

**Advanced Design Project (ADP) am Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau
Technische Universität Darmstadt**



i

Kurzfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Auslegung und Simulation von Schaltaktoriksystemen mit Linearantrieb. Ziel ist es, das Potential eines elektromagnetischen und eines elektrodynamischen Konzepts mit herkömmlichen Schaltwalzensystemen zu vergleichen.

Zunächst wird der Stand der Technik anhand einer Patent- und Literaturrecherche beschrieben. Anschließend werden in der Konzeptphase mögliche Lösungsvarianten ermittelt, verglichen und ausgewählt.

Die gewählten Systeme werden in Matlab-Simulink implementiert, wobei Ergebnisse aus FEM-Simulationen hinterlegt werden.

Anhand der Simulation können die Systeme mit der Schaltwalzenaktorik verglichen werden.

Das Ende dieser Arbeit fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick über zukünftige Entwicklungsstufen und Optimierungsmöglichkeiten solcher Systeme.

Abstract

The purpose of this project is the design and simulation of linear-acting shift actuators. It aims at showing the potential of an electromagnetic and an electrodynamic system compared to usual selector drums.

As a starting point, the currently available technological solutions, obtained through research of available patents and literature, are described. Afterwards various alternative solutions are conceived, compared and selected in the concept stage.

The selected systems are implemented in Matlab-Simulink, backed by results obtained through FEM simulations. Based on these simulations, the new systems can be compared to conventional gear-shifting technologies.

The final part sums up the results and offers an outlook into future development stages and optimization options for the developed systems.

Erklärung

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22 Abs. 7 APB der TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

In der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und elektronische Fassung überein.

Darmstadt, den 31. Januar 2017

Tudor Ifrim
Jonas Lauer
Thorsten Schäfer
Daniel Schön

Thesis Statement pursuant to § 22 paragraph 7 of APB TU Darmstadt

I herewith formally declare that I have written the submitted thesis independently. I did not use any outside support except for the quoted literature and other sources mentioned in the paper. I clearly marked and separately listed all of the literature and all of the other sources which I employed when producing this academic work, either literally or in content. This thesis has not been handed in or published before in the same or similar form.

In the submitted thesis the written copies and the electronic version are identical in content.

Darmstadt, 31. Januar 2017

Tudor Ifrim
Jonas Lauer
Thorsten Schäfer
Daniel Schön

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	ii
Abstract	ii
Erklärung	iii
Inhaltsverzeichnis	iv
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	viii
Abkürzungsverzeichnis	ix
1Einleitung	1
2Grundlagen	2
2.1 Aufgaben des Getriebes	2
2.2 Getriebearten	3
2.2.1 Automatisierte Schaltgetriebe	4
2.2.2 Doppelkupplungsgetriebe	4
2.3 Grundlagen elektromechanischer Wandlungsprinzipien	5
2.3.1 Elektromagnetisches Prinzip	5
2.3.2 Elektrodynamisches Prinzip	9
3Stand der Technik	12
3.1 Elektromagnetischer Schaltaktor von Getrag	12
3.2 Direct Drive von John Deere	13
3.3 Elektromagnetischer Schaltaktor von ZF Friedrichshafen	15
3.4 Mehrpoliger Aktor	15
4Konzeptphase	17
4.1 Anforderungen und Teilaufgaben definieren	17
4.1.1 Anforderungsliste	17
4.2 Funktionsstruktur	18
4.2.1 Energie leiten	19
4.2.2 Einrücken/Ausrücken	19
4.2.3 Schaltstellung/neutrale Lage halten	20
4.3 Morphologischer Kasten	21
4.4 Beherrschung der Variantenvielfalt	22
4.4.1 Elimination von Teillösungen	22
4.4.2 Verträglichkeitsmatrix	23
4.4.3 Paarvergleiche der Teillösungen	23
4.5 Gesamtkonzepte auswählen	24
5FEM Simulation mit FEMM	28
6Elektromagnetisches Modell	30
6.1 Mechanisches Modell	30
6.1.1 Modellierung der Reibkräfte	31

