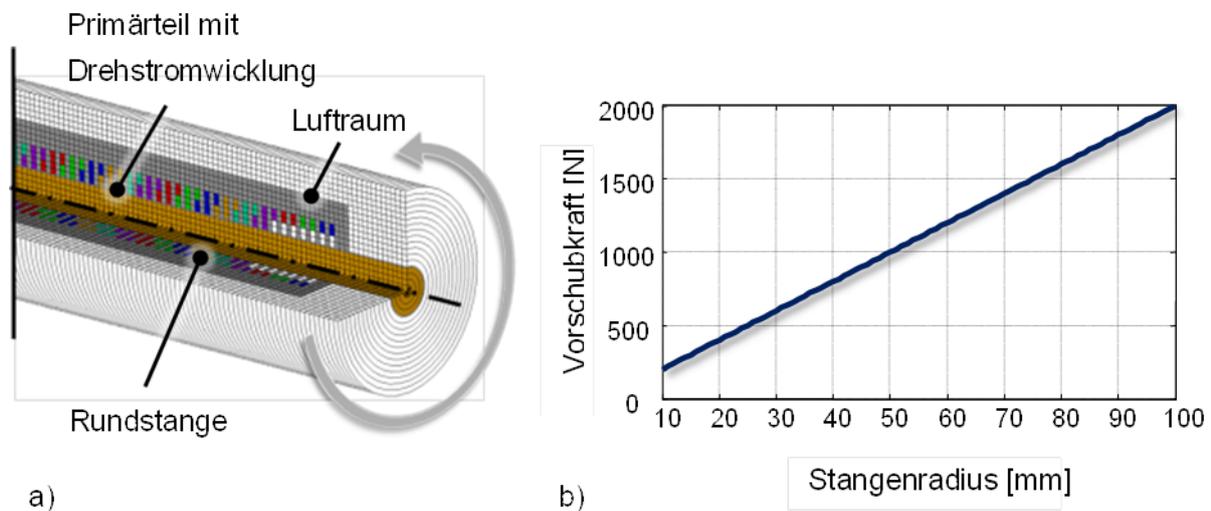
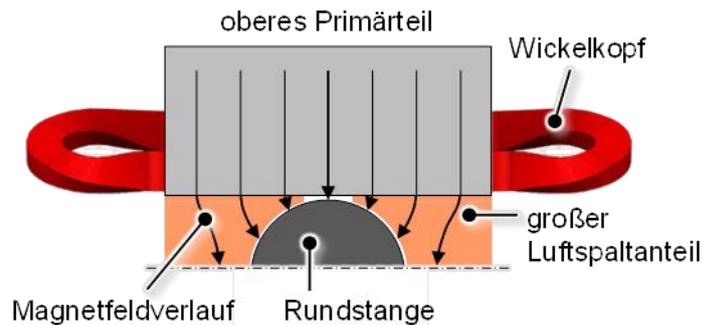


Bild 3-7: a) axialsymmetrisches FE Modell des Vorschubs für Rundstangen, b) ermittelte Vorschubkraft in Abhängigkeit des Stangenradius

Die numerischen Voruntersuchungen zum Rundstangenvorschub zeigen das hohe Leistungsvermögen dieses Konzepts. Die praktische Umsetzbarkeit eines solchen Vorschubs stellt allerdings eine Herausforderung dar. Im Allgemeinen sind die Primärteile eben ausgeführt. Dies führt zu einem äußerst großen Luftspalt zwischen dem Primärteil und dem runden Werkstück (Bild 3-8). Infolgedessen wird der magnetische Widerstand unverhältnismäßig groß und die erzielbaren Vorschubkräfte sehr gering. Für eine hohe Leistungsdichte muss die Innenkontur der Primärteile zur Minimierung des Luftspalts direkt an die vorzuschiebende Werkstückoberflächenstruktur angepasst werden. In der Praxis wäre somit für jede Werkstückgeometrie der Einsatz eines angepassten Vorschubsystems notwendig. In Fertigungsbereichen, in denen Produktionswechsel mit unterschiedlichen Werkstückabmaßen stattfinden, müsste stets ein separates Vorschubsystem eingesetzt werden. Dies würde zu ungemein hohen Investitionskosten und einer geringen Praxistauglichkeit des Vorschubsystems führen. Aufgrund dieser Problematik bedarf es daher einer Weiterentwicklung des elektromagnetischen Vorschubkonzepts für Rundstangen und Profile.



*Bild 3-8: Hoher Luftspaltanteil beim Vorschub von Rundstangen mit konventioneller Primärteiltonologie*

## 4 Zielsetzung und Lösungsweg

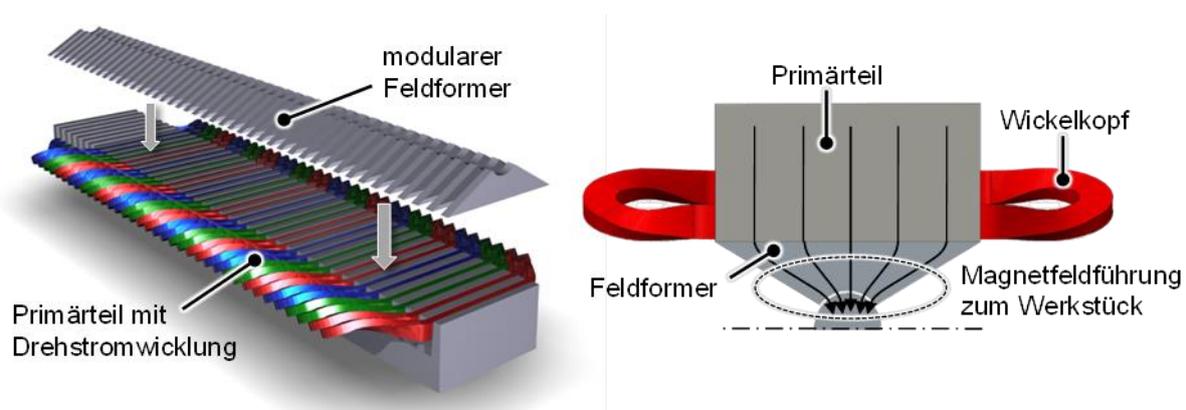
In vielen Anwendungsfällen werden Produktivität und Wirtschaftlichkeit einer Fertigungslinie vom eingesetzten Vorschubsystem limitiert. Heutige Systeme zum Transport von Rundstangen, Rohren und Profilen basieren ausschließlich auf mechanischen Konzepten. Eine begrenzte Dynamik und das Schädigungsrisiko der Werkstückoberfläche aufgrund des mechanischen Kontakts sowie der damit verbundene Wartungs- und Instandhaltungsaufwand der Vorschubkomponenten sind als wesentliche Herausforderung beim Betrieb von Vorschüben zu nennen. Eine Steigerung der Vorschubleistungsfähigkeit ist mit den heutigen Konzepten kaum mehr möglich.

### 4.1 Zielsetzung

Das in diesem Forschungsprojekt verfolgte Ziel war es daher, die Leistungsgrenzen von Vorschubsystemen für Rundstangen, Rohre und Profile mit dem Verfahren des elektromagnetischen Vorschubprinzips zu steigern. Der Lösungsansatz basiert auf dem Verfahren des Asynchronmotors, bei welchem das elektrisch leitfähige Werkstück selbst als bewegliches Sekundärteil fungiert. Da die Krafteinleitung auf das Werkstück ohne jeglichen mechanischen Kontakt erfolgt, wird die Oberfläche nicht beschädigt. Gleichzeitig werden die Produktivität der Fertigungslinie erhöht sowie die Instandhaltungskosten von Vorschüben reduziert.

Für eine praktikable Einsetzbarkeit eines solchen Vorschubs besteht die Herausforderung in der Minimierung des Luftspalts zwischen Primärteil und Werkstück, um hohe Vorschubkräfte zu erzeugen. Vor diesem Hintergrund war ein modularer Aufbau des Vorschubs geplant. Bei diesem werden zusätzlich zu den

konventionell aufgebauten Primärteilen sogenannte Feldformer eingesetzt, welche auf die Primärteile appliziert werden (Bild 4-1).



*Bild 4-1: Lösungsansatz für einen elektromagnetischen Rundstangenvorschub*

Die Feldformer weisen eine an die jeweilige Werkstückaußenkontur angepasste Geometrie auf und bestehen aus einem hochpermeablen Material. Gegenüber dem Betrieb ohne Feldformer wird auf diese Weise der Luftspalt zum Werkstück minimiert und die Magnetfeldausnutzung signifikant erhöht. Infolgedessen wird die Vorschubkraft des Vorschubs gesteigert. Aufgrund des modularen Aufbaus ist der Vorschub mit geringem Aufwand an Werkstücke unterschiedlicher Außenkontur anpassbar. Beim Produktionswechsel müssen lediglich die Feldformer mit spezifischer Innenkontur ausgetauscht werden. Im Gegensatz zu den Primärteilen können die Feldformer kostengünstig hergestellt werden, da sie lediglich aus geschichteten Elektroblechen bestehen. Modulare Linearmotoren mit Feldformern dieser Art und Funktion sind bisher in der Praxis unbekannt. Daher bestand das Ziel darin, im Rahmen des Projektes optimale werkstückspezifische Gestaltungsregeln für die Feldformer zu ermitteln.

## 4.2 Lösungsweg

Zur Erreichung der im Vorhaben verfolgten Ziele wurden insgesamt sieben Arbeitspakete geplant, deren Ablauf in Bild 4-2 dargestellt ist. Um das Vorschubprinzip zunächst simulationsgestützt zu untersuchen, wird im ersten Schritt ein parametrisches Finite-Elemente-Modell entwickelt. Mittels dessen werden anschließend die Primärteile und die Feldformer für unterschiedliche Rundstangen-/Rohrdurchmesser in ihrem Aufbau optimiert. Nach Abschluss der Simulationen wird ein Demonstrator zum Vorschub von Rundstangen und Rohren konstruiert und

gefertigt. Mittels des Demonstrators werden praktische Untersuchungen durchgeführt und die Simulationsergebnisse validiert. Es werden die praktische Funktionstauglichkeit des elektromagnetischen Vorschubprinzips nachgewiesen und die Leistungsgrenzen ermittelt. Darauf aufbauend werden weitere Feldformer für komplexe Werkstückprofile simuliert.

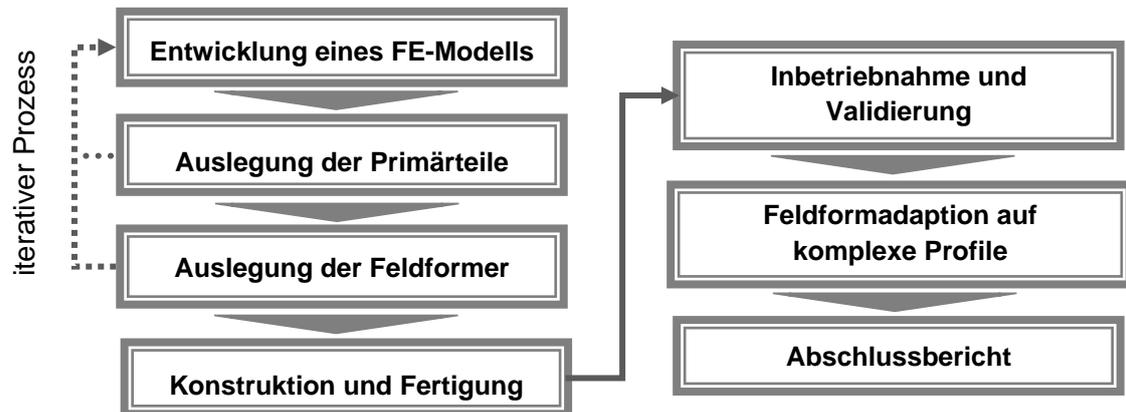


Bild 4-2: Arbeitsschritte

## 5 Funktionsweise des Vorschubsystems

Das Prinzip des im Projekt entwickelten neuartigen elektromagnetischen Vorschubs basiert auf dem Verfahren des asynchronen Linearmotors mit Wirbelstromläufer. Hierbei wird das Werkstück, welches der Produktionsmaschine taktweise zugeführt wird, direkt als Läufer eingesetzt, sodass keine weiteren mechanischen Übertragungselemente wie Zangen oder Walzen benötigt werden. Die einzige Voraussetzung an das Material ist die elektrische Leitfähigkeit. Eine magnetische Leitfähigkeit des Materials ist nicht notwendig. Zwei um das Werkstück symmetrisch positionierte Primärteile erzeugen mittels elektromagnetischer Kräfte eine Vorschubkraft. Mit der für das Vorschubsystem vorgesehenen Anordnung in der sogenannten Doppelkammbauweise werden die auf das Werkstück einseitig wirkenden Anziehungskräfte kompensiert. Ein wesentlicher Vorteil dieses Vorschubprinzips besteht in der berührungslosen Krafteinleitung, wodurch ein oberflächenschonender Transport des Werkstücks realisiert wird.

Neben der berührungslosen Krafteinleitung ist ein weiterer Vorteil, dass keine weiteren massenträgheitsbehafteten Komponenten, wie Walzen, Zangen oder

anderweitigen Antriebsstrangbestandteile zusätzlich beschleunigt werden müssen. Bei mechanischen Konzepten führt diese Problematik dazu, dass ein wesentlicher Anteil des eingebrachten Drehmoments des Servomotors für den Antriebsstrang selbst aufgewendet werden muss und nur ein vergleichsweise geringer Anteil zur Beschleunigung des Werkstücks zur Verfügung steht (vgl. Bild 5-1). Da bei dem in diesem Forschungsprojekt entwickelten Vorschubsystem lediglich das Werkstück bewegt werden muss, kann entsprechend eine erheblich höhere Dynamik während des Positioniervorgangs erreicht werden.

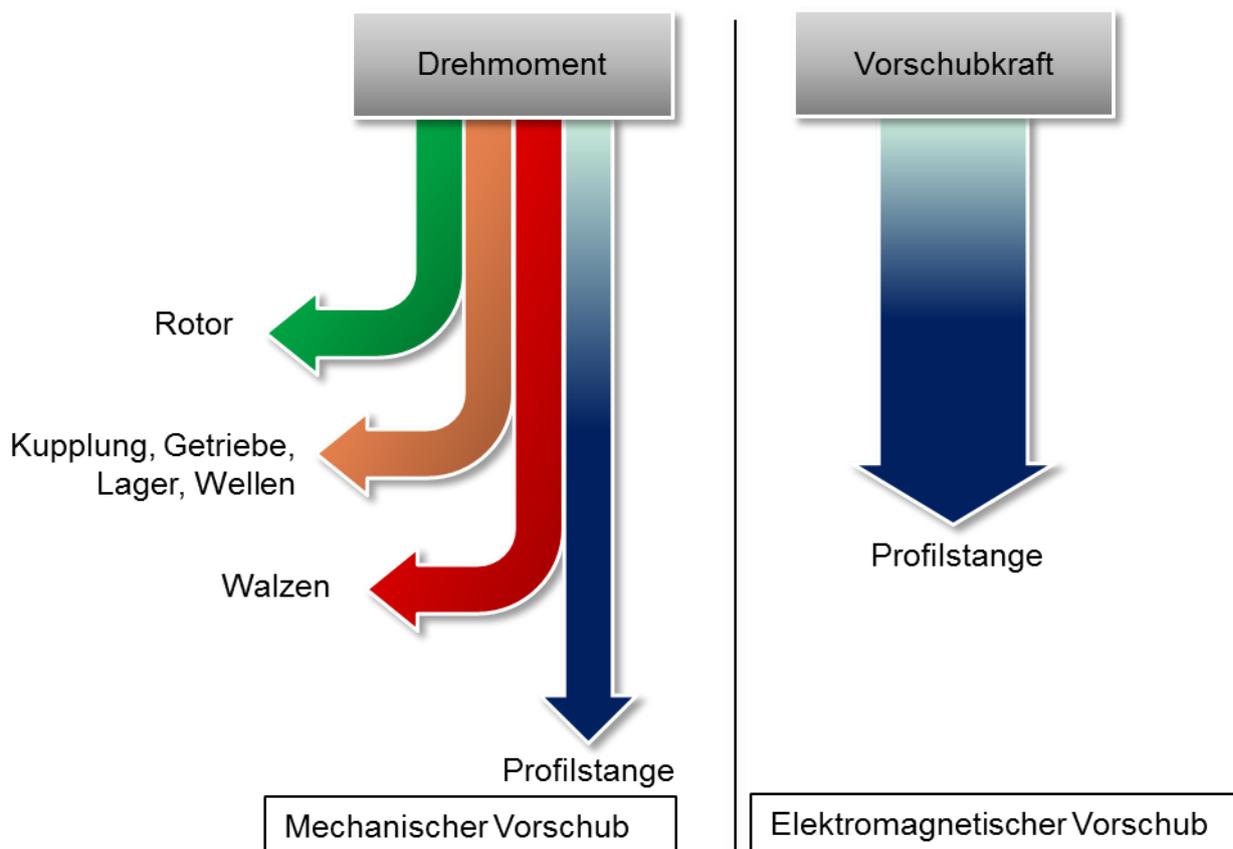


Bild 5-1: Verteilung der Drehmoment-/Vorschubkraft Verteilung auf die Bestandteile beim mechanischen und elektromagnetischen Vorschub

Neben den Vorteilen der höheren Dynamik, besteht bei dem elektromagnetischen Konzept zusätzlich der Vorteil eines geringeren Verschleißes, da sich im Vorschub weniger bewegte Komponenten befinden. Die wesentlichen Vorschubkomponenten sind die beiden symmetrisch gegenüber angeordneten Statoren zusammen mit den Feldformern, sowie das Werkstück, wie in Bild 5-2 schematisch dargestellt. In den beiden Blechpaketen der Statoren ist eine 3-phasige Drehstromwicklung integriert, in

welche mittels eines Umrichters ein geschwindigkeits- (frequenz-) und amplitudenveränderbarer Drehstrom eingepreßt wird. Die drei Phasen des Drehstroms sind in den Farben rot, blau und grün dargestellt.

### 3-phasige Drehstromwicklung

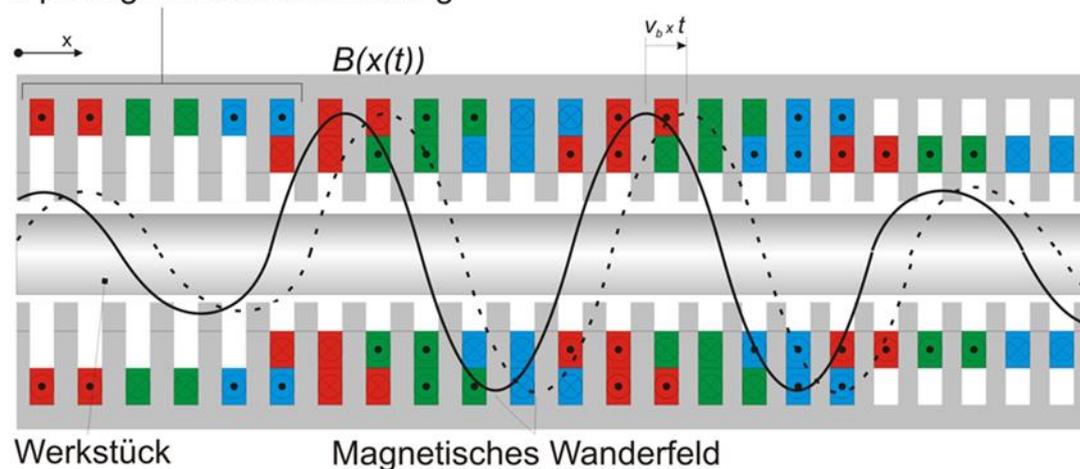


Bild 5-2: Funktionsprinzip des kontaktfreien Vorschubs

Dadurch wird im Luftspalt zwischen den Statoren ein sinusförmiges, magnetisches Wanderfeld in Vorschubrichtung (x-Achse) induziert. Die Feldformer lenken das Magnetfeld in Richtung der Außenkonturen des Werkstücks ab. Im Falle einer Relativ-geschwindigkeit zwischen Magnetfeld und Werkstück, induziert dieses Wirbelströme in das elektrisch leitfähige Werkstück. Die Relativgeschwindigkeit ist hierbei von der Polteilung  $\tau_p$ , sowie der Steuerfrequenz  $f$  der Drehstromwicklung gemäß Gleichung (5-1) abhängig. Die Polteilung ist der mittlere Abstand zwischen zwei benachbarten Polen, bzw. zwei gegensinnig bestromten Spulenseiten einer Phase.

$$v_{rel} = 2 \cdot f \cdot \tau_p \quad (5-1)$$

Durch deren Wechselwirkung wird gemäß der Gleichung (5-2) nach der Lorentz-Regel eine tangentielle Vorschubkraft auf das Werkstück ausgeübt [BUDI-83].

$$F_L = (B \times I) \cdot l \quad (5-2)$$

Da das Werkstück direkt als Läufer fungiert, besitzen dessen elektrischen und magnetischen Eigenschaften einen entscheidenden Einfluss auf die erzielbare Vorschubkraft. Die wesentlichen magnetischen und elektrischen Parameter

metallischer Werkstoffe, welche in der Produktionstechnik häufig Anwendung finden, sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

*Tabelle 1: Elektrische und magnetische Eigenschaften metallischer Werkstoffe [Gob-06]*

Werkstoff	elektrische Leitfähigkeit [S/m]	relative Permeabilität [-]
Kupfer	62	< 1
Aluminium	35	~ 1
Messing	15	~ 1
Stahl	10	300 – 10.000
Edelstahl (1.4301)	1,37	≤ 1,3

Aufgrund dessen, dass eine Vorschubkraft lediglich im Falle einer Relativgeschwindigkeit zwischen dem im Luftspalt induzierten Magnetfeld und dem Werkstück entsteht, existiert ein in Abhängigkeit der elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Blechwerkstoffs, optimaler Betriebspunkt, bei welcher die Vorschubkraft maximal ist. In Bild 5-3 ist der charakteristische Kraftverlauf bei unterschiedlichen als Läufer verwendeten Werkstoffen in Abhängigkeit der Steuerungsfrequenz der Drehstromwicklung, mittels welcher die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Magnetfeld und dem Werkstück gesteuert wird, dargestellt. Mit zunächst steigender Frequenz wird eine Erhöhung der Vorschubkraft erzielt. Wie bereits aus der Theorie der Asynchronmaschinen bekannt, erreicht diese bei einer bestimmten Frequenz ihr Maximum. Bei einer weiteren Übersteuerung der Frequenz kommt es zu einer Kippung des Kraftverlaufs, im sogenannten Kippunkt, sodass die Vorschubkraft wieder abfällt. Die Frequenz, bei welcher das Kraftmaximum erreicht wird, wird daher Kippfrequenz genannt. Es wird ersichtlich, dass mit steigender elektrischer Leitfähigkeit, wie im Falle von Aluminium oder Kupfer, die Kippfrequenz deutlich geringer ausfällt. Aufgrund des relativ hohen induktiven Widerstandes von Eisen liegt der zugehörige optimale Betriebspunkt bei deutlich höheren Frequenzen.