6.1.2	Modellierung der Kontaktkräfte	32
6.2	Elektrisches Modell	33
6.3	Regelung der Elektromagneten	34
6.4	Optimierung des Aktors	36
6.5	Detailauslegung	40
6.6	Vergleich mit alternativen Systemen	42
6.7	Verläufe	42
6.7.1	Szenario 1	43
6.7.2	Szenario 2	45
6.8	Kostenabschätzung	47
7	Elektrodynamisches Modell	48
7.1	Design	48
7.2	FEMM-Modell	48
7.3	Grundgleichungen	49
7.4	Modellbildung:	50
7.4.1	Subsystem Eingangsspannung	50
7.4.2	Subsystem Spule	52
7.4.3	Subsystem Mechanik	53
7.5	Optimierung	53
7.6	Kostenabschätzung	55
7.7	Bauraum	56
7.8	Erwärmung	56
7.9	Verläufe	57
7.9.1	Szenario 1	57
7.9.2	Szenario 2	59
8	Vergleich mit Schaltwalze	61
8.1	Modellierung des Gleichstrommotors	61
8.2	Optimierung des Schaltwalzensystems	62
8.3	Vergleich mit den linear wirkenden Konzepten	65
9	Fazit	66
10	Anhang	67
10.1	Technische Zeichnungen	67
10.2	Parameter des elektromagnetischen Simulink Modells	70
10.3	Parameter des elektrodynamischen Simulink Modells	72
	Literaturverzeichnis	73

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Bedarfskennfeld (grau) und Zugkraftangebot (schwarz) [2, S. 50]	2
Abbildung 2: Sekundärkennfeld eines Verbrennungsmotors mit nachgeschaltetem 4-Gang-Getriebe: Zugkraftdiagramm [2, S. 50]	2
Abbildung 3: Handschaltgetriebe mit Vorgelegewelle [3, S. 17]	3
Abbildung 4: Einteilung der stufigen Getriebearten [5, S. 23]	4
Abbildung 5: Prinzipskizze eines Doppelkupplungsgetriebes [2, S. 174]	5
Abbildung 6: elektromagnetischer Aktor [6, Kap. 6]	6
Abbildung 7: Magnetische Energie und Co-Energie [6, Kap. 6]	9
Abbildung 8: Darstellung der Lorentz-Kraft [6, Kap. 6]	9
Abbildung 9: Induzierte Spannung einer Leiterschleife [6, Kap. 6]	10
Abbildung 10: Tauchspulen Prinzipskizzen [6]	11
Abbildung 11: Schaltaktor von Getrag [11, S. 1]	12
Abbildung 12: Getrag, Einrückvorgang (oben) und Ausrückvorgang (unten) [11, S. 11]	13
Abbildung 13: Direct Drive von John Deere [12, S. 63]	14
Abbildung 14: Direct Drive Aktor, Prinzipskizze	14
Abbildung 15: Elektromagnetischer Schaltaktor von ZF Friedrichshafen [13, S. 18]	15
Abbildung 16: 4-poliger Aktor [14, S. 3]	16
Abbildung 17: Kugelfederarretierung [15]	20
Abbildung 18: Selbsthemmung [16]	20
Abbildung 19: Active Interlock Klauensperre [10]	21
Abbildung 20: morphologischer Baum elektromagnetisches Konzept	24
Abbildung 21: morphologischer Baum elektrodynamisches Konzept	25
Abbildung 22: Vergleich Analytische Herleitung und FEM-Simulation	29
Abbildung 23: 3D Ansicht elektromagnetischer Aktor	30
Abbildung 24: Mechanisches Ersatzmodell	30
Abbildung 25: Subsystem Reibkraft	32
Abbildung 26: Subsystem Anschlag rechts	32
Abbildung 27: Prinzipieller Aufbau des Elektromagneten, Kennlinie unbeeinflusst	33
Abbildung 28: Magnetische Feldlinien und Flussdichte bei aktiver linker Spule	33
Abbildung 29: Verringern des Kraftgradienten durch Restluftspalt	35
Abbildung 30: Einrückvorgang bei verschiedenen Windungszahlen und gleichen Randbedingungen	37
Abbildung 31: Benötigte Eisendicke bei 19 A	38
Abbildung 32: Ankergeometrie, Variante 1	39
Abbildung 33: Ankergeometrie, Variante 2	39
Abbildung 34: Vergleich der Ankergeometrien	39
Abbildung 35: Optimierte Aktorgeometrie	40
Abbildung 36: Kraftverlauf des optimierten Aktors	41
Abbildung 37: Szenario1 - Kraftverlauf	43
Abbildung 38: Szenario 1 - Spannungsvorgabe	43
Abbildung 39: Szenario 1 - Stromverlauf	43
Abbildung 40: Szenario 1 - Wegverlauf	44
Abbildung 41: Szenario 1 - Induzierte Spannung	44
Abbildung 42: Szenario 1 - Flussverkettung	44
Abbildung 43: Szenario 2 - Kraftverlauf	45
Abbildung 44: Szenario 2 - Spannungsvorgabe	46
Abbildung 45: Szenario 2 - Stromverlauf	46
Abbildung 46: Szenario 2 - Wegverlauf	46
Abbildung 47: 3D-Ansicht	48
Abbildung 48: FEMM-Modell des elektrodynamischen Aktors (Symmetrieachse liegt auf der unteren Bildkante)	49

Abbildung 49: Gesamtsystem	50
Abbildung 50: Subsystem „Eingangsspannung“	51
Abbildung 51: Subsystem: „Positionsregelung“	51
Abbildung 52: Subsystem „Spule“	52
Abbildung 53: Induzierte Spannung durch magnetische Flussverkettung	52
Abbildung 54: Subsystem: „Kugelfeder“	53
Abbildung 55: Lorentzkraft pro Spule und pro Windungen bei 20 A	54
Abbildung 56: Wegverlauf Mittellage	57
Abbildung 57: Geschwindigkeitsverlauf Mittellage	57
Abbildung 58: Spannungsverlauf Mittellage	58
Abbildung 59: Kraftverlauf Mittellage	58
Abbildung 60: Wegverlauf Endpositionen	59
Abbildung 61: Geschwindigkeitsverlauf Endpositionen	59
Abbildung 62: Spannungsverlauf Endpositionen	60
Abbildung 63: Kraftverlauf Endpositionen	60
Abbildung 64: Schaltaktorik mit Schaltwalzen [10, S. 62]	62
Abbildung 65: Leistung des Motors bei verschiedenen Übersetzungen	63
Abbildung 66: Einrückzeit in Abhängigkeit der Übersetzung	64
Abbildung 67: Elektromagnetischer Aktor Konfiguration 1	67
Abbildung 68: Elektromagnetischer Aktor Konfiguration 2	68
Abbildung 69: Elektrodynamischer Aktor	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungsliste	18
Tabelle 2: Morphologischer Kasten	21
Tabelle 3: Reduzierter Morphologischer Kasten	22
Tabelle 4: Verträglichkeitsmatrix	23
Tabelle 5: Paarvergleich Schaltstellung u. neutrale Lage halten	23
Tabelle 6: Paarvergleich Ein- und Ausrücken	23
Tabelle 7: Paarvergleich Energiespeicher	24
Tabelle 8: Übersicht elektromagnetischer Lösungen	26
Tabelle 9: Übersicht elektrodynamischer Lösungen	26
Tabelle 10: Bewertung elektromagnetischer Lösungen	26
Tabelle 11: Bewertung elektrodynamischer Lösungen	27
Tabelle 12: Restluftspalt und benötigter Haltestrom.....	35
Tabelle 13: Vergleich der Einrückzeiten bei verschiedenen Windungszahlen	37
Tabelle 14: Maximalstrom bei verschiedenen Windungszahlen und Spannungen	37
Tabelle 15: Kenndaten, elektromagnetisches System	41
Tabelle 16: Vergleich der gewählten Konstruktion mit alternativen Systemen.....	42
Tabelle 17: Kostenermittlung, elektromagnetischer Aktor	47
Tabelle 18: Kenndaten, elektrodynamisches System	55
Tabelle 19: Preiskalkulation.....	55
Tabelle 20: Einrückzeit der Schaltwalze	64

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ca.	circa
FEM	Finite-Elemente-Methode
ff	nach einer Seitenzahl: und folgende Seiten
Hrsg.	Herausgeber
Kap.	Kapitel
MC	Moving Coil
MM	Moving Magnet
S.	Seite
u.a.	unter anderem
u.s.w.	und so weiter
vgl.	vergleiche
z.Bsp.	zum Beispiel

1 Einleitung

Im Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen übernimmt das Getriebe eine wichtige Aufgabe. Es wandelt die vom Motor bereitgestellten Drehmomente und Winkelgeschwindigkeiten, und passt sie an den Bedarf der jeweiligen Fahrsituation an. Für das Ein- und Auslegen der Gänge wird bei Automatikgetrieben eine Schaltaktorik benötigt um eine formschlüssige Verbindung zwischen An- und Abtriebswelle herzustellen. In der Praxis haben hydraulische, elektromechanische und elektrohydraulische Schaltaktoren Verbreitung gefunden. Gemeinsames Kennzeichen dieser Konzepte ist die relativ hohe Anzahl an komplexen Subsystemen, mit vielen Energiewandlungspunkten, welche zusätzliche Verluste verursachen können.