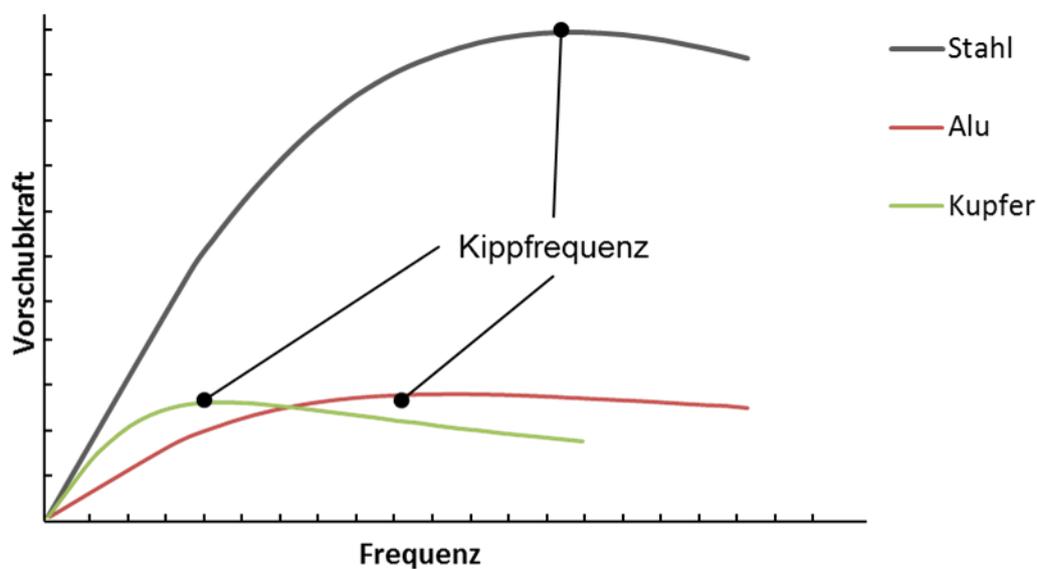


Bild 5-3: Simulativer charakteristischer Verlauf der Vorschubkräfte

Dieses Verhalten kann mittels der Wechselstromlehre wie folgt erläutert werden. Wie bei den üblichen Asynchronmotoren ist ein Schlupf zwischen dem Läufer, d.h. dem Werkstück und dem vom Stator erzeugten Wanderfeld notwendig [Bud-83]. Das magnetische Wanderfeld im Luftspalt des Vorschubs ruft eine Spannungsinduktion im Werkstück hervor, welche zu Wirbelströmen führt. Die Amplitude der induzierten Spannung ist proportional zur Relativgeschwindigkeit zwischen dem Magnetfeld und dem Werkstück. Bei einer synchronen Geschwindigkeit werden demzufolge keine Spannungen induziert und somit keine Vorschubkraft hervorgerufen. Aufgrund der induktiven Eigenschaften des Werkstoffs entsteht jedoch eine Phasenverschiebung zwischen der Induktionsspannung sowie dem Wirbelstrom im Werkstück [Schr-09].

Der Strom eilt der Induktionsspannung um den Phasenwinkel  $\varphi$  nach und tritt somit zeitlich versetzt auf (s. Bild 5-4). Da der induktive Widerstand des Werkstücks zusätzlich frequenzabhängig ist, erhöht sich der Phasenwinkel  $\varphi$  mit steigender Relativgeschwindigkeit.

Dies hat zur Folge, dass Bereiche in denen Wirbelströme auftreten in den benachbarten Magnetpol „wandern“. Da dieser jedoch eine entgegengesetzte Polung aufweist, wird eine Gegenkraft erzeugt und dadurch die resultierende Vorschubkraft geschwächt. Bei einer maximalen Phasenverschiebung von nahezu  $90^\circ$ , welche bei einer theoretisch gesehen unendlich großen Relativgeschwindigkeit eintritt, werden

die Kräfte dadurch vollständig kompensiert. Da der induktive Widerstand nicht nur einen Einfluss auf die Phasenverschiebung zwischen Strom und Magnetfeld besitzt, sondern auch auf die Amplitude der induzierten Ströme, werden darüber hinaus unterschiedliche Kräfte bei den jeweiligen Werkstoffen erzielt

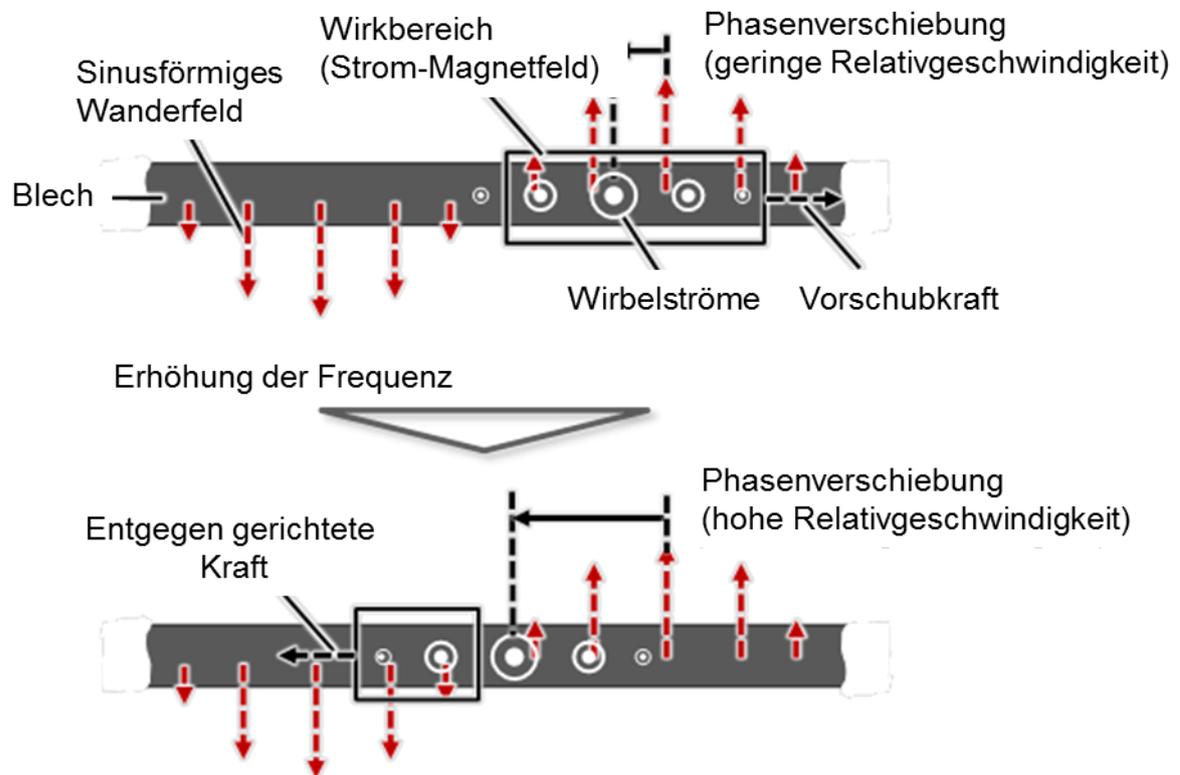


Bild 5-4: Phasenverschiebung zwischen den Wirbelströmen im Werkstück und dem Magnetfeld

## 6 Auslegung und Simulation des Vorschubs

Aufgrund der Komplexität des elektromagnetischen Vorschubsystems und der zugrundeliegenden Wirkzusammenhänge wurde zur Auslegung und Untersuchung der elektromagnetischen und thermischen Vorschubeigenschaften ein Finite-Elemente (FE) Modell des Vorschubs entwickelt. Zur simulationsgestützten Untersuchung wurde die FE-Software Ansys Classic verwendet. Ziel der Analysen war es, zunächst die grundlegenden Einflussparameter auf die erreichbare Vorschubkraft zu ermitteln. Mit dem FE-Modell ist es möglich, den Aufbau bezüglich magnetischen Belastungen zu optimieren, sowie die erzielbaren Vorschubkräfte in Abhängigkeit des Stangenmaterials und der -geometrie (Durchmesser und

Wanddicke) zu ermitteln. Zur Vereinfachung der geplanten Parameterstudien wurde ein APDL (Ansys Parametric Design Language) -Skript in Ansys erstellt, mit Hilfe dessen Parametervariationen zur Vorschubgeometrie sowie zur Ansteuerung (Strom, Frequenz) in mehreren Programmschleifen automatisiert durchlaufen und die Ergebnisse gesichert werden.

### 6.1 Aufbau des Simulationsmodells

Aufgrund des dreidimensionalen Verlaufs des Magnetfeldes und der Wirbelströme im Werkstück wurde entsprechend ein 3D-Modell des Profilstangenvorschubs erstellt. Der Aufbau des Modells ist in Bild 6-1 dargestellt. In grau dargestellt ist der Eisenkern der Spule. In den Nuten sind Wicklungen des Drehstromnetzes eingelassen. Die 3 Phasen werden durch Rot, Grün und Blau, bzw. Gelb, Magenta und Cyan im Rücklauf dargestellt. Die Profilstange ist in goldener Farbe abgebildet. Die Stromvorgabe innerhalb der Nuten erfolgt als Stromdichte, die innerhalb des Querschnitts der Nuten wirkt. Zur Reduktion des Rechenaufwands wurden die symmetrischen Eigenschaften ausgenutzt, sodass lediglich  $\frac{1}{4}$  des Vorschubs abgebildet worden ist. Die Vernetzung des Modells erfolgte primär mit Hexaeder-Elementen. Lediglich für komplexe Volumenbereiche wurden Tetraeder-Elemente

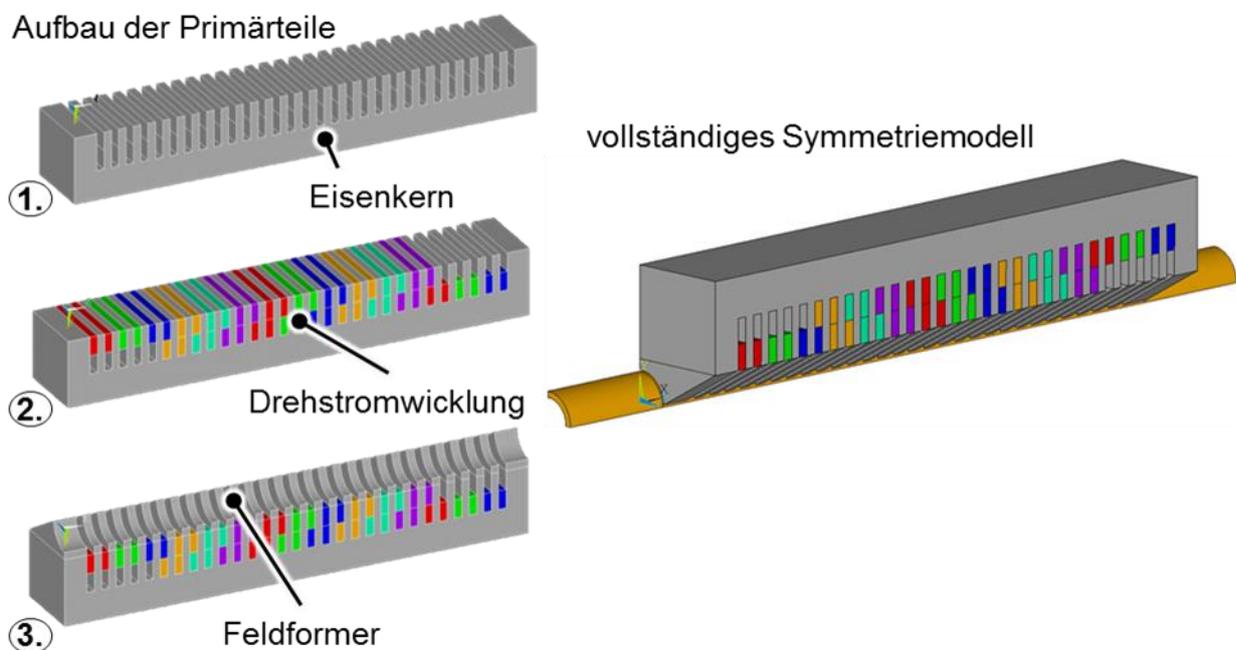


Bild 6-1: 3D-Symmetriemodell des Rundstangenvorschubs

verwendet. Um Stromverdrängungseffekte im Werkstück zu berücksichtigen wurde auf eine ausreichend hohe Anzahl von Elementen in der Werkstücktiefe geachtet (vgl. Bild 6-2). Zur Berücksichtigung von Sättigungseffekten im Eisenkern der Statoren sowie in den Feldformern wurde zudem die nichtlineare Magnetisierungskennlinie des Elektroblechs M350-50A im Materialmodell hinterlegt (Bild 6-3), wie dieses auch für den Demonstrator vorgesehen ist. Dies ist zur Sicherstellung einer hohen Modellgenauigkeit unerlässlich.

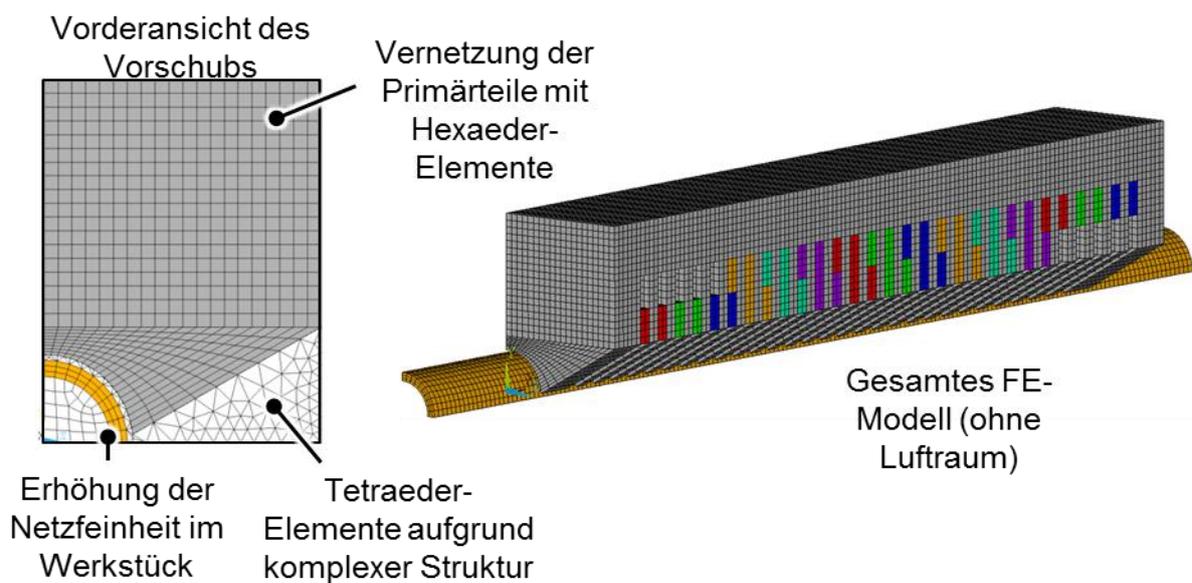


Bild 6-2: Vernetzung des Vorschubmodells

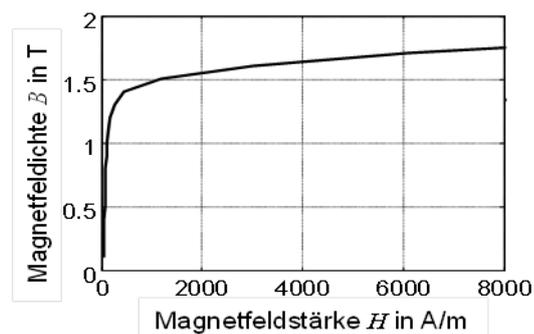


Bild 6-3: Im Modell hinterlegte Magnetisierungskennlinie des E-Blechs M350-50A

## 6.2 Simulationsergebnisse

### 6.2.1 Magnetfeldverteilung

Die Magnetfeldverteilung ergibt sich aus der Lage und Anzahl der Pole des Primärteils. Das Magnetfeld wird am Anfang der Stange aufgebaut und am Ende der Stange wieder abgebaut. Dazwischen ergibt sich ein sich wiederholender Verlauf der magnetischen Pole, wie in Bild 6-4 zu sehen ist. Dargestellt wird die magnetische Induktion im Werkstück zu verschiedenen Zeitpunkten  $t_1$  bis  $t_4$ . Zusätzlich wird die Position eines Pols  $P_1$  zu den genannten Zeitpunkten markiert. Wie zu sehen ist, bewegt sich der Pol mit der Zeit entlang der Längsachse der Stange. Die Geschwindigkeit der Bewegung der Pole kann aus der Frequenz der angelegten Ströme ermittelt werden. In den roten Bereichen ist eine hohe Induktion zu sehen, in den blauen Bereichen eine geringe Induktion. Hierdurch kann die Ausbildung der Pole identifiziert werden.

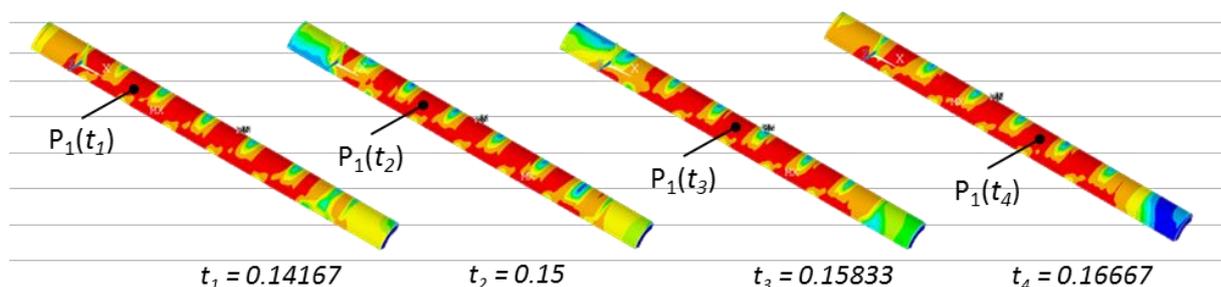


Bild 6-4: Magnetische Induktionsverteilung im Werkstück

Äquivalent dazu sind die Pole im Eisenkern und den darauf applizierten Feldformern ausgebildet, wie in Bild 6-5 zu sehen ist. Im Bild wird die Induktionsverteilung im Primärteil und in den Feldformern gezeigt. In dieser Darstellung sind die Feldformer entlang der durch die Pfeile gezeigten Richtung aufgeklappt, sodass die Kontaktflächen zwischen dem Primärteil und den Feldformern sichtbar sind. Es ist zu erkennen, dass die Feldformer die geplante Funktion, das Magnetfeld umzuleiten, erfüllen. Die magnetische Induktion konzentriert sich in den Randbereichen der Feldformer.

### 6.2.2 Wirbelstromverteilung

Durch die Bewegung des magnetischen Feldes werden im Werkstück Wirbelstromfelder angeschoben.

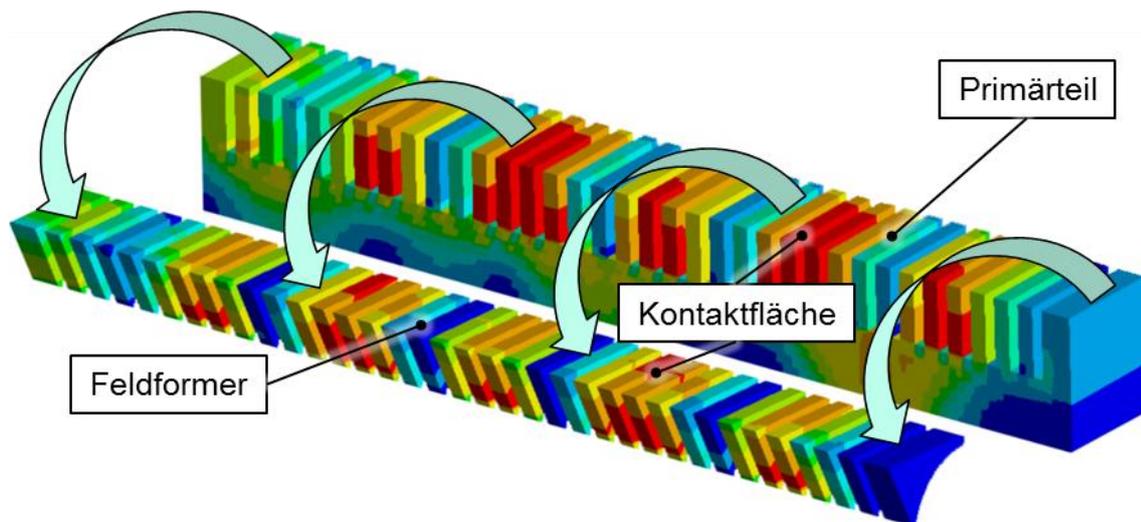


Bild 6-5: Magnetfeldverteilung in Eisenkern und Feldformer, aufgeklappt

Diese lassen sich durch ihre kreisförmige Form charakterisieren.