Die steigende Verwendung von elektrischen Motoren im Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen verändert die Anforderungen an die Schaltaktorik. Die Synchronisierung kann direkt durch eine Regelung der Elektromotoren sichergestellt werden. Dies hat sinkende Stellkräfte zur Folge und ermöglicht den Einsatz von linear wirkenden elektromagnetischen und elektrodynamischen Lösungskonzepten. Diese reduzieren die Komplexität und Verluste bei geringerem Platzbedarf und Gewicht.

In dieser Arbeit wird das Potenzial linearer Schaltaktoriksysteme ermittelt. Dafür wird in einem ersten Schritt eine Analyse des Standes der Technik durchgeführt. Aufbauend auf dieser Literatur- und Patentrecherche wird sowohl ein auf dem elektromagnetischen als auch eine auf dem elektrodynamischen Prinzip beruhende Lösung zum Schalten entwickelt. Während des Entwicklungsprozesses werden ein morphologischer Kasten und verschiedene Methoden zur Beherrschung der Variantenvielfalt eingesetzt.

Anschließend werden die zwei ausgewählten Lösungskonzepte dimensioniert und in Matlab Simulink das physikalische Verhalten simuliert. Die in der Simulation benötigten Kennfelder werden mit einer FEM Simulation generiert. Die Simulationsergebnisse dienen als Grundlage für eine Bewertung des Verhaltens der Aktoren. In einem letzten Schritt werden die Konzepte mit einem konventionellen, rotatorisch wirkenden, elektromechanischen Aktor verglichen.

2 Grundlagen

Um die Notwendigkeit eines Schaltvorganges zu verstehen ist es notwendig die Funktionsweisen und Aufgaben eines Getriebes zu kennen. Diese werden im nächsten Abschnitt erklärt. Anschließend werden das elektrodynamische und das elektromagnetische Prinzip vorgestellt, welche die Grundlagen für die später entwickelten Aktoren darstellen.

2.1 Aufgaben des Getriebes

Die Aufgabe des Getriebes ist es, das vom Motor bereitgestellte Drehmoment dessen Winkelgeschwindigkeit an den jeweiligen Bedarf der Fahrsituation anzupassen. Der Bedarf ergibt sich durch die Addition der Fahrwiderstände: Reib-, Roll-, Luft-, Beschleunigungs-, und Steigungswiderstand. Daraus lässt sich in der Entwicklung eines Kraftfahrzeuges ein Bedarfskennfeld oder „Wunschkenfeld“ erstellen. Dem gegenüber steht das vom Motor bereitgestellte Lieferkennfeld. [1, S. 134]

In Abbildung 1 ist das Zugkraftangebot eines Motors und das Bedarfskennfeld eingezeichnet. Das Bedarfskennfeld ist eine idealisierte Zugrafthyperbel bei gleichbleibender Leistung. Es wird deutlich, dass ein großer Teil der gewünschten Kombinationen aus Zugkraft und Geschwindigkeit nicht erreichbar sind, obwohl die geforderte Leistung, der Nennleistung entspricht. Zur Anpassung des Lieferkennfeldes an das Bedarfskennfeld werden die Momente und Winkelgeschwindigkeiten im Getriebe gewandelt.

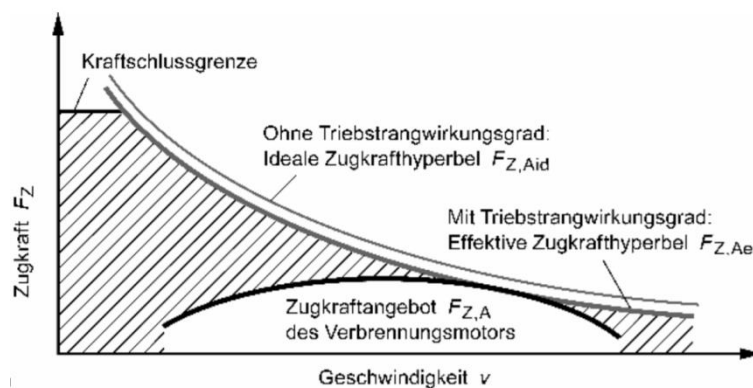


Abbildung 1 Bedarfskennfeld (grau) und Zugkraftangebot (schwarz) [2, S. 50]

In Abbildung 2 ist das Sekundärkennfeld eines Motors mit nachgeschaltetem 4-Gang Getriebe eingezeichnet. Durch die Wandlung der vom Motor bereitgestellten Energie nähert sich das Zugkraftangebot dem Bedarfskennfeld an. Je mehr Gänge ein Getriebe besitzt, desto besser kann das Kraftangebot der idealen Zugrafthyperbel angenähert werden.

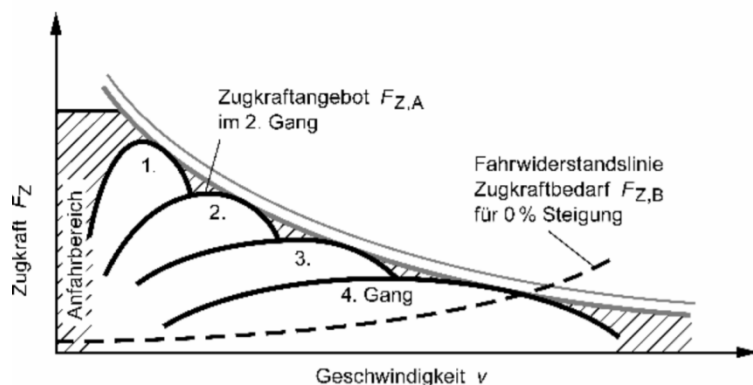


Abbildung 2: Sekundärkennfeld eines Verbrennungsmotors mit nachgeschaltetem 4-Gang-Getriebe: Zugkraftdiagramm [2, S. 50]

Abbildung 3 zeigt eine mögliche Bauart eines typischen stufigen Getriebes mit Vorgelegewelle. Auf der Eingangs- und Ausgangswelle befinden sich jeweils ein Fest- und ein Losrad. Das Losrad ist über eine Schiebemuffe mit der Vorgelegewelle verbunden. Durch axiales Verschieben der Schiebemuffe kann eine formschlüssige Verbindung zwischen einem Losrad und der Vorgelegewelle hergestellt werden. Dadurch wird die Kraft von der Antriebs- auf die Abtriebswelle weitergeleitet. Die Übersetzung wird durch die gewählte Zahnradkombination beeinflusst. Es ist zu erkennen, dass stets nur ein Gang eingelegt werden kann und eine sequentielle Vorgehensweise beim Schalten systemimmanent ist. Der Schaltvorgang besteht aus Kupplung öffnen, Schiebemuffe auslegen, Schiebemuffe einlegen und Kupplung schließen. [3, S. 17]

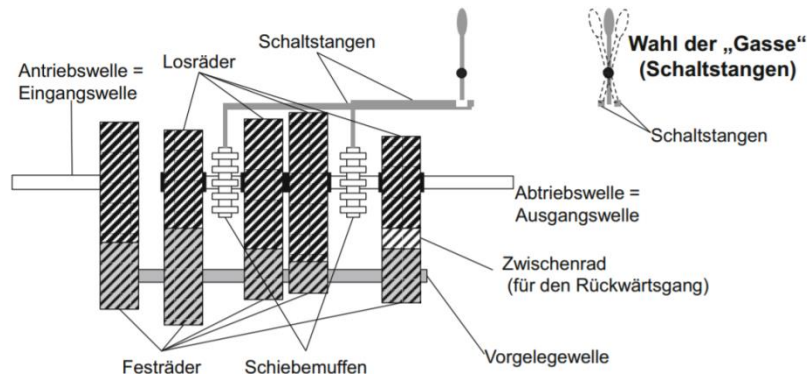


Abbildung 3: Handschaltgetriebe mit Vorgelegewelle [3, S. 17]

Bevor die Schiebemuffe eine formschlüssige Verbindung herstellen kann, ist eine Synchronisation der Drehzahlen notwendig. In konventionellen Getrieben werden Synchronringe dafür eingesetzt. In einigen Hybrid Fahrzeugen kann diese Aufgabe durch den Elektromotor übernommen werden, welcher zwischen Getriebe und Verbrennungsmotor sitzt. Trennt die Kupplung den Verbrennungsmotor von Elektromotor und Getriebe, so arbeitet der Elektromotor alleine und kann die Synchronisation durchführen. [4]

2.2 Getriebearten

Im vorhergehenden Abschnitt wurden die Notwendigkeit von Getrieben und der grundsätzliche Aufbau erläutert. In diesem Abschnitt werden einige ausgewählte Getriebebauarten vorgestellt. Grundsätzlich können Getriebe in stufige und stufenlose Kennungswandler unterschieden werden. Im Folgenden werden nur die stufigen Kennungswandler näher betrachtet. Des Weiteren werden Getriebe danach unterteilt, ob beim Schalten eine Zugkraftunterbrechung auftritt. [5, S. 23]