Der Verlauf der Wirbelströme ist in Bild 6-6 dargestellt. Entsprechend der magnetischen Pole bildet sich ein Wirbelstromfeld aus, welches die gleiche Polteilung wie das Magnetfeld aufweist. In den roten Bereichen ist eine hohe Wirbelstromdichte zu sehen. Diese bildet sich an den seitlichen Rändern der Stange aus. Die Wirbelstromdichte erreicht dabei in den roten Bereichen eine Höhe von bis zu  $70 \text{ A/mm}^2$ .

### 6.2.3 Kippfrequenz

Die Kippfrequenz stellt diejenige Frequenz dar, bei welcher die maximale Vorschubkraft erreicht wird. Grundsätzlich gilt, dass sich die Vorschubkraft proportional zur Frequenz der Bestromung verhält. Diese Proportionalität gilt bis zu einem Maximum, bei welchem das Magnetfeld senkrecht zur Bestromung reicht. Ab dieser Frequenz beginnt der Feldschwächebetrieb. Hierbei wird das durch die Permanentmagneten erzeugte Feld durch ein elektrisches Gegenfeld geschwächt, wodurch die maximale Vorschubkraft nicht mehr zur Verfügung steht.

Die Vorschubkraft für ein Rohr mit dem Durchmesser  $\text{Ø}60 \text{ mm}$  und einer Wanddicke von  $3 \text{ mm}$  ist in Abhängigkeit der Frequenz in Bild 6-7 dargestellt. Die graue Linie zeigt die Vorschubkraft eines Stahlrohrs gegenüber der Frequenz. Analog dazu sind die Kraftverläufe für ein Aluminium- und Kupferrohr abgebildet. Die Vorschubkraft ist

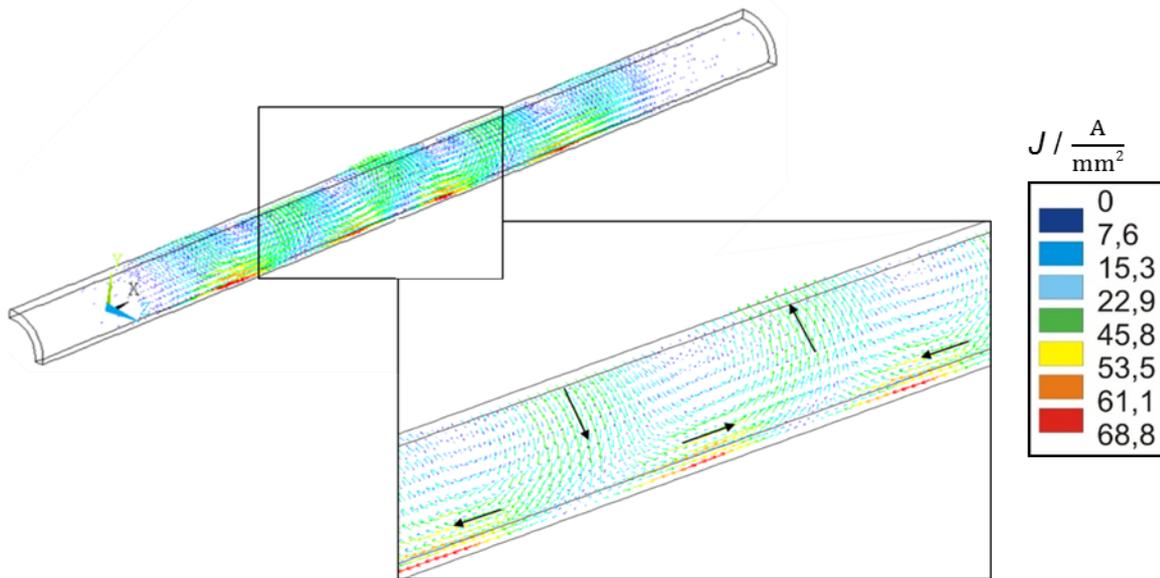
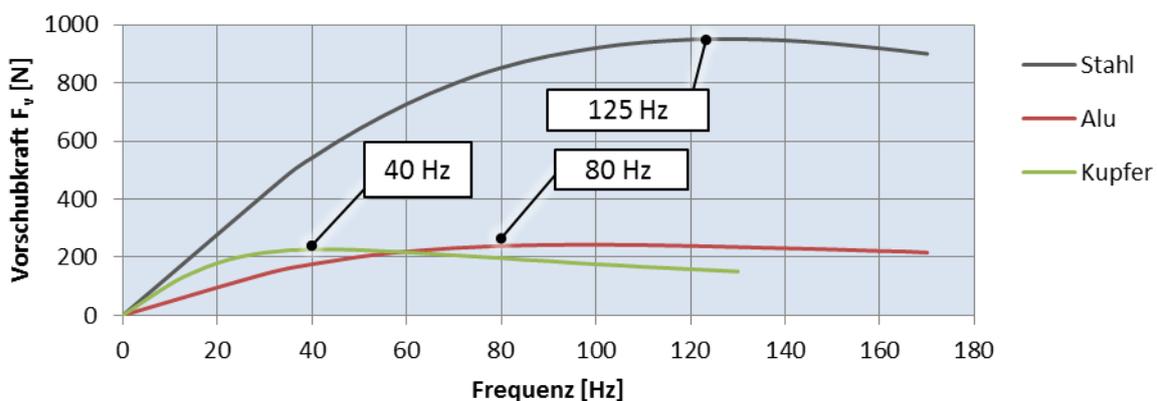


Bild 6-6: Wirbelstromverlauf im Werkstück

### Vorschubkraft

abhängig von den Materialien und der Geometrie der Werkstücke, sowie der Bestromung und der Ausmaße der Primärteile. Zur Bestimmung der Vorschubkräfte bei unterschiedlichen Materialien wurden simulativ Rohre aus den Materialien Stahl, Kupfer und Aluminium untersucht. Die Vorschubkräfte beim Verschieben von Eisen fallen deutlich höher aus, aufgrund der magnetischen Leitfähigkeit des Eisens. Der Rückschluss des magnetischen Kreises erfolgt in diesem Fall durch das Eisen, wodurch der magnetische Widerstand des Kreises gering ist. Da sowohl Kupfer als auch Aluminium paramagnetisch sind, können diese Materialien nicht als magnetischer Rückschluss dienen.

Bild 6-7: Simulierte Kippfrequenzen verschiedener Werkstoffe, Rohr mit  $\varnothing 60$  mm

Der Rückschluss erfolgt daher über den Luftspalt, wodurch der Widerstand des magnetischen Kreises steigt. Dies hat zur Folge, dass sich eine nur schwache magnetische Induktion ausbildet. Die resultierende Vorschubkraft ist proportional zum Magnetfeld und in Folge dessen ebenfalls geringer als bei magnetischen Werkstoffen. In Bild 6-8 ist die erreichbare Vorschubkraft gegenüber der Wandstärke des Werkstücks abgebildet. Das Bild gibt zu erkennen, dass der Induktionseffekt vorwiegend auf der Oberfläche wirkt. Bei dünnwandigen Rohren besteht eine große Abhängigkeit zwischen Wanddicke und erreichbarer Vorschubkraft. Ab einer Wandstärke von 3 mm wird die maximal erreichbare Kraft erzielt und verbleibt bei stärkeren Wanddicken beim Maximum. Diese Berechnung wurde bei der Kippfrequenz von  $f=120$  Hz eines Stahlrohres durchgeführt. Die Eindringtiefe des Magnetfeldes ist abhängig von der Frequenz des eingepprägten Stromes. Je höher die Frequenz des Stromes ist, desto geringer ist die Eindringtiefe des Magnetfeldes. Zur Ermittlung der Eindringtiefe in Abhängigkeit der Stromfrequenz wurde das entstehende Magnetfeld im Werkstück unter Variation der Frequenz untersucht. Hierbei wurde im Querschnitt des Rohres ausgewertet, bis zu welcher Tiefe das Magnetfeld in das Rohr eindringt.

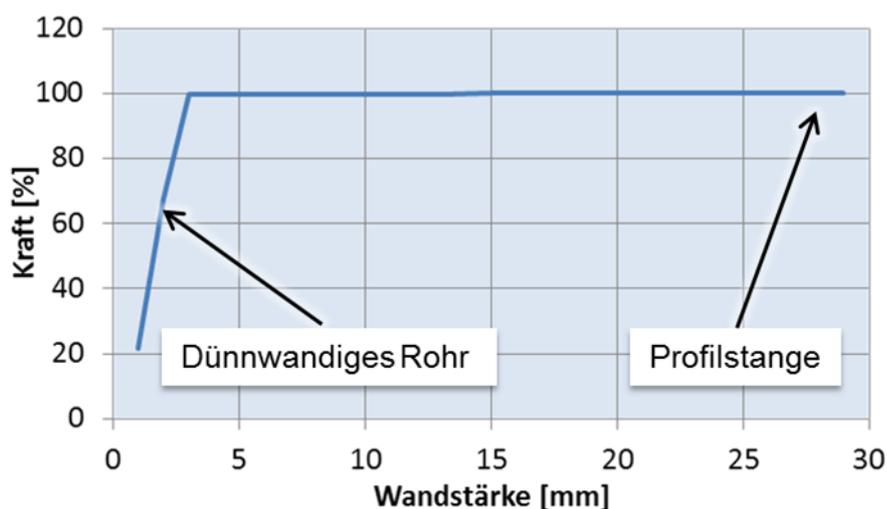


Bild 6-8: Vorschubkraft bei unterschiedlichen Wanddicken

Die Ergebnisse sind in Bild 6-9 dargestellt. Auf dem Bild ist der Querschnitt eines Rohres mit 10 mm Wanddicke zu sehen. Wie auf dem Bild ersichtlich ist, dringt das Magnetfeld bei der Frequenz von 20 Hz deutlich tiefer in das Material ein als bei 120 Hz. Die Eindringtiefe in Abhängigkeit der Frequenz ist in der Tabelle darunter

aufgelistet. Die Kippfrequenz für Aluminium liegt bei ca. 80 Hz. In diesem Fall würde beim Vorschub eines Aluminiumrohres ab einer Wandstärke von 4,61 mm die maximale Vorschubkraft zur Verfügung stehen.

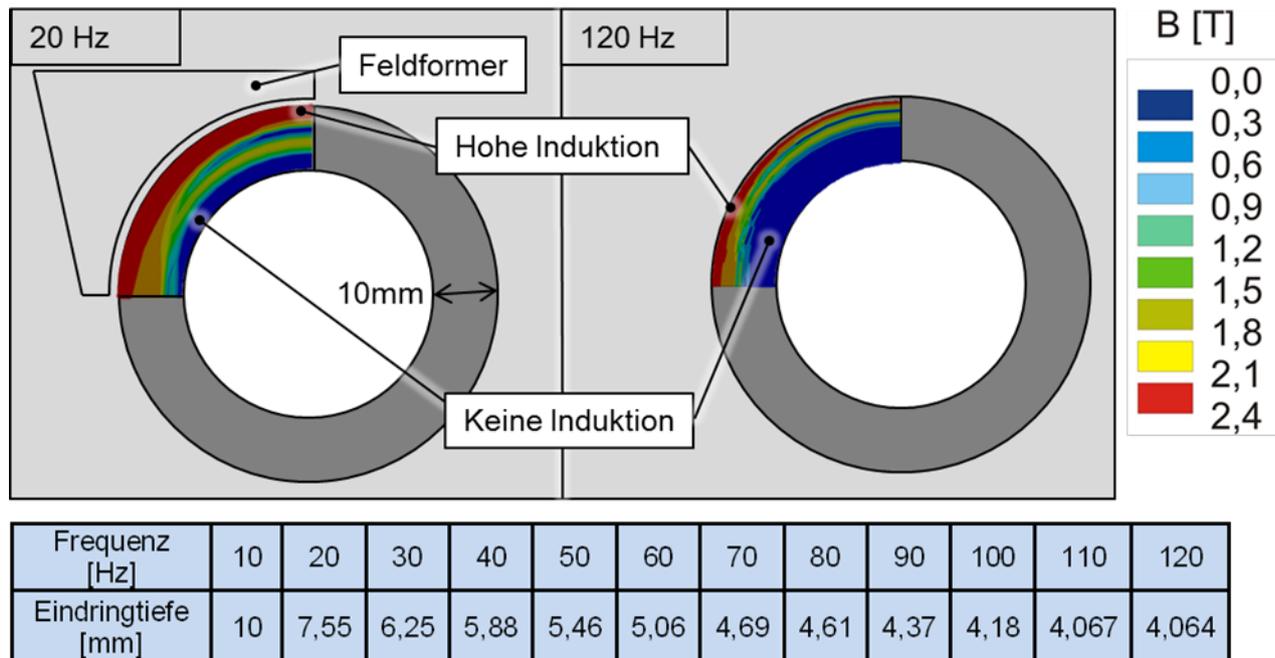


Bild 6-9: Eindringtiefe des Magnetfeldes

### 6.3 Eigenschaften der Feldformer

Im Folgenden wurden die Eigenschaften und Funktion der Feldformer untersucht. Mittels der Feldformer werden der Luftspalt und folglich der magnetische Widerstand minimiert, wodurch sich ein stärkerer magnetischer Kreis ausbildet. Die Notwendigkeit für den Einsatz von Feldformern ist in Bild 6-10 erkennbar. Auf der Grafik sind die resultierenden Vorschubkräfte abgebildet, die sich bei a) einer Verringerung des Stangendurchmessers ergeben, wobei die Geometrie der Feldformer angepasst wird, um den Luftspalt konstant zu halten und b) bei Verringerung des Stangendurchmessers, ohne dass die Feldformer angepasst werden, was einen größeren Luftspalt verursacht. In beiden Fällen besteht ein proportionaler Zusammenhang zwischen Stangendurchmesser und maximaler Vorschubkraft. Im Falle angepasster Feldformer fällt diese Abhängigkeit jedoch weniger drastisch aus. Die Reduzierung ergibt sich hier aus der geringer werdenden Wirkoberfläche bei kleineren Durchmessern. Im Falle nicht angepasster Feldformer entsteht zusätzlich der Effekt eines höheren magnetischen Widerstands im

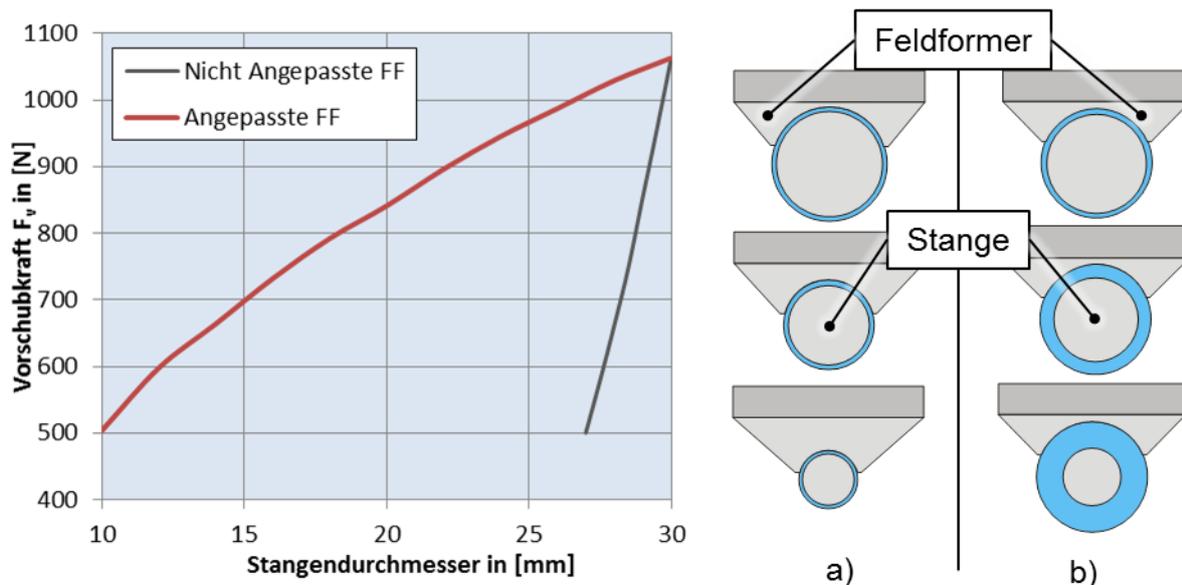


Bild 6-10: Kraftverlauf mit / ohne angepassten Feldformern

Eisenkreis, aufgrund des größer werdenden Luftspaltes zwischen Feldformer und Werkstück. Bei einer Luftspaltbreite von  $\delta_{\text{Luft}} = 1 \text{ mm}$  resultiert eine Vorschubkraft von ca. 1050 N, diese sinkt annähernd linear um etwa 100 N pro 0,5 mm größerem Luftspalt ab. Ein minimaler Luftspalt ist daher wünschenswert. Die untere Grenze der Luftspaltbreite von 1 mm hat konstruktive Hintergründe. Bei der Minimierung des Luftspaltes muss ein Kontakt zwischen Primärteil und Werkstück weiterhin ausgeschlossen sein, da es sonst zu Beschädigungen am System kommen kann.

Der Überdeckungswinkel  $\varphi_{\text{ue}}$  beschreibt, zu welchem Grad die Profilstange von den Feldformern umschlossen wird. Ein Überdeckungswinkel von  $\varphi_{\text{ue}} = 180^\circ$  bedeutet eine komplette Überdeckung zwischen dem Feldformer und dem Werkstück (vgl. Bild 6-11 a)). In Bild 6-11b) ist der unterschiedliche Verlauf der Magnetfeldlinien bei Verwendung eines magnetischen bzw. nicht-magnetischen Werkstücks dargestellt. Das magnetische Werkstück begünstigt den Rückschluss des Magnetfeldes, indem es das Magnetfeld leitet. Wie im Bild dargestellt müssen die Feldlinien lediglich den Luftspalt überbrücken. Bei nicht-magnetischen Werkstoffen erfolgt der Rückschluss über den Luftspalt und tangiert dabei lediglich Bereiche des Werkstücks. Die Ausbildung des Magnetfeldes wird dabei nicht von der Profilstange begünstigt, wodurch sich ein schwächeres Magnetfeld ausbildet. In Bild 6-12 sind die Ergebnisse der Variationsrechnung des Überdeckungswinkels zu sehen. Hier ist die Kraft in Abhängigkeit des Überdeckungswinkels zum einen für eine Stahlstange und zum

anderen für eine Aluminiumstange abgebildet. In beiden Fällen wird die maximale Vorschubkraft bei einem Überdeckungswinkel von  $170^\circ$  erreicht.