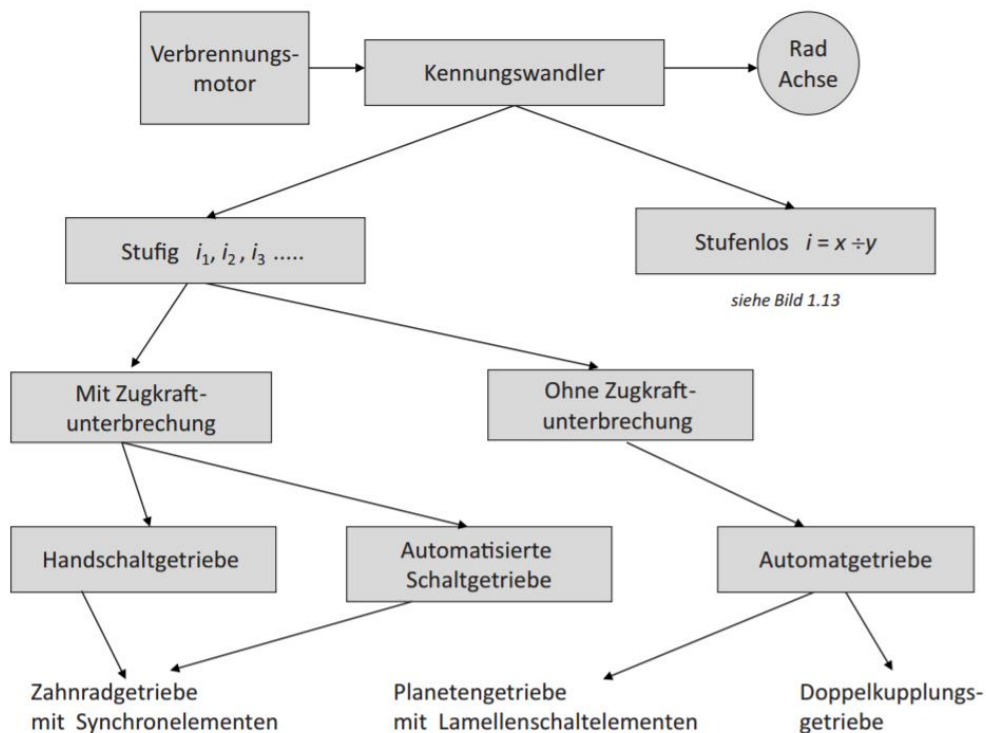


Abbildung 4: Einteilung der stufigen Getriebearten [5, S. 23]

Auf das das automatisierte Schaltgetriebe und das Doppelkupplungsgetriebe wird näher eingegangen. Beide Getriebe basieren auf dem Konzept von Zahnradstufen, kombiniert mit einem schlupfenden Anfahrerelement (Kupplung) und benötigen eine Schaltaktorik. [5, S. 23]

2.2.1 Automatisierte Schaltgetriebe

Bei einem automatisierten Schaltgetriebe wird der Befehl zum Gangwechsel durch eine Steuerelektronik automatisch ausgelöst und die Bewegung der Schaltmuffe erfolgt durch einen Aktor.

Beim automatisierten Schalten wirkt sich die Unterbrechung der Zugkraft negativer auf den Fahrkomfort aus als bei einem Handschaltgetriebe, da der Fahrer nicht weiß wann die Schaltung erfolgt. Insbesondere in kritischen Fahrsituationen wie beispielsweise bei einem Überholvorgang kann diese sehr störend sein. [5, S. 94]

2.2.2 Doppelkupplungsgetriebe

Das Doppelkupplungsgetriebe ist eine Weiterentwicklung des automatisierten Schaltgetriebes mit dem Ziel die Zugkraftunterbrechung zu vermeiden. In Abbildung 5 ist eine Prinzipskizze eines Doppelkupplungsgetriebes dargestellt. Es besteht aus zwei autarken Teilgetrieben die jeweils über eine eigene Kupplung mit dem Motor verbunden ist. Auf dem ersten Teilgetriebe sind die ungeraden Gänge montiert und auf dem zweiten Getriebe sind die geraden Gänge montiert. [2, S. 173]

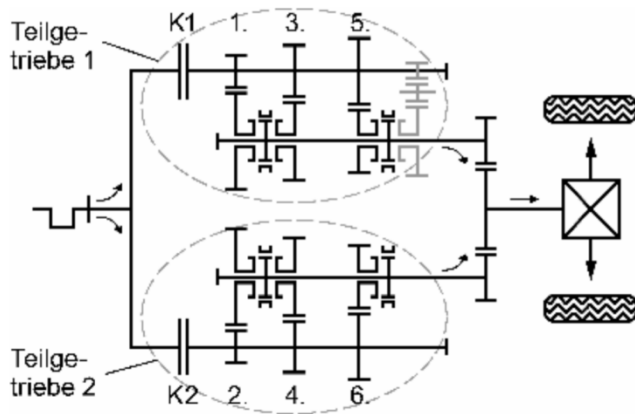


Abbildung 5: Prinzipskizze eines Doppelkupplungsgetriebes [2, S. 174]