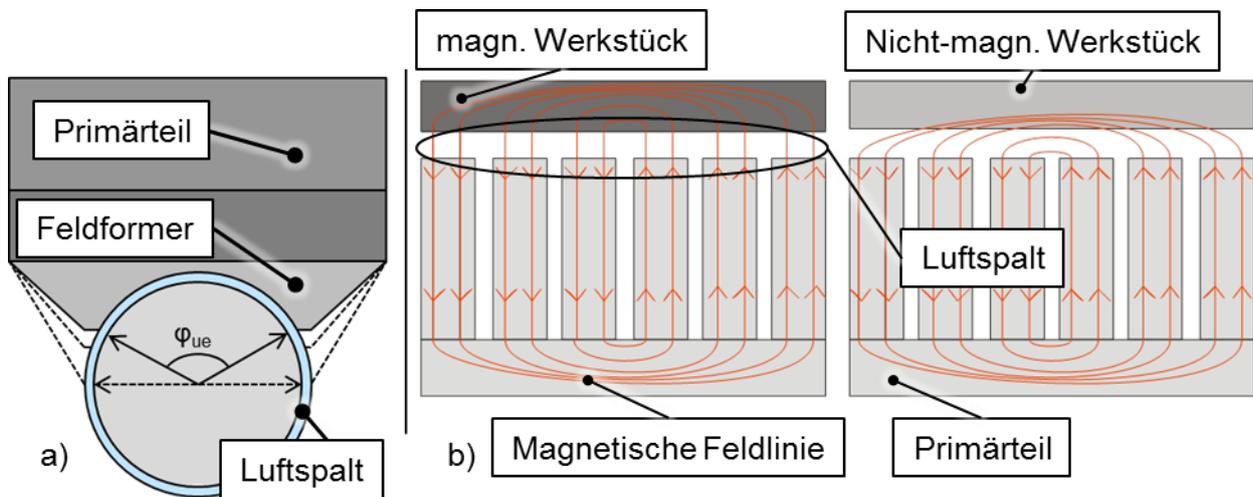


Bild 6-11: a) Überdeckungswinkel zwischen Feldformer und Werkstück und b) Feldlinienverläufe

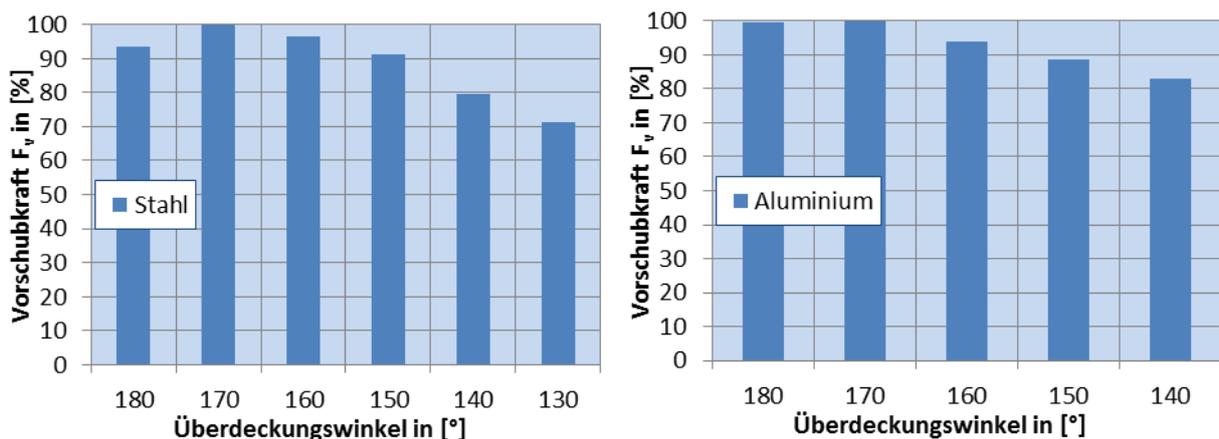


Bild 6-12: Vorschubkraft in Abhängigkeit der Feldformerüberdeckung

### 6.3.1 Feldformeradaption auf weitere Profilformen

Die Feldformer dienen als Verbindungsglied zwischen dem flachen Primärteil und den Konturen der Werkstücke, die bewegt werden sollen. Bislang wurden hierfür exemplarisch Rundprofile analysiert. Die Anpassung der Feldformer an andere Geometrien ist ebenfalls denkbar. Es wurden daher noch weitere Feldformergeometrien modelliert, mittels derer der Vorschub von Vierkant-, oder Sechskantstahl erfolgen kann (vgl. Bild 6-13). Die Feldformer wurden wie im Bild dargestellt, entsprechend der Geometrie der Profilstange ausgerichtet um einen möglichst kleinen Luftspalt einzuhalten. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das

Vorschubprinzip auf weitere Profilformen erweiterbar ist. Die erreichbaren Vorschubkräfte dieser Profile sind in Bild 6-14 abgebildet. Es sind die Vorschubkräfte gegenüber der angelegten Frequenz am Vorschub zu sehen. Wie schon für Rundstangen gezeigt, bildet sich hier ein Maximum der erreichbaren Kräfte bei der Kippfrequenz aus. Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen der Rundstangen lassen sich ebenfalls auf weitere Profilformen anwenden.

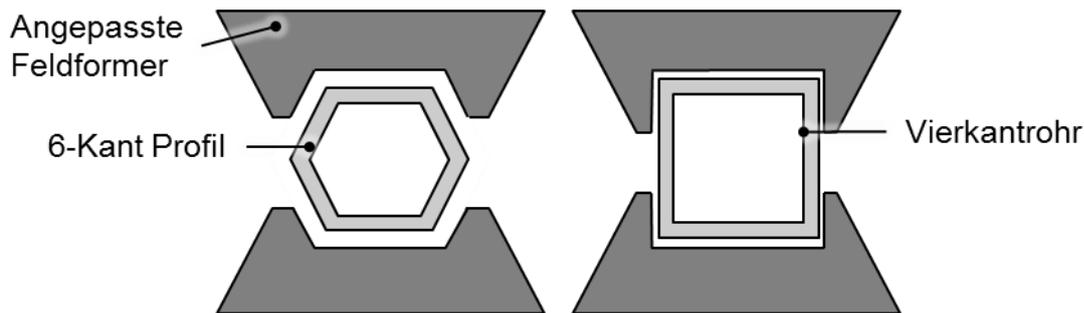


Bild 6-13: Simulation weiterer Profilformen

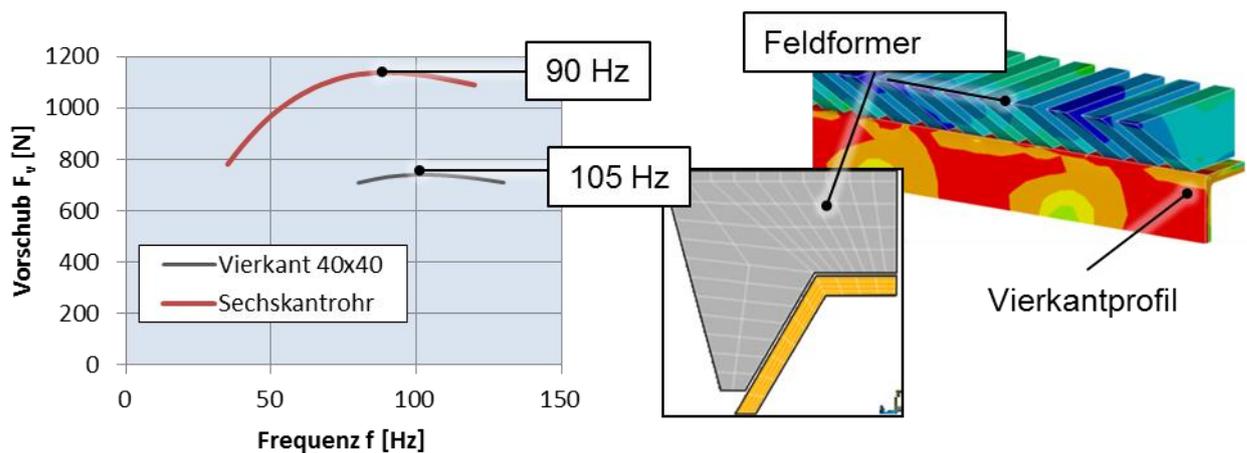


Bild 6-14: Simulationsergebnisse Vierkantprofil

#### 6.4 Zweckmäßigkeit der durchgeführten Arbeiten

Die in Kapitel 6 beschriebenen Simulationen waren zweckmäßig und für die weitere Projektbearbeitung unerlässlich. Die Entwicklung eines detailgetreuen FEM Modells war entscheidend für eine realitätsnahe Abbildung der elektromagnetischen Felder im Vorschub sowie der erzielbaren Vorschubkräfte. Mittels der simulativen Untersuchung des Vorschubsystems konnten die grundlegenden Eigenschaften des Vorschubs umfassend ermittelt werden.

Insbesondere die Notwendigkeit der Verwendung von Feldformern wurde dadurch hervorgehoben. Erst im Rahmen der Simulation konnten die hohen Anforderungen an die Statoren hinsichtlich der Induktivitätsarmut und vor allem auch der Wicklungsart und -verteilung erkannt werden.

Basierend auf der Simulation konnte anschließend eine optimierte Auslegung der Statoren erfolgen, welche als Grundlage für die Fertigung eines Demonstrators dienen. Mittels dieser Grundlage wurde eine Baugröße ermittelt, welche für den Einsatz im industriellen Umfeld geeignet ist. Ohne das erforderliche FE-Modell des Vorschubs könnten somit die weiteren Arbeitspunkte nicht bearbeitet werden.

## 7 Konstruktion und Fertigung eines Demonstrators

Die Validierung des Ansys Modells des elektromagnetischen Rundstangenvorschubs erfolgt anhand experimenteller Untersuchungen, weshalb ein Demonstrator konstruiert und gefertigt worden ist.

### 7.1 Konstruktion

Ausgehend von den zuvor mittels der Simulation ermittelten Statorparametern wurde ein Demonstrator konstruiert. Der Gesamtaufbau ist dem Bild 7-1 zu entnehmen. Der Vorschub besteht aus zwei Rahmenteilen, in welche die Statoren fest eingespannt werden. Der Vorschub wird rein passiv mittels auf dem Statorrücken applizierter Rippenkühlkörper gekühlt. Eine aktive Kühlung ist nicht erforderlich.

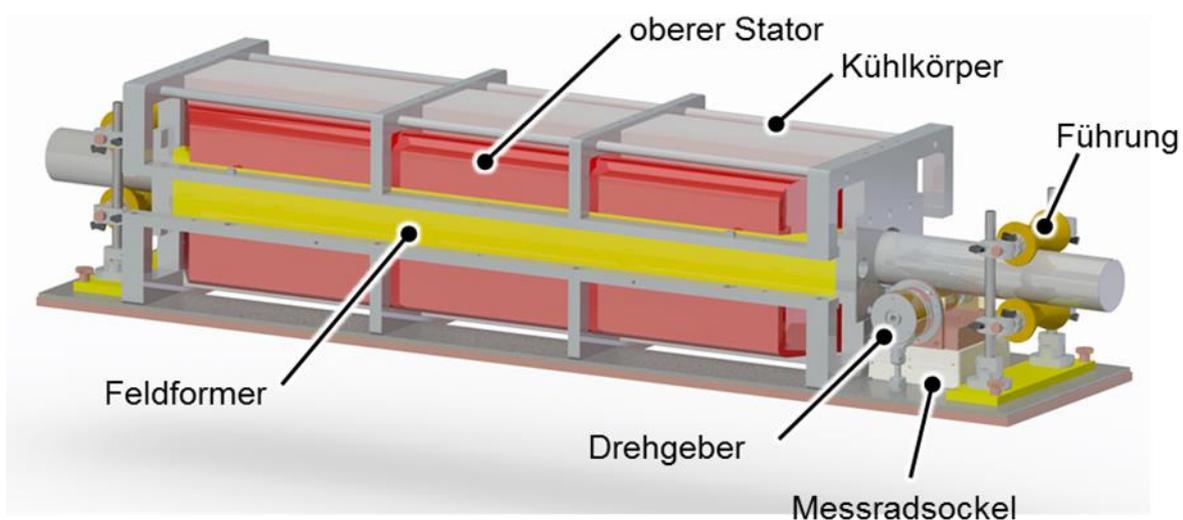
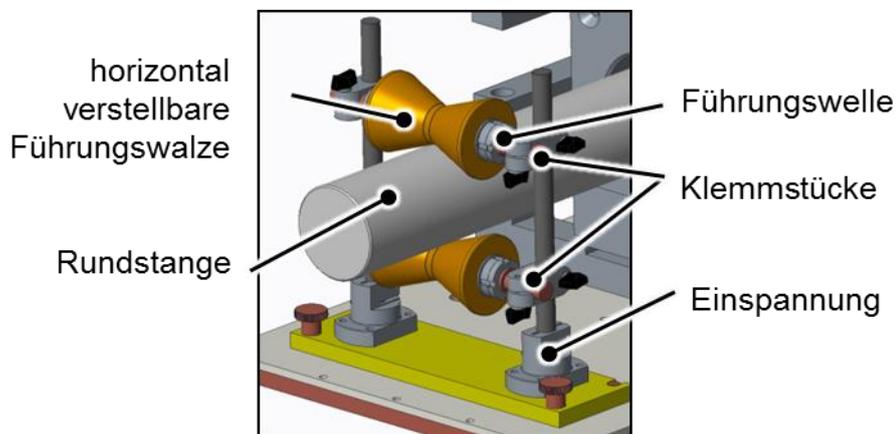


Bild 7-1: CAD Modell des Rundstangenvorschubs

Ein- und Auslaufseitig wird die Rundstange sowohl in vertikaler als auch horizontaler Richtung mit Hilfe kegelförmiger Walzen geführt (Bild 7-2). Diese sind in vertikaler Richtung verstellbar, um Rundstangen oder Rohre unterschiedlicher Durchmesser vorschieben zu können. Die Vorschubwegerfassung erfolgt über einen hochauflösenden optischen Sensor. Als Sensor wird der Typ 5825 der Firma Kübler GmbH verwendet. Dieser weist eine maximale Auflösung von 10.000 Pulse pro Umdrehung auf, was einem Vorschubweg von 157 mm entspricht. Dadurch wird eine sehr präzise Positionierung im weiteren Projektverlauf ermöglicht. Der Sensor ist mit einer Welle gekoppelt, auf die eine gummierte Walze montiert ist. Die Walze wird mittels einer höhenverstellbaren Grundplatte an das Werkstück angedrückt. Die Platte ist über 4 Schrauben mit dem Sockel verbunden.



*Bild 7-2: Vorrichtung zur Führung der Rundstangen*

Entlang dieser Schrauben verläuft eine Feder, welche die Grundplatte, und damit auch die PU-Walze, mit einstellbarer Kraft an das Werkstück drückt. Des Weiteren wird durch die Feder sichergestellt, dass auch bei Unebenheiten auf der Oberfläche des Werkstücks ein Kontakt zur PU-Walze sichergestellt ist (vgl. Bild 7-3). Die Werkstückbewegung wird somit über eine reibschlüssige Kraftübertragung erfasst.

Der Feldformer besteht aus einzelnen weichmagnetischen Elementen. Diese werden in Zwischenelemente eingeklebt (Bild 7-4), welche aus dem harten Kunststoff Polyoxymethylen (POM) bestehen. Die Anzahl der Feldformerelemente entspricht der Anzahl der Statorzähne. Diese haben einen Innenradius von 31 mm, sodass eine Stange mit Durchmesser von 60 mm unter Einhaltung eines 1 mm Luftspaltes bewegt werden kann.

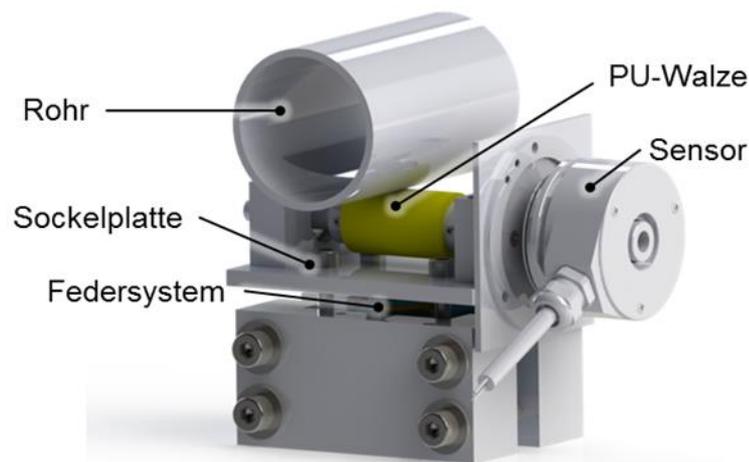


Bild 7-3: Sensorvorrichtung

## 7.2 Fertigung

Zur Validierung der Simulationsergebnisse und Prüfung der praktischen Funktionstauglichkeit wurde ein Demonstrator des Vorschubs auf Basis der Konstruktion gefertigt. Ein Hauptbestandteil der Arbeiten bestand in der Fertigung der Statoren des Vorschubs.

Die Aufgabe der Statoren besteht in der Erzeugung sowie der Führung des magnetischen Feldes, welches mittels der im Eisenkern eingelegten Drehstromwicklung erzeugt wird. Um hohe Wirbelströme im Werkstück zu induzieren, die entscheidend für hohe Vorschubkräfte sind, bedarf es einer hohen Relativgeschwindigkeit zwischen dem magnetischen Wanderfeld, welche durch die Steuerungsfrequenz der Drehstromwicklung bestimmt wird, sowie dem Werkstück. Hohe Frequenzen können erreicht werden, wenn die Stranginduktivität der Statoren gering ist. Aus diesem Grund werden die Spulen als gesehnte Formspulen aus rechteckigem Kupferlackdraht ausgeführt.

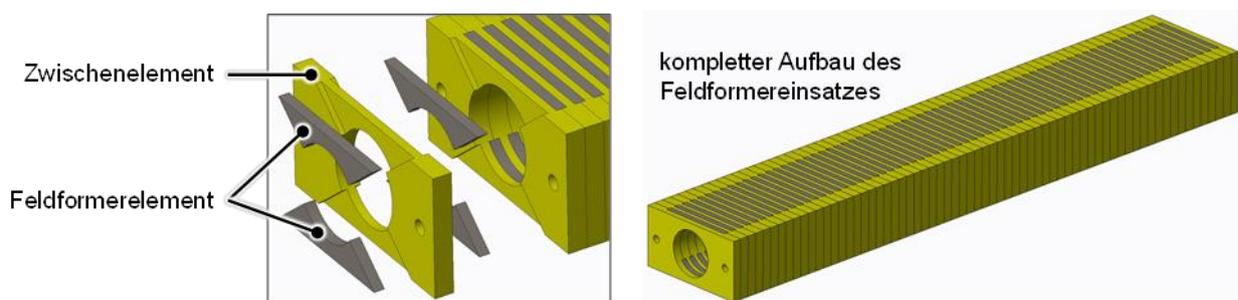


Bild 7-4: CAD Modell des Feldformers

Die Herstellung der Formspulen, zunächst bestehend aus einem flachen Kupferlackdraht mit einem Querschnitt von  $5 \times 1 \text{ mm}^2$ , erfolgte mittels eines Wickel- sowie Formwerkzeugs (Bild 7-5). Die Fertigung der Formspulen erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wurden die Spulen mit der erforderlichen mittleren Spulenlänge sowie Schichtanzahl vorgewickelt. Dieser vorgeformte Rohling wird anschließend in das Formwerkzeug eingespannt und die Spulenseiten bis zum Erreichen der notwendigen Spulenweite von 62,5 mm in seitlicher Richtung geschränkt. Über das integrierte Zahnradpaar erfolgt eine gegenseitige Verfahrbewegung der Spulenseiten bis die gewünschte Spulenweite erreicht ist. Während des Schränkvorgangs sind die Spulenden bis auf einen Freiheitsgrad fest eingespannt. Insgesamt wurden 120 Formspulen für den Vorschub angefertigt. Die Spulen werden in die Nuten des Eisenkerns eingelegt. Dieser wird zur Reduzierung von Wirbelströmen und der damit einhergehenden Erwärmung des Eisenkerns geblecht ausgeführt. Dafür werden mehrere dünne mit einem speziellen Backlack beschichtete Elektrobleche aus dem standardisierten Elektroblech M270-50A mit einer Blechstärke von 0,5 mm zu stabilen Paketen verbacken, sodass jeder Stator mit einer Gesamtbreite von 100 mm aus 200 Einzelblechen besteht.

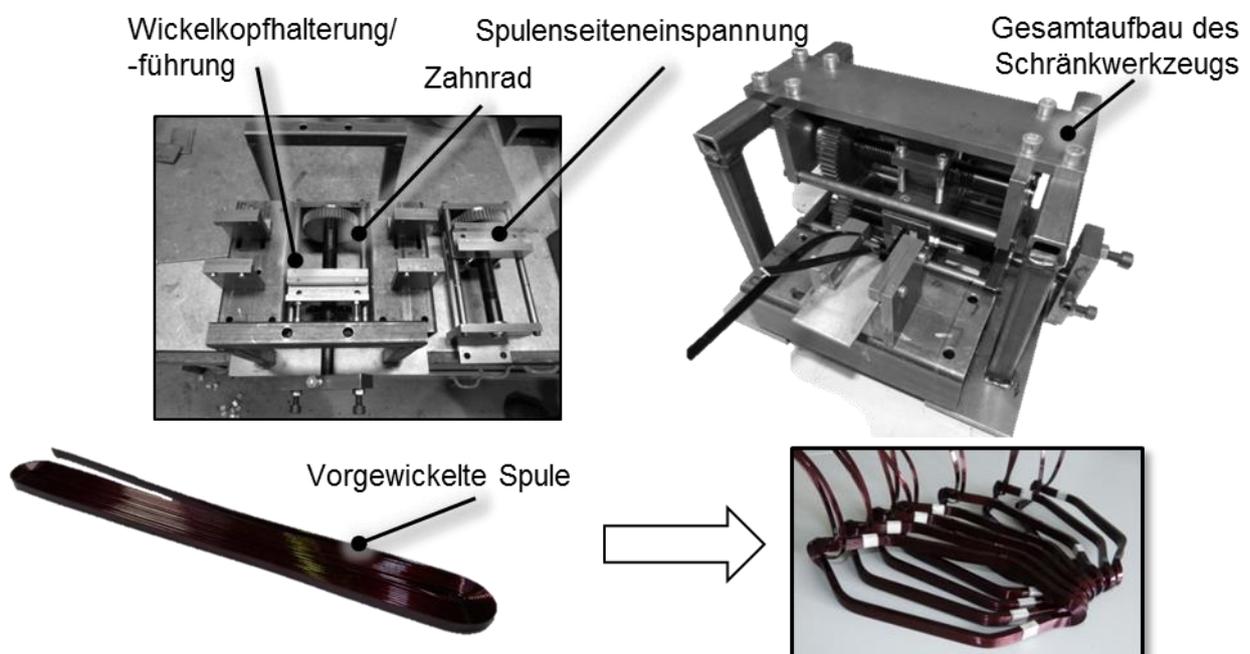


Bild 7-5: Spulenwickelwerkzeug

Die einzelnen Bleche werden im ersten Schritt zunächst basierend auf den Konstruktionszeichnungen mittels des Laserschneidverfahrens zugeschnitten. Dabei wurden insgesamt je Einzelblech 65 Nuten mit einem Querschnitt von  $30 \times 5,5 \text{ mm}^2$  ausgeschnitten. Nach Zuschnitt der Bleche wurden diese paketiert und anschließend in einem Ofen bei einer Temperatur von etwa  $200^\circ \text{C}$  verbacken. Bei der Temperierung schmilzt die Backlackschicht, welche auf jedem Blech einseitig aufgetragen ist, und härtet im nachfolgenden Abkühlprozess vollständig aus. Die Höhe des Eisenkerns beträgt  $60 \text{ mm}$  und die Länge  $855,5 \text{ mm}$  (s. Bild 7-6).



Bild 7-6: Eisenkern des Motors

Im zweiten Schritt erfolgt das Einlegen der Formspulen in die Nuten. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Ausformung der Spulen bei  $5 \text{ mm}$  breitem Draht nicht ausreichend homogen zu fertigen ist, sodass die Spulen nicht spannungsfrei in die Nuten eingelegt werden konnten. Aus diesem Grund wurde Draht mit einer Breite von  $4,5 \text{ mm}$  verwendet um sicherzustellen, dass die Spulen beim Einlegen nicht beschädigt werden. Die Nuten wurden vorher mit spezieller Isolationsfolie ausgekleidet. Die zusätzliche Isolation ist notwendig, da es beim Einlegen der Spulen in die Nuten zum Abrieb der Lackschicht des Drahts kommen kann, wodurch das Kupfer in den Drähten mit dem Eisenkern in Kontakt geraten kann. Dies würde einen Kurzschluss nach sich ziehen, was zwingend zu vermeiden ist. Nach dem Einlegen wurden die einzelnen Spulenden der einzelnen Phasen nacheinander verlötet. Um eine ausreichende Festigkeit der Isolation sicherzustellen, erfolgte ein Durchschlagsspannungsfestigkeitstest.

Die Durchschlagfestigkeit wurde mit einer Prüfspannung von  $2500 \text{ V}$  nachgewiesen. Nach erfolgreicher Prüfung wurden die Statoren per Tauchverfahren in einem für Elektromotoren speziellen Tränkharz getränkt sowie im Anschluss zusätzlich

vergossen. Dies diente der Erhöhung der sowohl mechanischen als auch elektrischen Stabilität. Das Ziel des Tränkens ist es, die geringen verbleibenden Lufträume im Statorinneren zu unterbinden, da diese eine geringere elektrische Durchschlagsfestigkeit der Statoren zur Folge haben. Beim Tränken werden die Statoren vollständig in ein temperiertes Tauchbad eingelassen und für mehrere Stunden in diesem belassen. Durch Erwärmung des Tränkmittels wird die Viskosität verringert, sodass das Tränkmittel infolge der Kapillarwirkung auch in kleinste Lufträume eindringen kann. Anschließend an das Tränken werden die Primärteile getrocknet, damit das an der Oberfläche verbliebende Harz vollständig aushärten kann. Zur weiteren Erhöhung der Festigkeit, insbesondere gegen Schwingungen, welche während des Betriebs aufgrund der Anziehungskräfte von den Wickelköpfen ausgeübt werden, erfolgte im letzten Schritt das Eingießen der Statoren in Polyurethan (PU)-Gießharz. Hierfür wurde eine Verschalung um das Primärteil gebaut. Die einzelnen Schritte sind in Bild 7-7 abgebildet. Das Epoxidharz widersteht einer maximalen Temperatur von ca. 200° C, bevor sich die Struktur zersetzt. Diese Temperatur darf im Betrieb nicht überschritten werden. Um dies sicherzustellen, wurden Thermoelemente auf dem Eisenkern appliziert, mittels derer die Temperatur während des Betriebs überprüft wird und bei Überhitzung ggf. Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können.

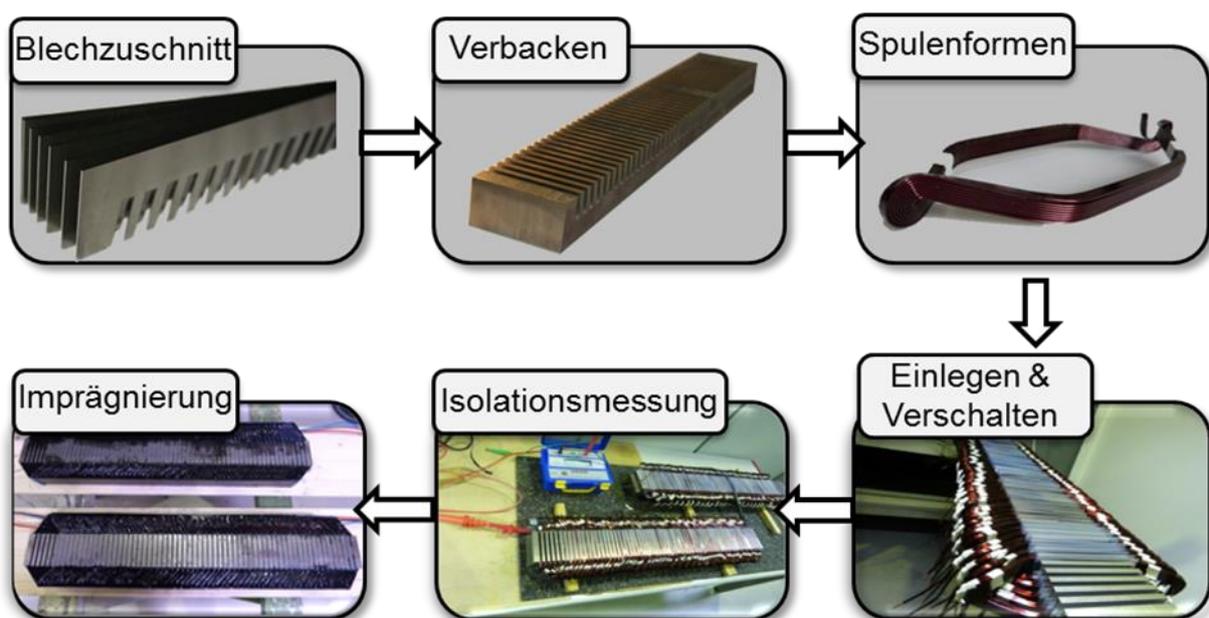


Bild 7-7: Fertigungsschritte der Statoren

Die wesentlichen Parameter des gebauten Vorschubs sind in der nachfolgenden Tabelle 2 zusammengefasst. Die Nenngrößen beschreiben den Arbeitspunkt, bei welchem das System dauerhaft arbeiten kann, ohne dass es zu Überhitzungen oder anderen Fehlern kommt.

Tabelle 2: Vorschubparameter

Parameter	Wert
Nennspannung	400 V
Nennstrom / Max. Strom	30 A / 50 A
Nennfrequenz (Serienschaltung)	65 Hz
Strangwiderstand	3,5 $\Omega$
Stranginduktivität / Stator	~9 mH
Stranginduktivität	~19 mH
Polzahl	11
Polteilung	50 mm
Geometrie Eisenblechpaket [BxHxL]	100 x 60 x 855,5 mm <sup>3</sup>

### Stranginduktivität

Aufgrund der Entscheidung, Drähte mit einer Breite von 4,5 mm anstatt 5 mm zu verwenden, steigt innerhalb der Nuten der nicht-stromdurchflossene Bereich. Aus diesem Grund steigt die Induktivität des Primärteils an. Mit höherer Induktivität steigt der induktive Widerstand an, welcher sich proportional zur Frequenz verhält. Es gilt

$$\underline{U}_{Str} = \underline{Z} \times \underline{I} = \sqrt{R^2 + (2\pi \times f \times L)^2} \times \underline{I}. \quad (7-1)$$

Da

$$R \ll (2\pi \times f \times L), \quad (7-2)$$

daraus folgt

$$\underline{I} = \frac{U_{Str}}{2\pi \times f \times L} \quad (7-3)$$

Der maximale Strom ist daher antiproportional zur Induktivität der Spulen. Hieraus wird ersichtlich, dass die Induktivität möglichst gering sein muss, damit auch hohe Frequenzen der Wanderwelle bei Nennstrom bereitgestellt werden können (vgl. Bild 7-8).

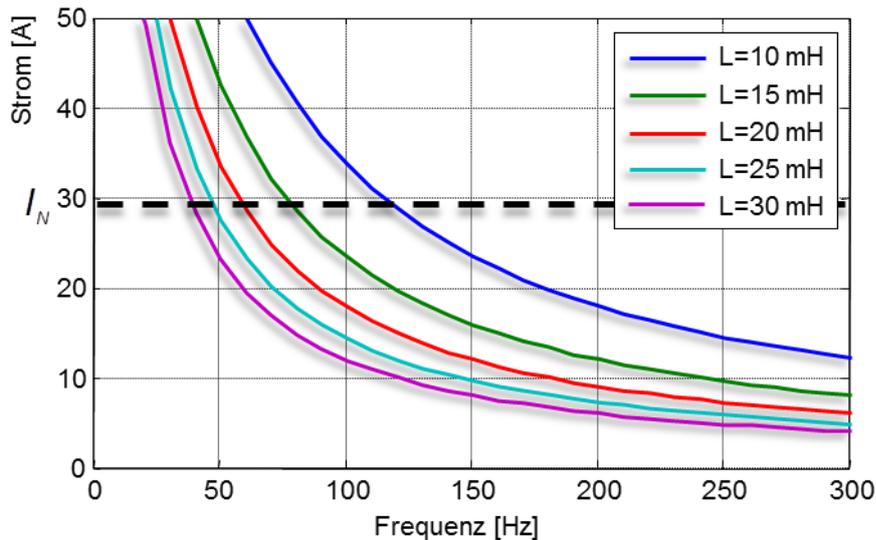


Bild 7-8: Maximale Nennfrequenzen bei Nennstrom

Eine höhere Induktivität hat zur Folge, dass die Nennfrequenz, bei welcher ein Betrieb im Nennstrom möglich ist, geringer wird. Für den Betrieb oberhalb der Nennfrequenz besteht die Möglichkeit, den Umrichter im Überlastbereich zu betreiben, also oberhalb des Nennstroms von 29 A. Dies ist für kurze Einsatzzeiten unbedenklich, lediglich im Dauerbetrieb ist dies nicht zulässig, da es sonst zu Überhitzungen im Umrichter kommen kann.

Im nächsten Schritt wurden die Feldformer paketierrt. Die feldformenden Elemente werden in Abstandshalter aus Kunststoff eingelegt. Diese Abstandshalter dienen als Träger der Feldformer und stellen sicher, dass die Feldformer genau über den Zähnen des Stators gelegen sind. Die Abstandshalter werden auf zwei Zahnstangen aufgeschoben und mit Muttern verspannt. Die Feldformer können somit als ganzes Paket in den Vorschub eingebaut werden (vgl. Bild 7-9). Die gesamte Konstruktion wurde im Anschluss in einen Rahmen aus L-Profilen eingelassen und befestigt.

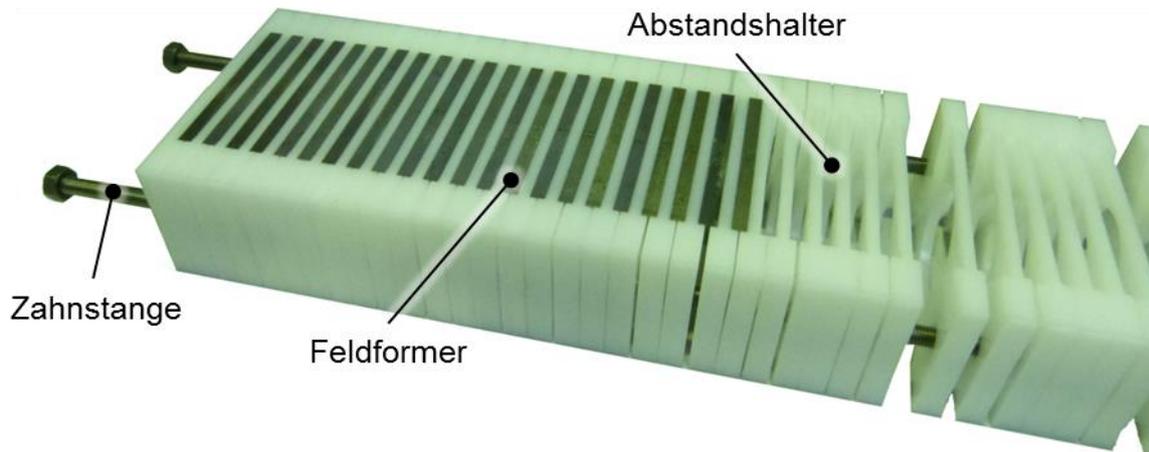


Bild 7-9: Feldformerpaket

### 7.3 Zusammenfassung

Um die Ergebnisse aus den Simulationen validieren zu können, wurde ein Demonstrator des Vorschubs konstruiert und gefertigt (vgl. Bild 7-10). Aufgrund der spezifischen Anforderungen an den Vorschub, wie der geringen Stranginduktivität, um einen großen Nennfrequenzbereich zu ermöglichen und den Verzicht auf eine externe aktive Kühlung, wurden die Statoren am IFUM gefertigt. Die Fertigungsschritte beinhalteten:

- die Herstellung der Eisenblechpakete und Formspulen
- die Isolation, das Einlegen und Verschalten der Wicklung
- die elektrische Stabilitätsprüfung
- das Tränken und Vergießen der Statoren

Für die Herstellung der Formspulen wurde ein Formspulenwerkzeug ausgelegt und gefertigt. Nach Abschluss der Fertigung und elektrischen Isolationsprüfung erfolgte die Montage aller einzelnen Komponenten und die Inbetriebnahme mittels des am IFUM vorhandenen Frequenzumrichters. Der Demonstrator ist darauf ausgelegt, die Funktionalität des Vorschubprinzips zu validieren. Für den Einsatz des Vorschubs in einer industriellen Produktionsumgebung ist darüber hinaus die Betrachtung der Zuführung neuer Stangen in den Vorschub nötig. Im Bereich der Zuführung von Stangenmaterial in Drehmaschinen ist bereits eine Vielfalt von Zuführsystemen vorhanden.

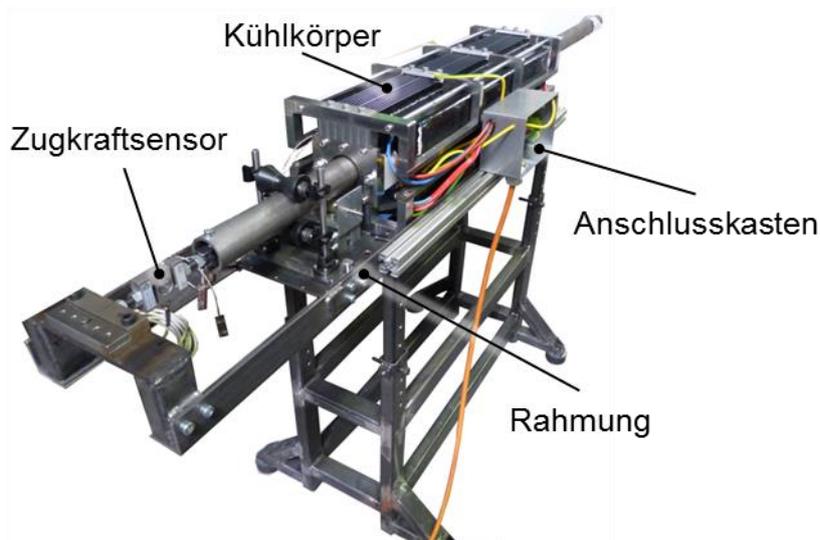


Bild 7-10: Aufbau des Demonstrators

### 7.3.1 Ein-Auslauf der Stange

In diesen Systemen werden die Stangen in einem Magazin gelagert und stückweise über ein Fördersystem in die Drehmaschine eingebracht, wie in [WIC-11] beschrieben. Für die Umsetzung des berührungslosen Vorschubprinzips bei dem gesamten Beschickungsvorgang, kann der Vorschubeinheit ein weiterer berührungsloser Vorschub vorgelagert werden. Eine Prinzipskizze des dafür notwendigen Aufbaus ist in Bild 7-11 zu sehen. Hierbei werden die Stangen mittels einer Beladeeinheit in das Vorschubsystem eingebracht. Die Stangen sind in einem Magazin gelagert und werden nacheinander auf die Führungsrollen aufgelegt und durch das Primärteil in Richtung des Vorschubsystems bewegt, wie durch den gelben Pfeil dargestellt wird. Dadurch gelangt die Stange in den Wirkungsbereich der Vorschubeinheit mittels welcher die Stange beschleunigt und positioniert wird.

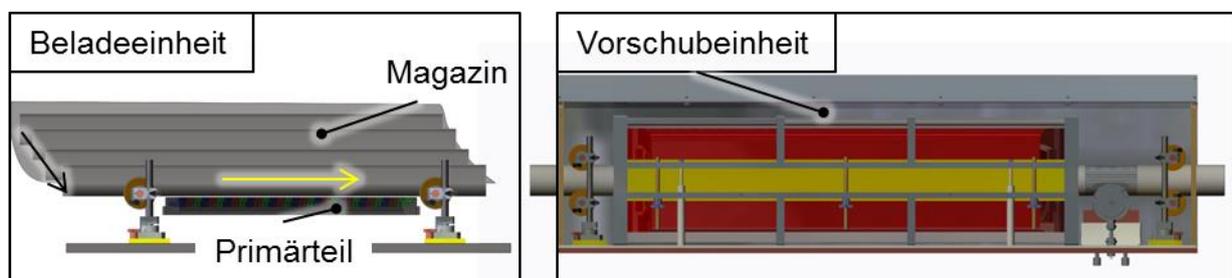


Bild 7-11: Prinzipskizze Stangennachfütterung

Der im Arbeitskreis diskutierte Vorschlag einer Nachfütterung, bei der die Enden aufeinanderfolgender Stangen auf Stoß angeordnet werden, ist schwierig umzusetzen. Grundsätzlich sollte sich immer nur eine Stange innerhalb des Vorschubs befinden. Dies hat den Grund, dass der Vorschub nur als ganzes System angesteuert werden kann. Die Beschleunigung der Stangen hängt dabei stark von dem Gewicht der Stange, sowie von der Überdeckung mit dem Wirkungsbereich des Vorschubs ab. Da diese Einflussfaktoren immer unterschiedlich sind, würden die Stangen, welche sich auf Stoß im Vorschub befinden, unterschiedlich stark beschleunigt werden, was zu Kollisionen führen kann.

In den folgenden Experimenten wurde daher ausschließlich die Funktionalität des Vorschubs mit einzelnen Stangen untersucht.

#### **7.4 Notwendigkeit der durchgeführten Maßnahmen**

Die durchgeführten Maßnahmen waren notwendig zur Erreichung der im Antrag beabsichtigten Ziele. Mittels des in diesem Kapitel beschriebenen Demonstrators kann die experimentelle Validierung des Finite-Elemente Modells erfolgen.

Der Bau des Demonstrators hat mehr Zeit in Anspruch genommen, als es im Antrag beabsichtigt war. Dies hat vor allem den Grund, dass die Sicherstellung der elektrischen Spannungsfestigkeit länger gedauert hat als beabsichtigt. Mittels des Spannungsfestigkeitsmessgeräts wurden nach Einlegen der Spulen viele Spannungsdurchschläge bei einer Prüfspannung von 2500 V festgestellt. Diese Durchschläge können Kurzschlüsse im laufenden Betrieb verursachen und sind daher zwingend zu vermeiden. Die Lokalisation und Behebung der Durchschläge war ein sehr mühsames Unterfangen und hat zu der Verzögerung in der Projektbearbeitung beigetragen.

## **8 Experimentelle Untersuchungen**

### **8.1 Validierung der Simulation am Kraftprüfstand**

Zu Validierungszwecken wurden experimentelle Untersuchungen am Versuchsprüfstand durchgeführt. Die Ermittlung der maximal erreichbaren Vorschubkräfte erfolgte mittels Zugkraftversuchen. Zusätzlich wurden bei Positionierversuchen die Positioniergenauigkeit und die maximal erreichbare Hubzahl gemessen.

### 8.1.1 Versuchsaufbau und –durchführung der statischen Zugkraftversuche

Der Vorschub ist mit einem Umrichter der Firma Control Techniques mit der Bezeichnung CT2404 verbunden [CON-14]. Dieser Umrichter kann einen Nennstrom von 29 A liefern, kurzzeitig sind Ströme bis zu 43,5 A möglich, dies würde jedoch bei dauerhafter Belastung zu einer Überhitzung im Umrichter und im Vorschubsystem führen. Die 3 Phasen des Drehstromsystems (U, V, W) sind in Sternschaltung miteinander verkabelt. Das obere und untere Primärteil sind in einer Reihenschaltung miteinander verschaltet. Die Kenndaten des Umrichters und die Verschaltung der Primärteile sind in Bild 8-1 dargestellt.