Die Funktionsweise eines Doppelkupplungsgetriebes kann am Beispiel einer Hochschaltung vom dritten in den vierten Gang verdeutlicht werden. Wird von der Getriebesteuerung der Befehl zum Hochschalten gegeben, so wird im freien Teilgetriebe der 4. Gang eingelegt. Die Kupplung des zweiten Teilgetriebes befindet sich zu diesem Zeitpunkt in einem geöffneten Zustand. Durch die anschließende Überschneidung der schließenden Kupplung des zweiten Teilgetriebes mit der öffnenden Kupplung des ersten Teilgetriebes wird der Kraftfluss nicht unterbrochen. [2, S. 175]

2.3 Grundlagen elektromechanischer Wandlungsprinzipien

Es existieren zwei Hauptprinzipien mit deren Hilfe elektrische Energie in Bewegung gewandelt werden kann. Die Unterschiede zwischen diesen Prinzipien werden anhand spezifischer Aktoren aufgezeigt. Anschließend werden die einzelnen Prinzipien weiter erläutert.

Der elektromagnetische Aktor basiert auf dem Prinzip der Reluktanzkraft. Die Aktoren sind meist so ausgeführt, dass eine Spule ein Magnetfeld, also eine magnetische Durchflutung erzeugt. Es bildet sich ein magnetischer Kreis. Der sich einstellende magnetische Fluss ist abhängig von der magnetischen Reluktanz (magn. Widerstand) des Kreises. Verläuft dieser Fluss durch Gebiete unterschiedlicher Permeabilität, so entstehen Reluktanzkräfte in Richtung des Gebiets mit der kleineren Permeabilität.

Der elektrodynamische Aktor hingegen basiert auf dem Prinzip der Lorentzkraft. Dies ist die Kraft, die sich einstellt, sobald sich ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld befindet. Das entsprechende Magnetfeld kann sowohl durch Permanentmagnete, als auch elektrisch erzeugt werden. Durch verschiedene Konzepte der Anordnung und Ansteuerung von Leiter und Magnetfeld lassen sich unterschiedliche Arten von Aktoren realisieren. So existieren beispielsweise Rotationsmotoren in Form von Gleichstrom-, Synchron- und Asynchronausführungen sowie Linearaktoren, die als Synchronantrieb, Asynchronantrieb oder als Tauchspule ausgeführt sein können.

2.3.1 Elektromagnetisches Prinzip

Im Folgenden sollen anhand eines Elektromagneten die Grundgleichungen zur Berechnung magnetischer Kreise hergeleitet werden.

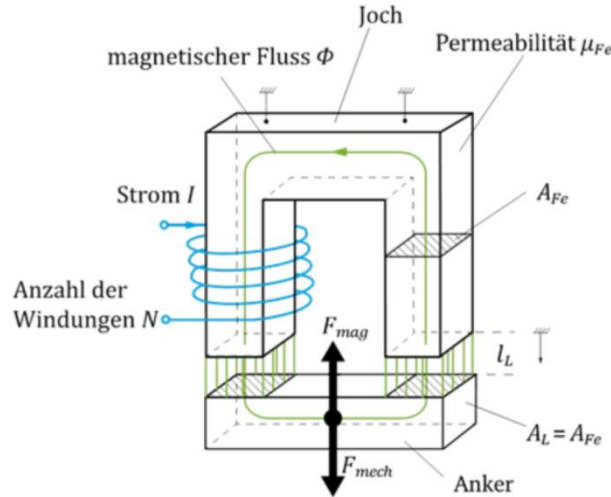


Abbildung 6: elektromagnetischer Aktor [6, Kap. 6]

Wird die Abbildung 6 dargestellte Spule bestromt, so entsteht eine magnetische Durchflutung θ_D . Diese kann nach dem Durchflutungsgesetz aus dem Produkt von Strom I und Windungszahl N ermittelt werden.