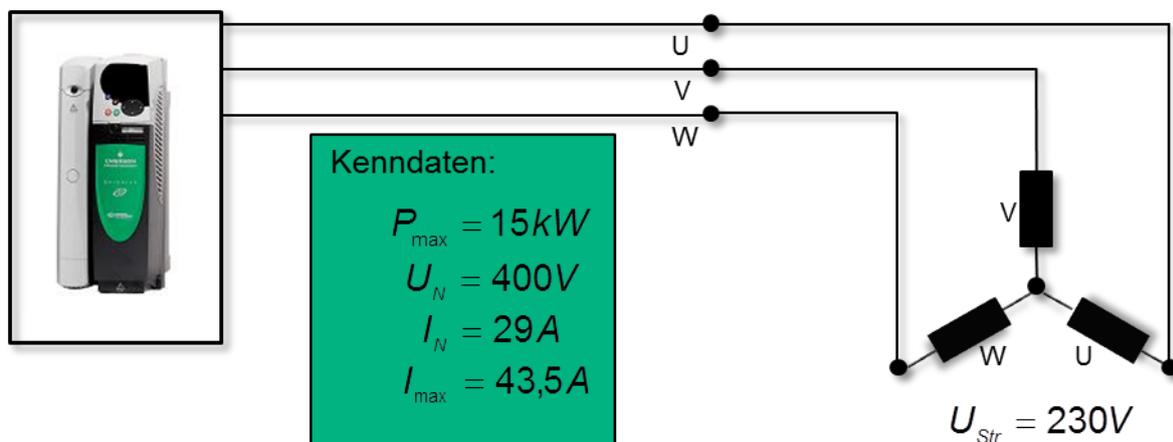


Bild 8-1: Kenndaten des Umrichters

Zur Ermittlung der Zugkräfte und der Kippfrequenz, bei welcher die maximale Kraft erreicht wird, werden die Vorschubkräfte bei variierten Stromfrequenzen gemessen. Hierfür wurden in 5 Hz Schritten die Zugkräfte im Intervall von 10 Hz bis 120 Hz aufgenommen. Die Messung der Kraft erfolgt mittels eines piezoelektrischen Kraftsensors, welcher einen Messbereich von  $\pm 2$  kN hat. Der Sensor wird an ein MGC Plus Messgerät der Firma HBM angeschlossen, mittels dem der Kraftverlauf aufgezeichnet werden kann (Bild 8-2). Bei dem MGC Plus handelt es sich um einen modularen Messverstärker zur Aufnahme von Messdaten. In das MGC Plus können verschiedene Messkarten eingesetzt werden, je nachdem, welche Messgrößen aufgenommen werden sollen. Unter anderem können sowohl die wirkenden Kräfte am piezoelektrischen Kraftsensor, als auch die Temperatur mittels Thermoelemente aufgezeichnet werden. Die aufgezeichneten Daten werden per Ethernet Verbindung an einen Rechner übertragen und können so zur späteren Auswertung gespeichert werden. Für den Kraftsensor wurde eine Sensoraufnahme konstruiert, an welcher der

Sensor befestigt wurde. Das Rohr ist mittels einer Verstiftung mit dem Sensor verbunden (Bild 8-2).

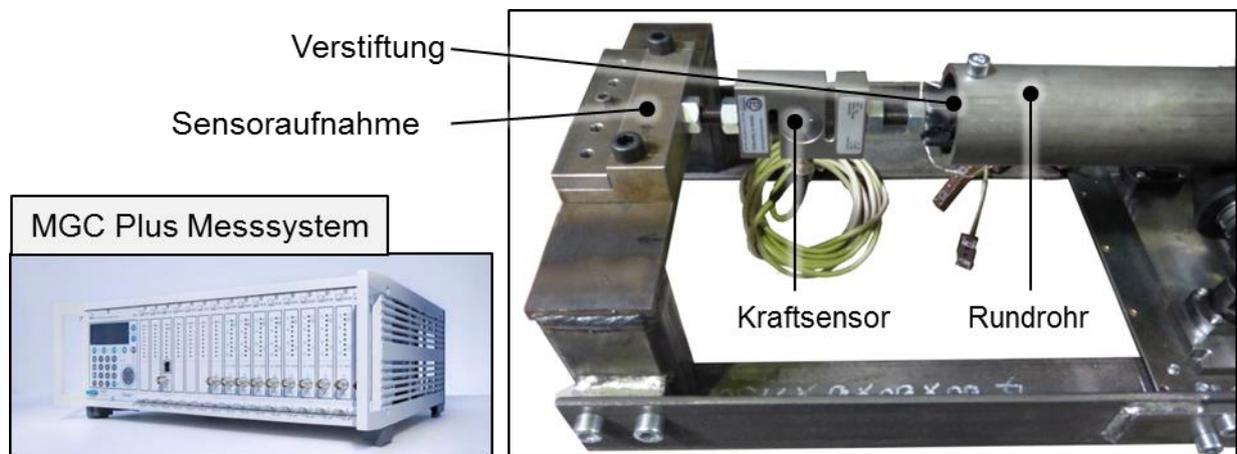


Bild 8-2: Aufbau des Zugkraftversuchs und verwendete Messtechnik

Zusätzlich wurden, ebenfalls über das MGC Plus, die Temperaturen in den Primärteilen mittels der Thermoelemente aufgezeichnet.

Zur Steuerung des Systems wurde eine Oberfläche in der Software Labview erstellt (vgl. Bild 8-3). Über diese Software können Startparameter gesetzt werden, um die Bestromung der Primärteile einzustellen und zu starten. Das Notebook ist hierbei über ein Data Input/Output Modul und einer Optokopplerbox mit dem Umrichter verbunden. Hierüber können sowohl analoge als auch digitale Signale zwischen dem Benutzer und dem Umrichter ausgetauscht werden.

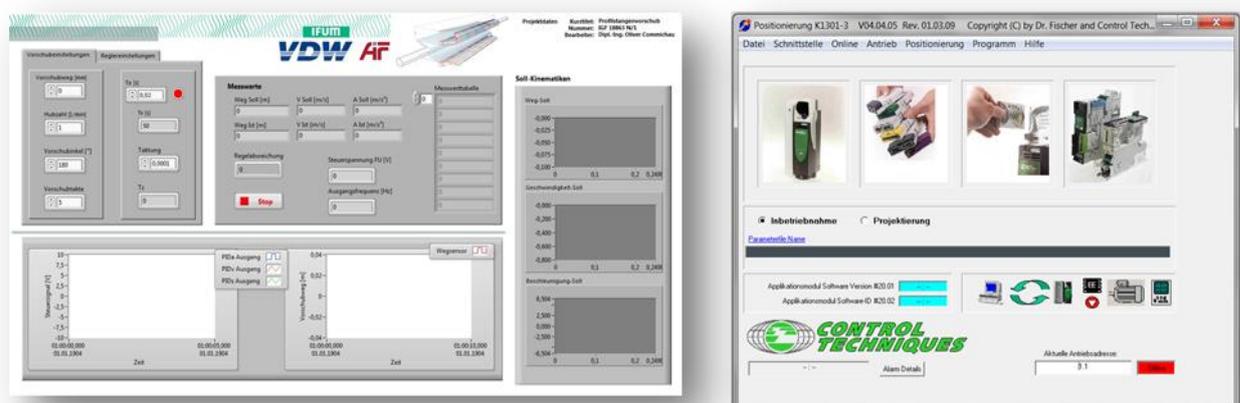


Bild 8-3: Labview VI zur Steuerung des Vorschubs

### 8.1.2 Ergebnisse der Zugkraftmessung

Zur Aufnahme der Zugkraft wurde der Vorschub bei unterschiedlichen Frequenzen für wenige Sekunden bestromt, bis sich ein homogener Verlauf der Kraft einstellt, damit der damit der Kraftverlauf gegenüber der Zeit dargestellt werden kann.

Im ersten Versuch wurde ein Aluminiumrohr mit einem Außendurchmesser von 60 mm und einer Wanddicke von 5 mm untersucht. Die gemessene Kraft pendelt mit variierender Amplitude um den jeweiligen Durchschnittswert. Hierbei ist keine Abschwächung der Kraft infolge von Werkstückerwärmung, und daraus resultierender höherer Wirbelströme, zu erkennen. Die Kraft wurde in den Messungen durch Bestimmung des Mittelwerts über die Messwerte festgelegt. Beispielhaft sind die Messdaten einer Kraftmessung bei 55 Hz in Bild 8-4 zu sehen.

Die Ergebnisse der Messung bei Vorschub einer Aluminiumstange bei variierender Frequenz sind in Bild 8-5 dargestellt. Die gemessenen Vorschubkräfte stimmen bis zu einer Frequenz von etwa 75 Hz gut mit den Ergebnissen der Simulation überein. Innerhalb dieses Bereichs beträgt die Abweichung zwischen Simulation und Messergebnis <10%. Bei höheren Frequenzen erfolgt eine drastische Reduzierung der Vorschubkraft. Dies hängt mit der Nennstrombegrenzung des Umrichters zusammen. Der Nennbetrieb bezeichnet den Arbeitspunkt, bei dem ein dauerhafter Betrieb des Systems möglich ist, ohne dass es zu Überhitzungen oder anderen Ausfällen kommt. Ab einer Frequenz von mehr als 75 Hz kann der Nennstrom von 29 A aufgrund des frequenzabhängigen Scheinwiderstandes nicht mehr erreicht werden.

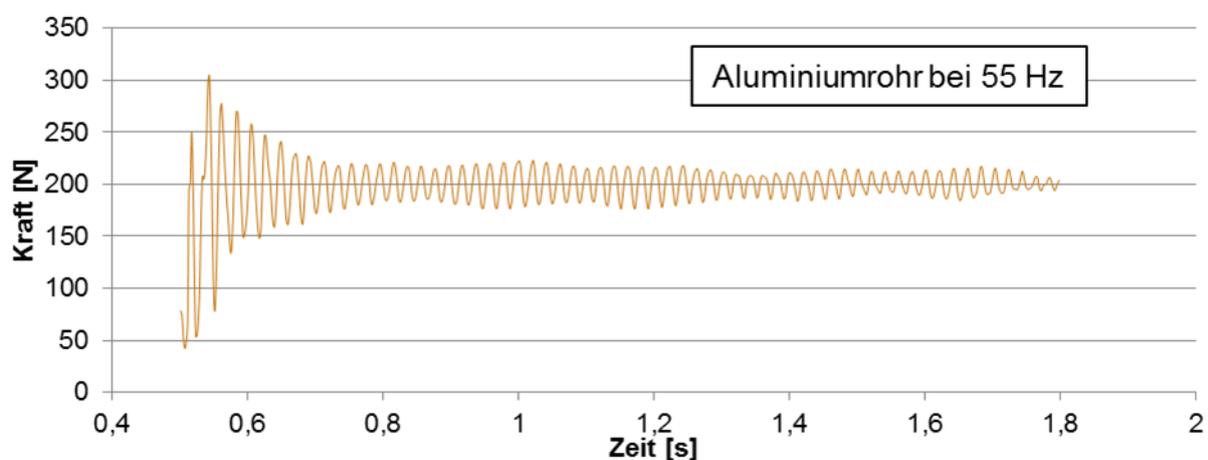


Bild 8-4: Kraftmessdaten des Zugversuchs bei 55 Hz

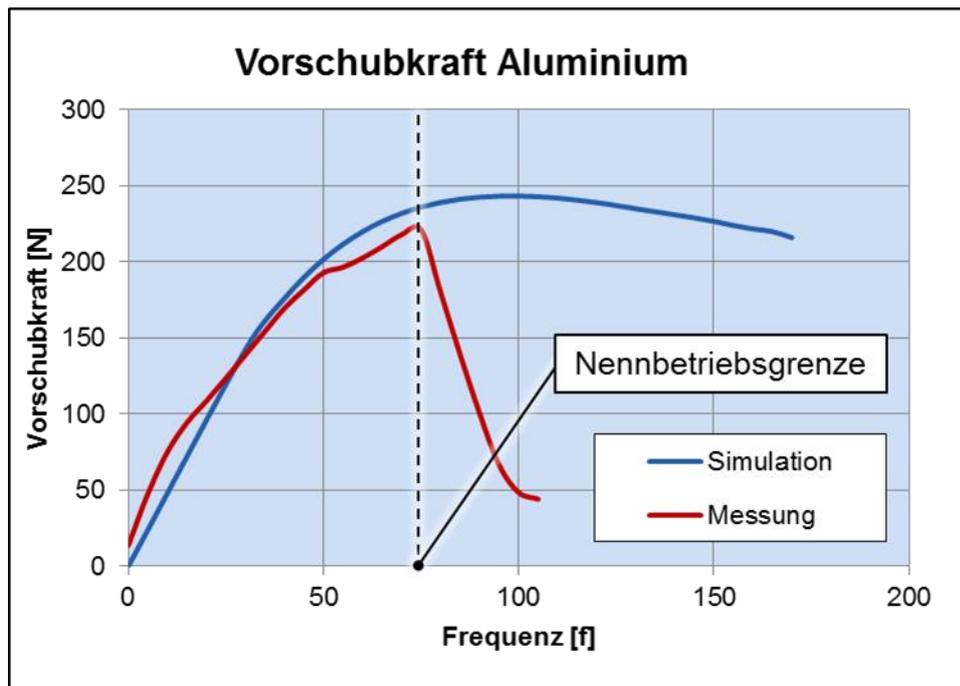


Bild 8-5: Ergebnisse der Vorschubkraftmessung

Dieser Effekt lässt sich auf die bereits in Kapitel 7 beschriebene konstruktive Maßnahme zurückführen, bei der Herstellung der Spulen einen schmalen Draht (4,5 mm) als den ursprünglich geplanten (5 mm) zu verwenden. Durch den dadurch entstandenen größeren Luftraum innerhalb der Statornuten ist der induktive Widerstand so stark gestiegen, dass ab einer Frequenz von 75 Hz der Strom von 29 A nicht mehr bereitgestellt werden kann. Aus dem sinkenden Strom folgt die geringere Vorschubkraft. In einem weiteren Versuch wurde ein Stahlrohr in den Vorschub eingelegt und die resultierenden Vorschubkräfte gemessen. Während des Versuchs hat sich die Problematik aufgezeigt, dass die magnetischen Anziehungskräfte der Primärteile so stark waren, dass das Rohr bei Bestromung des Vorschubsystems an einem der beiden Primärteile haftete, ohne dass dabei Vorschubkräfte zu messen waren.

In der ursprünglichen Planung der Konstruktion war vorgesehen, dass sich die Anziehungskräfte der Primärteile aufgrund der Doppelkammanordnung neutralisieren. In der Praxis hat sich herausgestellt, dass zum einen hierfür eine hochgenaue konstruktive Ausführung des Demonstrators nötig ist, zum anderen auch die Positionierung des Rundrohrs exakt mittig zwischen den Primärteilen erfolgen muss. Die Ausrichtung der Primärteile zueinander konnte in der Ausführung dieses

Prototyps nicht ausreichend genau erfolgen, weshalb in den weiteren Versuchen mit Aluminiumrohre verwendet wurden.

Die Ergebnisse der Zugkraftversuche zeigen, dass das FEM Modell dazu geeignet ist, bei der Auslegung und Optimierung von Vorschubsystemen eingesetzt zu werden. Hierbei muss bei der Modellierung beachtet werden, dass die vorgegebenen Ströme im Modell auch am realen System umsetzbar sind.

## **8.2 Dynamische Vorschubuntersuchungen**

### **8.2.1 Versuchsaufbau und –durchführung im dynamischen Betrieb**

Im folgenden Versuch ist die Stange im Vorschub nicht mehr fest eingespannt, sondern frei beweglich. Aus Sicherheitsgründen wird die maximale Verfahrstrecke der Stange dabei auf der einen Seite durch einen Puffer und auf der anderen Seite von einem Stahlseil begrenzt. Hierdurch wird vermieden, dass die Stange bei unvorhergesehenem Verhalten der Regler unkontrolliert in eine Richtung beschleunigt werden kann.

Zur Erfassung der Positioniergenauigkeit des Vorschubs wurde das optische Verlagerungsmesssystem Pontos HS der Gesellschaft für Optische Messtechnik (GOM) eingesetzt. Es ermöglicht eine berührungslose, räumliche Koordinaten- und Verschiebungsmessung von einzelnen Messpunkten auf Basis der Stereophotogrammetrie. Durch den Einsatz von Hochgeschwindigkeitskameras eignet sich das System ebenfalls zur Erfassung schneller Vorgänge und Bewegungsabläufe, wie sie beim hochdynamischen Betrieb auftreten. Das eingesetzte Messsystem besteht aus einer Stereokamera und einem Rechner (Bild 8-6 a). Für eine Messung wird die auf einem Stativ befestigte Stereokamera vor dem Messobjekt (Bild 8-6 d) positioniert. Die auf dem Messobjekt zu messenden Stellen werden vor dem Messvorgang mit vernachlässigbar leichten, selbstklebenden, lichtreflektierenden Messmarken gekennzeichnet. Im Rahmen einer Messung beobachten die Kameras diese Messmarken. Die Messgenauigkeit des Systems hängt von dem zu erfassenden Messvolumen ab. Das Messvolumen wird durch den Basisabstand, d. h. dem Abstand zwischen den beiden Kameras, der Brennweite und der Ausrichtung der Kameras bestimmt. Die Bestimmung dieser Größen erfolgt im Rahmen einer Kalibrierung mithilfe eines Kalibrierkreuzes (Bild 8-6 c). Mittels der

Kalibrierung und den während einer Messung aufgenommenen, hochauflösenden Bildern werden die 3D-Koordinaten der Messstellen berechnet [SCR-05], [LUH-10]. Mehrere solcher Aufnahmen ermöglichen die Berechnung der relativen Verschiebung jeder Messstelle. Die Auswertung der aufgenommenen Bilder erfolgt mittels der Herstellersoftware. Aufgabe dieser Software ist die präzise Detektion der perspektivisch zu Ellipsen verzerrten optischen Messmarken und deren räumliche Zuordnung. Anhand von Probemessungen wurde überprüft, inwiefern die Messgenauigkeit des Messsystems für die bevorstehende Aufgabe geeignet ist. Bei diesem Messaufbau lag die Messunsicherheit in x-Richtung bei 0,008 mm.

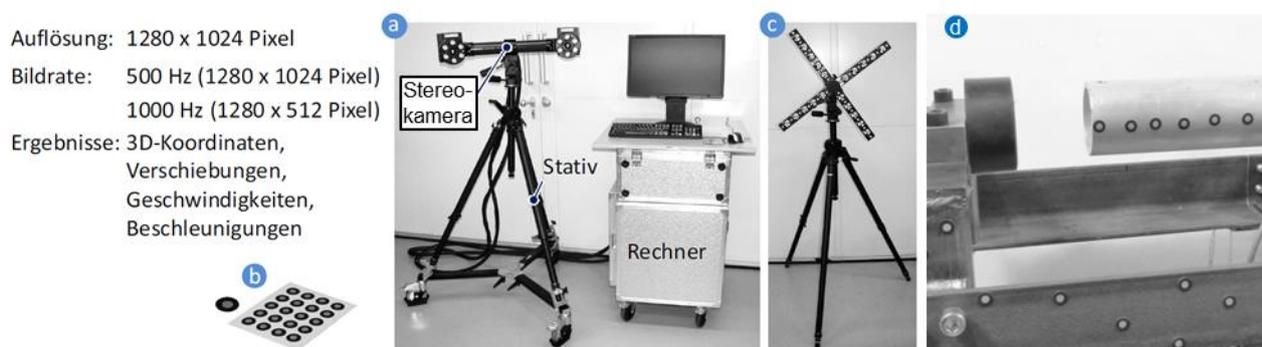


Bild 8-6: Eingesetztes optisches Verlagerungsmesssystem (a), optische Messpunkte (b), Kalibrierkreuz (c) und Messaufbau (d)

### 8.2.2 Aufbau des Regelkreises

Für die Positionsregelung des Vorschubs wird ein Zusatzsteckmodul zur umrichterinternen Regelung einer Linearachse genutzt. Hierdurch erfolgt die Regelung intern und ist dadurch dynamischer als wenn die Regelung an einem externen Rechner erfolgen würde. Dieses Modul regelt die Position der Stange mittels einer Kaskadenregelung. In dieser Kaskadenstruktur ist ein Stromregler integriert, welchem ein Drehzahl- und Lageregler überlagert ist. Bei dieser Reglerstruktur wird die Regelung in mehrere kleine Regelkreise aufgeteilt, welche ineinander verschachtelt sind. In erster Instanz wird hier der Strom, und damit die Kraft des Vorschubs, geregelt, bevor sich der Wert auf den übergeordneten Regelkreis der Drehzahlregelung auswirkt. Erst danach wirken sich die Regelgrößen auf den Lageregler aus (Bild 8-7). Die Ist-Position der Stange wird von dem eingebauten Wegmesssystem erfasst und an den Umrichter übermittelt. Ein geeigneter Parametersatz für die Regler wurde experimentell ermittelt. Über ein

eigens entwickeltes Labview Tool werden Startsignale an den Umrichter gegeben. Darüber hinaus kann die Taktzahl des Vorschubs eingegeben werden. Die Sollkinematik wird je nach Vorschublänge und Vorschubdauer eingestellt. Der Geschwindigkeits- und Wegverlauf ist schematisch in Bild 8-8 dargestellt. Die Werte der maximalen Beschleunigung und der Sollposition  $s_0$  werden als Parameter in der Steuerung hinterlegt. Aus diesen Werten wird die resultierende Sollkinematik errechnet. Bei kurzen Fahrwegen wird der Bereich der konstanten Geschwindigkeit bei  $v_{\max}$  nicht erreicht, sodass sich der Geschwindigkeitsverlauf lediglich aus dem Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgang zusammensetzt.

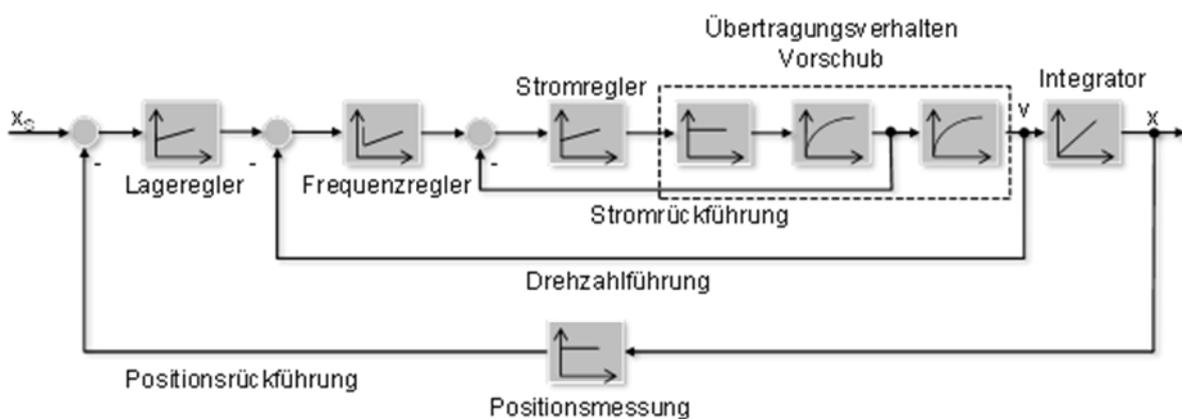


Bild 8-7: Aufbau der Kaskadenregelung des Vorschubs

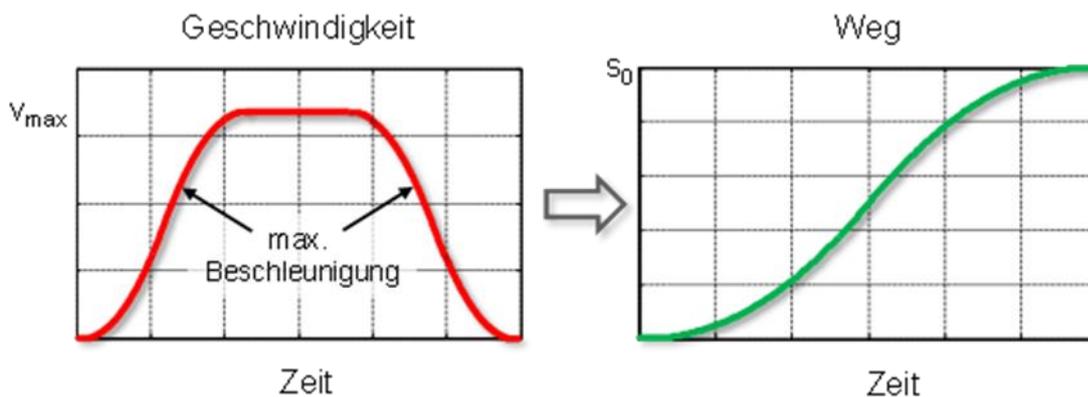


Bild 8-8: Geschwindigkeits- und Weg-Zeit Verlauf

### 8.2.3 Positioniersversuche - Durchführung und Ergebnisse

Die Messung des Vorschubweges und der Vorschubgeschwindigkeit erfolgt mittels des im Demonstrator verbauten Drehgebers. Um aus der Drehung des Drehgebers

den Vorschubweg zu ermitteln, müssen die kinematischen Zusammenhänge in der Regelung berücksichtigt werden (Bild 8-9).

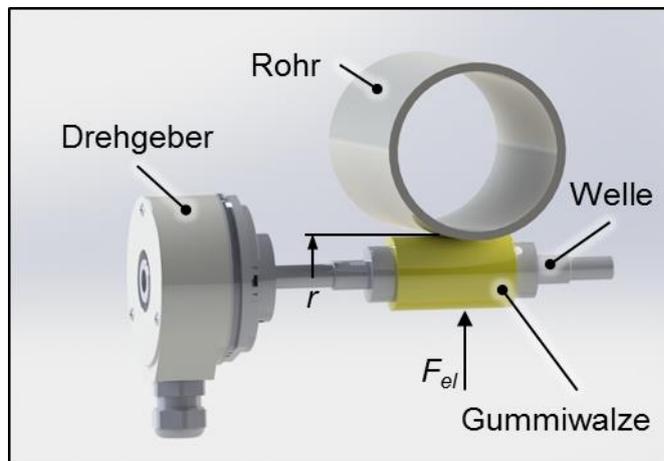


Bild 8-9: Übersetzung von Rohr zu Drehgeber

Zunächst erfolgte eine Kalibrierung des Drehgebers. Da die Profilstange über eine Gummiwalze mit der Welle des Drehgebers in Kontakt gerät, besteht hier eine Ungenauigkeit. Wegen der Elastizität des Gummis ist der Abstand  $r$  der Welle, auf welcher der Drehgeber sitzt, zum Rohr des Rades abhängig von der Kraft  $F_{el}$ , mit der das Gummirad an das Profil gedrückt wird. Um dies zu bereinigen wurde für einen Vorschubversuch in der Positionierregelung zunächst eine Sollposition angegeben und angefahren. Mittels des optischen Messsystems wurde der tatsächliche Vorschubweg gemessen. Aus dem Verhältnis des vorgegebenen zum tatsächlichen Vorschubweg konnte der Parameter Geberstriche/Länge angepasst werden. Für die Messung der Positions- und Wiederholgenauigkeit wurde eine Vorschublänge von 20 mm vorgegeben. Hierbei wurde Hubzahl von 60/min vorgegeben. Die Messung des Weges wurde mit dem Pontos Messsystem aufgezeichnet und ist in Bild 8-10 dargestellt. Insgesamt wurden hierbei 8 Hübe ausgeführt. Die Pontos Messung der angefahrenen Positionen sind in Bild 8-11 dargestellt. Die rote Linie zeigt die vorgegebene Vorschublänge an. Die Abweichungen der Positionen belaufen sich im Bereich von  $-58\mu$  bis  $+62\mu$ . Die Messunsicherheit des Pontos Messsystems beträgt  $\sim 10\mu$ . Die Ergebnisse zeigen, dass eine hochgenaue Positionierung mit dem Vorschubgerät möglich ist. Stangenzuführsysteme, die aktuell am Markt erhältlich sind, positionieren Rundstangen mit einer Genauigkeit von 0,13 mm [HAA18]. Im

Vergleich positioniert der elektromagnetische Vorschub mit einer doppelt so hohen Genauigkeit.

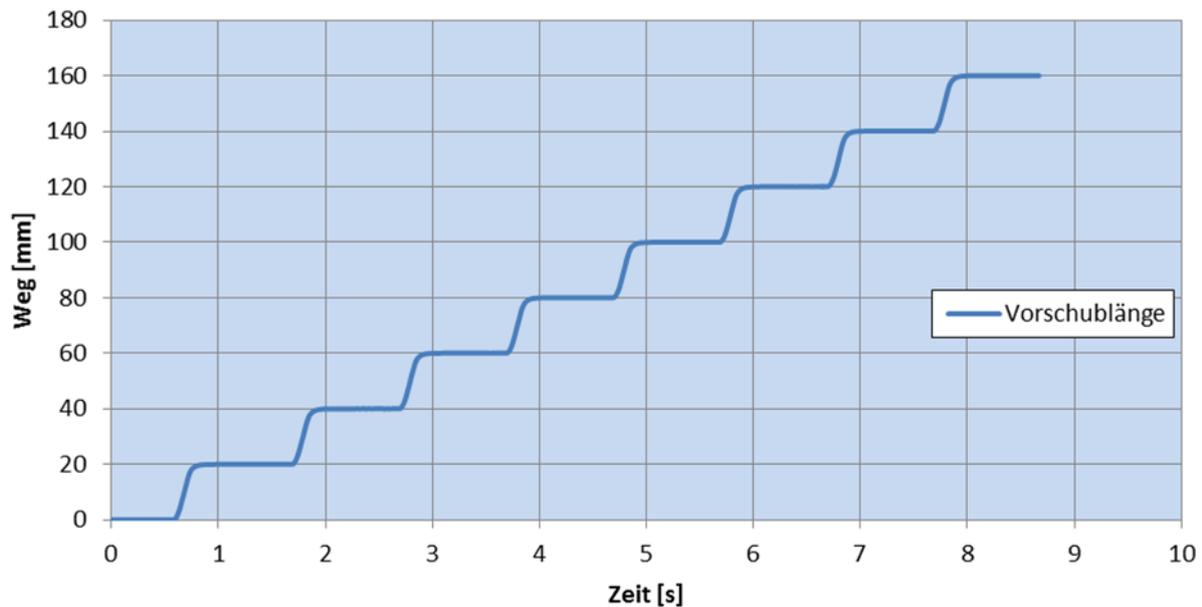


Bild 8-10: Ergebnisse der Positionierversuche

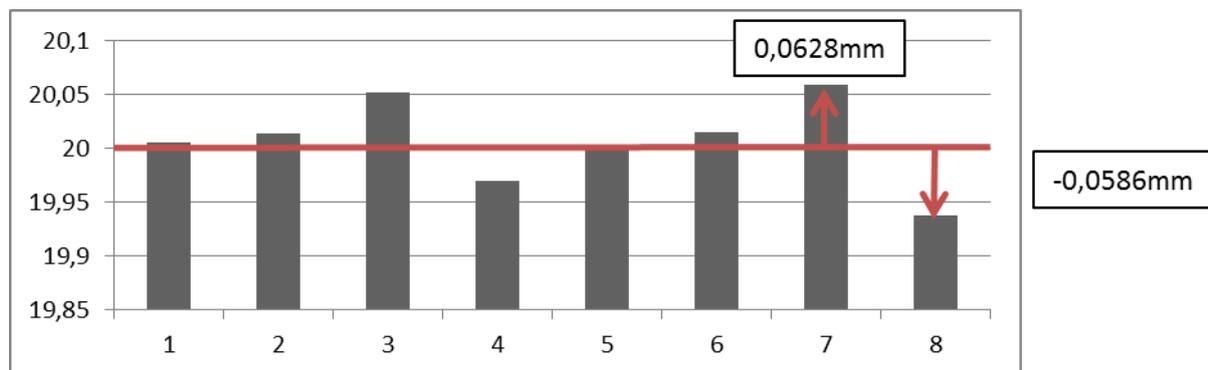


Bild 8-11: Positioniergenauigkeit

### 8.2.4 Ermittlung der maximalen Hubzahl

Zur Ermittlung der maximal erreichbaren Hubzahl wurde die Zeit gemessen, welche zum Erreichen einer vorgegebenen Vorschublänge benötigt wird. Hierfür wurden jeweils für die Aluminiumstange (13,7 kg) und das Aluminiumrohr (4,7 kg) Vorschublängen im Bereich 20 mm bis 200 mm eingestellt. Der Regler gibt für die Geschwindigkeit ein Dreiecksprofil vor, da bei kurzen Verfahrwegen die maximal mögliche Geschwindigkeit, die Geschwindigkeit der magnetischen Wanderwelle, nicht erreicht wird. Die Bewegung erfolgt daher ohne einen Bereich konstanter Geschwindigkeit. In diesen Versuchen wurden bei der maximalen Verfahrlänge von

200 mm eine maximale Geschwindigkeit von  $v_{\max} \sim 1,8$  m/s gemessen (vgl. Bild 8-12). Aus den Positionierzeiten wurden im Anschluss die erreichbaren Taktraten ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 8-13 zu sehen. Beim Vorschub des Rohres wurden Hubzahlen im Bereich von ca. 400/min bis 600/min je nach vorgegebenen Vorschublängen erreicht. Die Aluminiumstange erreicht bis zu 400 Hübe/min. Die geringere Hubzahl bei der Stange ist durch das höhere Gewicht bei gleichbleibender Vorschubkraft zu erklären. Die während dieser Erprobung erreichten Hubzahlen übersteigen die Hubzahlen aktueller am Markt angebotener Stangenzuführsysteme. Beispielsweise wird in [MAH18] eine Zuführeinheit für Stan-genmaterial mit einer Hubzahl von bis zu 60/min bei 150 mm Verfahrenweg angeboten. Diese Hubzahl kann mit dem elektromagnetischen Vorschub um das Vierfache übertroffen werden. In diesem Punkt kann folglich mittels des elektromagnetischen Vorschubs eine Verbesserung von Produktionsraten erreicht werden.

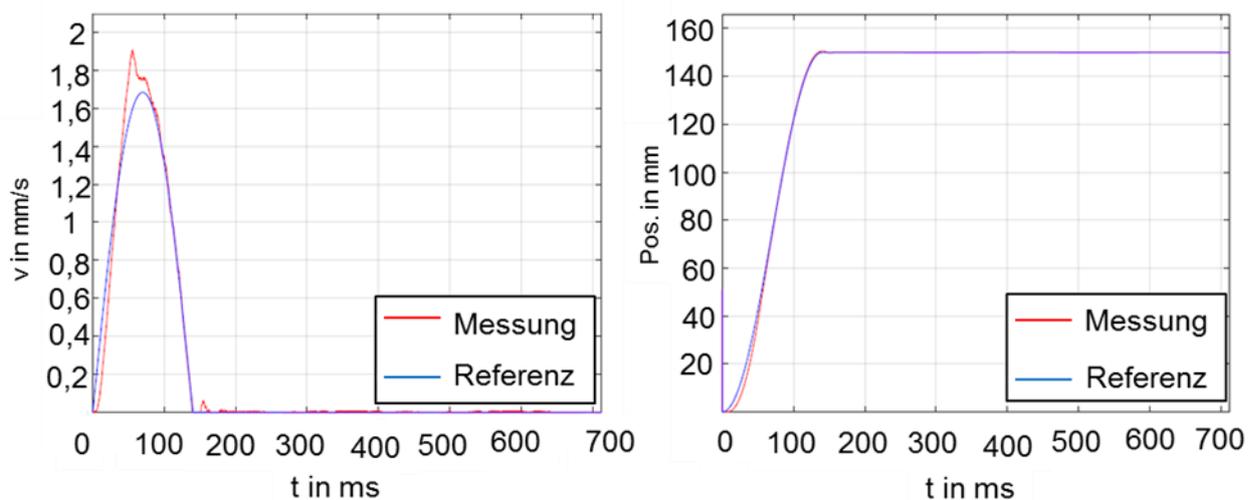


Bild 8-12: Positionsdaten der Vorschubbewegung

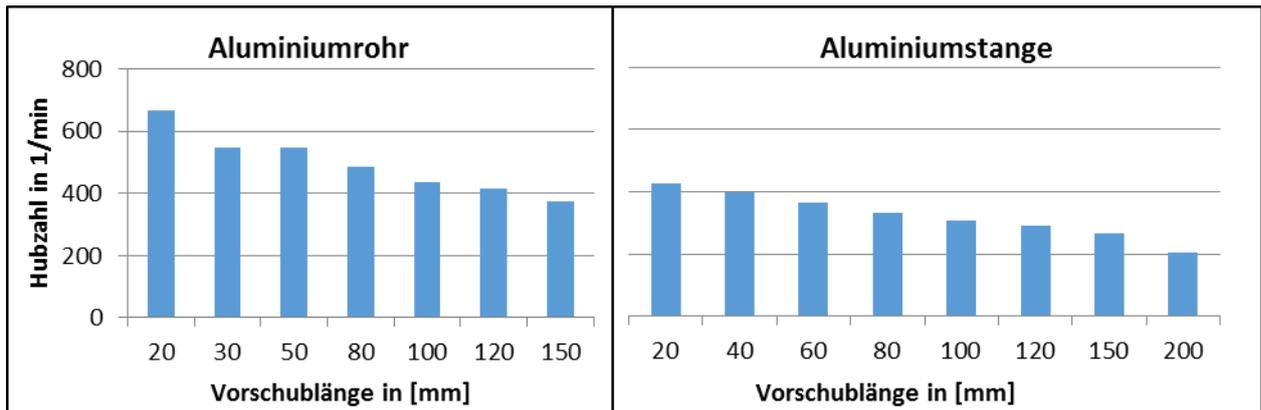


Bild 8-13: Maximale erreichbare Hubzahlen

Da bei Stangenvorschüben immer die komplette Stange beschleunigt und verzögert werden muss, ist die Hubzahl neben den erzielbaren Kräften ebenfalls von dem Gesamtgewicht der verbleibenden Stange, die bewegt werden muss, abhängig. Unter Berücksichtigung des Gewichts der Stange ergibt sich der Verlauf der erreichbaren Hubzahlen in Abhängigkeit des Stangengewichts, wie in Bild 8-14 dargestellt. Der blaue Graph beschreibt den Hubzahlverlauf des Demonstrators welcher in diesem Versuch getestet wurde. Die gestrichelten Linien zeigen die erreichbaren Hubzahlen bei Verwendung eines längeren Vorschubsystems mit mehr Polstellen. Der Demonstrator ist mit 10 Polen ausgelegt. Je nach Anforderung an das System besteht grundsätzlich die Möglichkeit, durch Erhöhung der Polstellen höhere Hubzahlen zu erreichen.

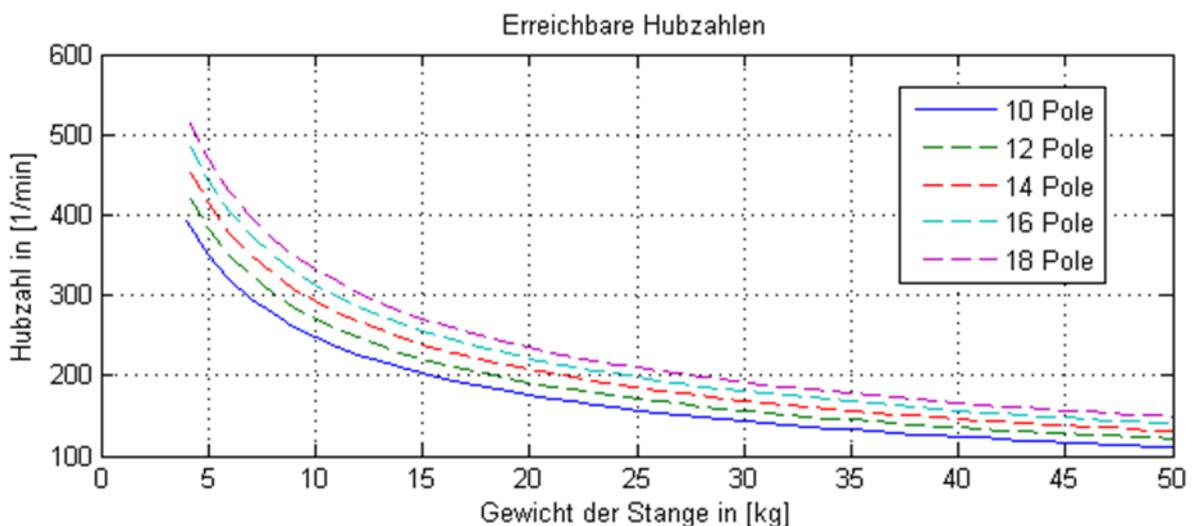


Bild 8-14: Maximal erreichbare Hubzahlen in Abhängigkeit des Stangengewichts bei Aluminiumstangen

Für die Kraftzugversuche wurde ein Kraftprüfstand aufgebaut, in welchem die Stange fest mit einem Zug-Druck-Sensor verbunden ist. Zudem wurde die Stange freilaufend, ohne Befestigung, getestet. Die Regelung des Vorschubs erfolgte mittels einer umrichterinternen Kraftregelung. Mit Aluminium Rundprofilen wurden sowohl Zugversuche, als auch Positioniersversuche durchgeführt. Hierbei konnten die simulativen Ergebnisse für Aluminiumstangen validiert werden. Das Simulationsmodell zur Auslegung und Dimensionierung von Vorschubsystemen konnte damit validiert werden. Schwierigkeiten bestanden beim Vorschieben von Stahlwerkstoffen, da diese aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften von den Primärteilen angezogen werden. Dies führt dazu, dass die Stange an einem der Primärteile haftet, anstatt vorgeschoben zu werden. Die Versuche haben gezeigt, dass das Vorschubprinzip funktioniert.

Die Positioniersversuche haben zudem gezeigt, dass eine hochgenaue und – dynamische Positionierung der Stangen möglich ist. Vergleiche zu derzeit am Markt angebotenen Stangenzuführsystemen haben gezeigt, dass mittels des elektromagnetischen Systems eine höhere Dynamik und bessere Positioniergenauigkeit erreicht werden kann.

### **8.3 Zweckmäßigkeit der durchgeführten Arbeiten**

Die in Kapitel 8 durchgeführten Arbeiten waren zweckmäßig und führten zum Erreichen des Forschungsziels. Erst mit den experimentellen Untersuchungen konnten die Simulationsergebnisse abgeglichen werden. Mittels der statischen Zugversuche konnte der Nachweis des Potentials des elektromagnetischen Vorschubs sowie die Leistungssteigerung gegenüber heutigen Vorschubsystemen erbracht werden. Aufgrund des komplexen Systemverhaltens des Vorschubs in Bezug auf die sich ändernden Motorparameter mit der Veränderung des Luftspalts oder der Werkstückgeometrie aber auch des –werkstoffes musste eine genaue motorangepasste Parametrierung des Umrichters erfolgen. Mit den dynamischen Positioniersversuchen konnten die Leistungsraten und potenzielle Ausbringungsraten des Vorschubsystems nachgewiesen werden.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde ein neuartiges innovatives Vorschubsystem für elektrisch leitfähige Profilstangen entwickelt. Hierbei werden die Stangen mittels elektromagnetischer Kräfte vorgeschoben. Das System basiert auf dem Prinzip des asynchronen Linearmotors mit Wirbelstromläufer. In dieser Anwendung fungiert das Werkstück selber als der Läufer des Linearmotors.

Das geplante System wurde zunächst in einem parametrischen Ansys Modell mit der internen Skriptsprache APDL modelliert. Mittels diesen Modells wurde eine Simulationsstudie und Optimierung des Systems durchgeführt. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden Baugrößen der Primärteile, resultierende Vorschubkräfte und Auslegungskriterien für Feldformer ermittelt. Zur Validierung dieser Ergebnisse wurde anschließend ein Demonstrator gefertigt, mit dem Rundprofile mit einem Durchmesser von 60 mm vorgeschoben werden können. Zur Ansteuerung des Demonstrators wurde eine Oberfläche in der Software Labview erstellt, welche zur Vorgabe von Taktzeiten und Startbefehlvergabe verwendet werden kann. Mit dem Demonstrator wurden zunächst Zugversuche zur Ermittlung von maximal erreichbaren Kräften, und im Anschluss Positioniersversuche durchgeführt. Mit den Positioniersversuchen konnte die Absolutgenauigkeit, so wie die maximal erreichbare Hubzahl des Vorschubs ermittelt werden. Die Funktionalität des Vorschubs konnte mittels des Demonstrators für Aluminiumstangen nachgewiesen werden. Beim Vorschub von Stahlwerkstoffen ergab sich die Problematik, dass die Werkstücke aufgrund der magnetischen Eigenschaften von Eisen von den Primärteilen angezogen wurden und an diesen hafteten. In diesen Versuchen konnten daher keine Vorschubkräfte gemessen werden.

Im Anschluss an die Validierung wurden simulativ die Vorschubeigenschaften weiterer Profilformen untersucht. Die Simulationen zeigen, dass unter Anpassung der Feldformergeometrie auch der Vorschub weiterer komplexer Profilformen möglich ist.

Mit der aktuellen Konfiguration des Vorschubs ist das Verschieben von Stahlwerkstoffen nicht realisierbar. In einer zukünftigen Version des Systems, kann eine separate Ansteuerung des oberen und unteren Primärteils entwickelt werden. In diesem Falle würde für jedes der zwei Primärteile jeweils ein Umrichter angeschlossen werden. Durch diese Parallelschaltung der Primärteile wird die

Gesamtinduktivität verringert, wodurch höhere Frequenzen im Nennbetrieb erreicht werden können. Zusätzlich kann der Effekt, dass magnetische Materialien an einem der Primärteile anhaften, behoben werden, indem die Bestromung der zwei Primärteile hochfrequent im Wechsel erfolgt. Hierbei wird ausgenutzt, dass die mechanische Zeitkonstante deutlich höher ist als die elektrische. Da

$$T_{\text{mech}} \gg T_{\text{elek}}, \quad (10.1)$$

wechselt die magnetische Anziehungskraft der Primärteile so schnell das Vorzeichen, dass die Stange mittig zwischen den Primärteilen verharrt. Mit dieser Vorgehensweise verbleibt lediglich eine Kraft in Vorschubrichtung.

Mit dem Demonstrator konnten sowohl hohe Hubzahlen als auch eine sehr genaue Positionierung erreicht werden. Der Vergleich mit derzeit am Markt angebotenen Stangenzuführsystemen hat gezeigt, dass mittels des elektromagnetischen Vorschubs eine Steigerung der Produktionsraten ermöglicht wird.

**Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.**

## **10 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse**

### **10.1 Einschätzung zur industriellen Umsetzbarkeit**

Die Ergebnisse dieses Projekts können unmittelbar in die Planung neuer Vorschubanlagen eingebracht werden. Der berührungslose Vorschub von oberflächenveredelten Profilstangen kann mittels diesen Konzeptes ohne Minderung der Oberflächenqualität erfolgen. Durch den Nachweis, dass das berührungslose Vorschieben mithilfe von magnetischen Feldformern funktioniert, profitieren Firmen, die einen entsprechenden Anwendungsfall in ihrem Portfolio haben. Die Projektergebnisse wurden regelmäßig mit dem projektbegleitenden Ausschuss diskutiert, so dass ein frühzeitiger und durchgängiger Transfer des gewonnenen Wissens in die Industrie erfolgte. Für eine Umsetzung in der Industrie muss ein zusätzliches Konzept zur Nachfütterung neuer Stangen in das System erstellt werden. Dieser Sachverhalt wurde in Kapitel 7.3.1 erläutert.

### **10.1.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

Die im Vorhaben erlangten Kenntnisse über das Vorschubkonzept führen zu guten Erfolgsaussichten in Bezug auf eine industrielle Umsetzung. Aus wirtschaftlicher Sicht bietet das Konzept ein hohes Potential zur Qualitätssicherung von oberflächenbehandelten Profilstangen.

Dadurch, dass die Energieübertragung vom Vorschub auf das Werkstück direkt erfolgt und keine mechanischen Elemente wie Getriebe und Walzen bewegt werden müssen, kann eine Steigerung der Dynamik von Vorschubsystemen erreicht werden.

Nach dem Projektende werden voraussichtlich noch weiterführende, vorbereitende Arbeiten für eine industrielle Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis notwendig sein, die vom jeweiligen Unternehmen selbst zu tragen sind. Dies scheint aus heutiger Sicht notwendig, um die entwickelte Technologie für die Anwendung im Herstellprozess der jeweiligen Unternehmen zu qualifizieren.

### **10.1.2 Wissenschaftlich-technischer Nutzen für KMU**

Viele metallverarbeitende Unternehmen sind kleine und mittelständische Unternehmen. Als potentielle Anwender profitieren diese Unternehmen davon, neue Technologien wie das berührungslose Vorschubsystem zur Erhöhung der Produktqualität einsetzen zu können. Hierdurch werden die Wertschöpfung und die Wettbewerbsfähigkeit gesteigert. Von den Forschungsergebnissen profitieren des Weiteren Vorschubhersteller, welche mittels dieser Ergebnisse die Qualität von Vorschubsystemen verbessern können und damit zu einer besseren Positionierung am Markt gelangen können.

### **10.1.3 Verwendung der Zuwendung**

Für dieses Vorhaben waren lt. Einzelansatz A1 24 Monate für wissenschaftlich-technisches Personal vorgesehen. Dieser Rahmen wurde im Laufe der Bearbeitung voll ausgeschöpft. Der wissenschaftliche Mitarbeiter war für die Erstellung und Erprobung des Finite-Elemente-Modells zuständig. Nach Durchführung von Parameterstudien mittels des Modells wurde eine Baugröße festgelegt, welche für den Bau eines Demonstrators verwendet werden sollte. Die Konstruktion wurde vom wissenschaftlichen Mitarbeiter erstellt. Der Bau des Demonstrators wurde in Zusammenarbeit des wissenschaftlichen Mitarbeiters und dem technischen Personal

durchgeführt. Die Inbetriebnahme und Programmierung des Demonstrators, sowie die Durchführung der Versuche erfolgte ebenfalls durch den wissenschaftlichen Mitarbeiter.

*Tabelle 3: Verwendung der Zuwendung*

Forschungs-stelle	wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)	Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)	Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
IFUM	24 Personenmonate	0 €	0 €

## 10.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen, um die im Antrag formulierten Inhalte und Projektziele zu erreichen. Die wesentliche Abweichung, welche zur Verlängerung des Projektes geführt hat, wurde ich in Kapitel 7.4 dargelegt. Diese nachträgliche Anpassung des Zeitplans war notwendig, um die Funktionalität des gebauten Demonstrators zu gewährleisten. Eine Inbetriebnahme des Demonstrators ohne die akribische Sicherstellung der Spannungsfestigkeit hätte zur Zerstörung des Demonstrators und damit zum Verfehlen eines wesentlichen Projektziels, der Validierung, geführt.

## 11 Symbolverzeichnis

$A$	Fläche
$B$	magnetische Induktion, Flussdichte
$b_{Stator}$	Statorbreite
$H$	Hubzahl
$f$	Frequenz
$f_N$	Nennfrequenz
$I, i$	Strom
$J$	Stromdichte
$l$	Vorschublänge
$L$	Induktivität
$F$	Kraft
$F_L$	Lorentz-Kraft
$F_V$	Vorschubkraft
$M_{ij}$	Koppelinduktivität
$n$	Drehzahl
$R_{Str}$	Strangwiderstand
$U$	Spannung
$U_N$	Nennspannung
$v$	Geschwindigkeit
$v_{rel}$	Relativgeschwindigkeit
$\delta_L$	Luftspalt
$\phi$	Vorschubwinkel
$\tau_P$	Polteilung
$\omega$	Kreisfrequenz
$\tau$	Zeitkonstante
$\varphi_{ue}$	Überdeckungswinkel

## 12 Literaturverzeichnis

- ANDR-10 Andritz Kaiser: Dynamische Servopresse mit hoher Flexibilität bei neuen Produktionstechniken, blechnet, Ausgabe 03, 2010
- BEHR-08 Behrens, B.-A.; Marthiens, O.; Marthiens, K.: Verfahren und Vorrichtung zum berührungslosen Bewegen von elektrisch leitfähigen Elementen, Patentanmeldung [EP000002104209A2](#) vom 11.03.2008, veröffentlicht am 23.09.2009
- BEHR-09 EP 2 104 209 A2: Method and device for touchless movement of electrically conductive elements, Europäische Patentanmeldung, Anmeldedatum: 11.3.2009, Veröffentlichungsdatum: 23.9.2009, Erfinder: Behrens, B.-A.; Marthiens, O.; Marthiens, K
- BEHR-10 Behrens, B.-A.; Doege, E.: Handbuch Umformtechnik - Grundlagen, Technologien, Maschinen; Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- BEHR-11 Behrens, B.-A.; Marthiens, O.; Mahler, H.: Kontaktfreier Vorschub für die blechverarbeitende Industrie, 20. Umformtechnisches Kolloquium Hannover (UKH 2011), Tagungsband, Februar 2011
- BEHR-13 Behrens, B.-A.; Teichrib, S.: Kontaktfreier Vorschub für hohe Bandgeschwindigkeiten, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben IGF 16749 N/1, Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (VDW) – Forschungsinstitut e.V., 2013
- BEYE-10 Beyer, J.: Energieeffiziente Servopressen - Energieeinsparung durch ServoDirekt-Technologie, In: Tagungsband Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik, Kolloquium eniPROD, Chemnitz, 2010. - ISBN 978-942267-00-7
- BRIN-03 Brinkemper, J.: Hommage an die Wirtschaftlichkeit, Lust Antriebstechnik GmbH, In: Konstruktion & Entwicklung, Ausgabe 8, S. 40-43, 2003
- BUDI-83 Budig, P.-K.: Drehstromlinearmotoren, Huthig Verlag, Heidelberg, 3. Auflage, ISBN 3-7785-0168-0, 1983
- CON-14 Homepage der Firma Control Techniques GmbH: [www.controltechniques.de](http://www.controltechniques.de), zuletzt aufgerufen am 19.05.2014
- GOL07a Goloshchenko, S: Material formability and coil design in electromagnetic forming, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 16 (3), S. 314–320, 2007
- GOL07b Golowin, S.; Kamal, M.; Shang, J.; Portier, J.; Din, A.; Daehn, G.; Bradley, J.; Newman, K.; Hatkevich, S.: Application of a Uniform Pressure Actuator for Electromagnetic Processing of Sheet Metal, J. of Materials Engineering and Performance, Vol. 16 (4), S. 455–460, 2007
- GRO10 Grop, H.: Investigation of AC Electrical Machine Stators with Fractional Conductor Windings, KTH Stockholm, Schweden, Lizenziatsarbeit, 2010

- GUEC-05 Gücker, J. U.: Experimentelle Identifikation und nichtlineare Regelung eines einachsigen servohydraulischen Antriebs, Kassel, Universität, Fachbereich Maschinenbau, Diss., 2005. – ISBN-10 3-88958-185-7
- HAUR-74 Hauri, H: Zuführeinrichtungen für Bänder und Streifen zu Stanzpressen - Teil 2, TECHN.RDSCH. \* Band 66 (1974) Heft 18
- HEIM-07 Heimann, B.; Gerth, W.; Popp, K.: Mechatronik, Hanser Verlag, München, Wien, 3. Auflage, ISBN-10 3-44640599-2 , 2007
- HIPP-09 Hippe, P.; Wurmthaler, C.: Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen, Springer Berlin, 3. Auflage, ISBN 978-3-540-89612-8, 2009
- KIEL-07 Kiel, E.: Antriebslösungen – Mechatronik für die Produktion und Logistik, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-73425-3, 2007
- KLEM-09 Klement, J.: Technologie der elektrischen Direktantriebe, Expert Verlag, Renningen, ISBN 978-3-8169-2822-5, 2009
- KRAU-10 Krause, J.: Vernetzte Welten – auch in der Antriebstechnik, Elektrotechnik und Automation, Heft 10, 2003
- KRIM-13 Krimm, R.; Teichrib, S.: Electromagnetic Material Feeder for High Speed Rates, Advanced Materials Research, Vol. 769, S. 213-220, 2013
- KUHN-10 Kuhn, D.: Servopressen erobern den Markt für Umformtechnik, Maschinenmarkt, 2010
- LUTZ-07 Lutz, H.; Wendt, W.: Taschenbuch der Regelungstechnik, Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 7. Auflage, ISBN 978-8171-1807-6, 2007
- MOSE-72 Mosenbach, H.: Effekte der endlichen Länge und Breite bei asynchronen Linearmotoren in Kurzständer- und Kurzläuferbauform, Universität Braunschweig, Dissertation, 1972
- PAPP-08 Pappe, I.; Wiedemann, W.: : Servopressen - So viel Energie wie nötig, Blech InForm, Carl Hanser Verlag, München, Ausgabe: 4, 2008
- PROB-11 Probst, U.: Servoantriebe in der Automatisierungstechnik, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011. - ISBN 978-3-8348-0927-8
- PSYK-11 Psyk, V.; Risch, D.; Kinsey, B. L.; Tekkaya, A. E.; Kleiner, M.: Electromagnetic Forming – A Review, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211 (5), S. 787-829, 2011
- QUES-10 Quest TechnoMarketing: Die Zukunft des Servoeinsatzes im deutschen Maschinenbau bis 2010, Bochum, 2010
- RAST-13 Homepage der Firma Raster Technology GmbH: [www.raster-maschinen.de](http://www.raster-maschinen.de), zuletzt aufgerufen am 23.01.2013
- RSA-12 Firma RSA cutting systems GmbH: Hochleistungssägen Modulare Bearbeitungszentren für anspruchsvolle Kunden, Produktbeschreibung, 2012

- SCHR-09 Schröder, D.: Elektrische Antriebe – Grundlagen, Springer Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-02989-9, 2009
- SEW-13 Homepage der Firma SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG: [www.sew-eurodrive.de](http://www.sew-eurodrive.de), zuletzt aufgerufen am 20.06.2013
- TEIC-14 Teichrib, S.; Krimm, R.; Behrens, B.-A.: Electromagnetic Sheet Metal Feeder, Key Engineering Materials, Vols. 611-612, S. 939-946, 2014
- TEIC-13 Teichrib, S.; Krimm, R.: Electromagnetic Material Feeder for High Speed Rates. Advanced Materials Research Vol. 769, pp 213-220, Trans Tech Publications, Switzerland, 2013
- WAN-86 Wanzke, M.: Entwicklung eines lärmarmen, anschlaglosen Zangenvorschubgerätes mit Eigenantrieb, auch für vorhandene Pressen und Stanzen. Bremerhaven, Wirtschaftsverl. N.W., 1986
- WECK-06 Weck, M.; Becher, C.: Werkzeugmaschinen 3 – Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 10 3-540-22506-4, 2006
- WEH-74 Weh, H.: Elektrische Linearantriebe – Stand der Entwicklung, Braunschweig, 1974
- WIC-11 Wichtelhuber, H.: Stangenmaterial konturunabhängig beschicken, gefunden auf <https://www.maschinenmarkt.vogel.de>, zuletzt aufgerufen am 23.5.2018
- WÖRN-05 Wörn, H.; Brinkschulte, U.: Echtzeitsysteme: Grundlagen, Funktionsweisen, Anwendungen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2005. – ISBN 10 3-540-20588-8
- ZAR10 Zare Bazghaleh, A. ; Naghashan, M. R.; Mahmoudimanesh, H.; Meshkatoddini, M. R.: Effective Design Parameters on the End Effect in Single-Sided Linear Induction Motors, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 40, No. 4, 2010
- MAH-18 Maha Korz GmbH, Homepage der Firma <http://www.mahakorz.de/projekte-maschinenbau-sonderanlagen/vollautomatisierte-zufuehrung-von-kurzen-und-langen-stangenabschnitten/>, zuletzt aufgerufen 30.06.2018
- HAA-18 HAAS Automation Inc; <https://int.haascnc.com>, zuletzt aufgerufen: 30.06.2018
- LUH-10 Luhmann, T.: Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 3. Auflage, ISBN 978-3-87907-479-2, Wichmann Verlag , 2010
- SCR-05 Schreer, O. : „Stereoanalyse und Bildsynthese“, ISBN 978-3-540-23439-5, Springer Verlag, 2005
- GOB-06 Gobrecht, J.: Werkstofftechnik - Metalle, Springer Verlag, ISBN 3-486-57903-7, 2006

### 13 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und Veröffentlichungen sowie die Realisierbarkeit des aktualisierten Transferkonzepts

Mit den durchgeführten Transfermaßnahmen wurde ein breites Spektrum an Interessierten angesprochen. Durch die regelmäßige Vorstellung der Ergebnisse in den Arbeitskreisen und den Treffen der projektbegleitenden Ausschüsse erfolgte ein direkter Transfer in die Wirtschaft, oftmals mit direkten Vertretern der jeweiligen Entwicklungsabteilungen. Im Rahmen von Lehrveranstaltungen konnten die Ergebnisse an den interessierten Nachwuchs vermittelt werden.

Mittels der weiteren Transfermaßnahmen erfolgt eine weitere Verbreitung der Ergebnisse. Mit der Vorstellung und Veröffentlichung der Ergebnisse auf dem WGP-Kongress und in weiteren Fachzeitschriften erreichen die Ergebnisse eine breite Masse an Zuhörern. Mittels der Summe an verschiedenen Kanälen, auf denen über die Ergebnisse des Projekts berichtet wird, besteht eine ausreichend hohe Verfügbarkeit der Ergebnisse, sodass interessierte KMU auf die Thematik aufmerksam werden können. Einige der Maßnahmen nach Projektende wurden bereits angestoßen bzw. befinden sich in der Vorbereitung.

Die Realisierbarkeit des aktualisierten Transferkonzepts ist damit gegeben und stellt eine breite Veröffentlichung der Ergebnisse sicher.

*Tabelle 4: Fortgeschriebener Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft*

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Gezieltes Ansprechen von Unternehmen, auch außerhalb des PbA	Gezielte Information, gezielte Klärung von Fertigungsmöglichkeiten der Primärteile	Telefonischer Kontakt mit Fachpersonal	Im Berichtszeitraum erfolgt
Projektpräsentation auf der lehrstuhleigenen Homepage	Information des Projektinhalts	Internet	Seit 02/2016
Vorstellung der Zwischenergebnisse im projektbegleitenden	Information der PbA-Mitglieder	PA-Sitzungen	10/2015,03/2016, 05/2017,09/2017, 03/2018

Ausschuss			
Vorstellung der Zwischenergebnisse im Arbeitskreis	Information zugehöriger Mitglieder	Arbeitskreis	04/2016,10/2016, 04/2017,09/2017, 03/2018
Vorstellung des Vorschubsystems in Lehrveranstaltung für Maschinenbaustudenten	Nachwuchsförderung	Lehrstuhleigene Vorlesung „Umformmaschinen“	Im II. Quartal erfolgt
Ausstellen des gefertigten Demonstrators	Information über das Vorschubsystem	Besuche des Instituts durch Industrievertreter	Seit 02.2017
Gezieltes Ansprechen von Unternehmen, auch außerhalb des PbA	Gezielte Information des Projektinhalts und der Ergebnisse	Institutspräsentation	10/2016
Veröffentlichung von Projektinhalten auf der VDW-Homepage	Information von Interessenten	Internet	Halbjährliche Aktualisierung
Veröffentlichung der Forschungsergebnisse	Information eines praxis- und wissenschaftsorientierten Publikums	Scientific.net	
Erstellung eines Abschlussberichts	Darstellung der Forschungsergebnisse	Projektbearbeitung	Erledigt

### Maßnahmen nach Ende der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Vertrieb des Abschlussberichts durch den VDW	Verbreitung der Ergebnisse	Internet	Nach Fertigstellung des Berichts
Veröffentlichung der Forschungsergebnisse in Fachzeitschriften sowie	Information eines praxisorientierten Publikums	Fachzeitschriften (z.B. UTF Science)	Nach Projektende

Konferenzen			
Persönliche Präsentation der Forschungsergebnisse	Aufmerksam machen auf die Technologie, Verbreiten der Ergebnisse	WGP-Kongress	11/2018
Vorstellung der Ergebnisse und des Vorschubes am IFUM	Gezielte Information über die Ergebnisse	Besuche des Instituts durch die Industrie	Auch nach Projektende
Gezieltes Ansprechen von Unternehmen	Gezielte Information, gezielte Klärung von Umsetzungsmöglichkeiten in den Firmen	Im Rahmen geeigneter Kontakte/ Gespräche	Auch nach Projektende
Vorstellung des Vorschubsystems	Nachwuchsförderung	Nacht des Maschinenbaus	GepI. 11/2018

## 14 Danksagung

Das IGF-Vorhaben IGF18863 N/1 der Forschungsvereinigung VDW-Forschungsinstitut wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Autoren danken der AiF und dem VDW für die Förderung. Weiterer Dank gilt den Mitgliedsunternehmen des projektbegleitenden Ausschusses und Ihren Vertretern für die Unterstützung des Projektes und die gute Zusammenarbeit.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