$$\theta_D = N \cdot I = \int H dl \quad (1)$$

Infolge der Durchflutung stellt sich im magnetischen Kreis ein über die Querschnittsfläche als konstant angenommener magnetischer Fluss ein. Diese Annahme ist gerechtfertigt, solange keine Streuflüsse existieren. Nimmt man weiterhin an, dass die Querschnittsflächen von Eisen und Luftspalt gleich groß sind, so ist auch die magnetische Flussdichte B konstant. Insbesondere im Luftspalt treffen diese Vereinfachungen in der Realität nicht zu, was für genauere Analysen berücksichtigt werden muss [6, Kap. 6]. Wird B als konstant angenommen, so folgt, dass die magnetische Feldstärke H abschnittsweise konstant ist und nur von der Permeabilität μ des Materials im jeweiligen Abschnitt abhängt.

$$B_{Fe} = \mu_{Fe} \cdot H_{Fe} = \mu_0 \cdot \mu_{r,Fe} \cdot H_{Fe} \quad (2)$$

$$B_L = \mu_L \cdot H_L = \mu_0 \cdot H_L \quad (3)$$

Unter der Annahme, dass H über seinen jeweiligen Abschnitten konstant ist, gilt:

$$\int H dl = H_{Fe} \cdot l_{Fe} + 2 \cdot H_L \cdot l_L \quad (4)$$

Durch Einsetzen und vereinfachen der 4 oben genannten Gleichungen erhält man schließlich:

$$\theta_D = \frac{B_{Fe}}{\mu_0 \cdot \mu_{r,Fe}} \cdot l_{Fe} + \frac{B_L}{\mu_0} \cdot 2 \cdot l_L = \Phi \cdot \left(\frac{l_{Fe}}{\mu_0 \cdot \mu_{r,Fe} \cdot A} + 2 \cdot \frac{l_L}{\mu_0 \cdot A} \right) \quad (5)$$

$$\theta_D = (R_{m,L} + R_{m,Fe}) \cdot \Phi \quad (6)$$

$$I \cdot N = (R_{m,L} + R_{m,Fe}) \cdot B \cdot A \quad (7)$$

$$\theta_D = R_m \cdot \Phi \quad (8)$$

Die magnetische Durchflutung ergibt sich aus dem Produkt von magnetischem Widerstand R_m und magnetischem Fluss Φ . Man erkennt die Analogie zum elektrischen Kreis. Auch hier können die Kirchhoffschen Regeln (Maschenregel + Knotenregel) angewendet werden um komplexere Anordnungen zu berechnen. Jedoch

müssen die schon erwähnten Streuflüsse noch berücksichtigt werden. Der Gesamtfluss ergibt sich durch Addition von Streufluss Φ_σ und Wirkfluss Φ_L . Der Streufluss wird meist durch den Streufaktor σ abgeschätzt.

$$\Phi_{gesamt} = \Phi_L + \Phi_\sigma \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{\Phi_\sigma}{\Phi_{gesamt}} \quad (10)$$

Nun soll aus obiger Gleichung die Reluktanzkraft bestimmt werden. Hierzu wird die Energiebilanz im magnetischen Kreis aufgestellt:

$$W_{el} + W_{mech} = W_{mag} \quad (11)$$

Die Energie im magnetischen Kreis setzt sich zusammen aus der magnetischen Energie die durch die Spule eingespeist wird, der mechanischen Arbeit durch Bewegung des Ankers, sowie der elektrischen Energie. Wenn man annimmt, dass B , und hiermit auch Φ konstant ist, gilt:

$$W_{el} = \int_0^t N \cdot I \cdot \frac{d\Phi}{dt} dt = 0 \quad (12)$$

Wird die Spule also kontinuierlich bestromt um einen konstanten magnetischen Fluss aufrecht zu erhalten, so wird keine Energie durch die Spule in den Magnetkreis eingebracht. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Spule ohne Energiezufuhr betrieben werden kann. Die dem elektrischen Kreis zugeführte Energie dissipiert in Form von Wärme. Somit folgt, dass zwischen der geleisteten mechanischen Arbeit und der magnetischen Energie im Magnetkreis bei konstantem Fluss ein Gleichgewicht entsteht.

$$W_{mech} = W_{mag} \quad (13)$$

Die mechanische Kraft ergibt sich aus der Änderung der mechanischen Energie entlang des Weges.

$$F_{mech} = \frac{dW_{mag}}{dl_L} \quad (14)$$

Die magnetische Energie setzt sich aus der Energie im Luftspalt sowie der Energie im Eisen zusammen.

$$W_{mag} = \iint H dB dV = W_{magL} + W_{magFe} \quad (15)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot B_L \cdot H_L \cdot V_L + \frac{1}{2} \cdot B_{Fe} \cdot H_{Fe} \cdot V_{Fe} \quad (16)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \cdot 2 \cdot A \cdot l_L + \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0 \cdot \mu_{r,Fe}} \cdot A \cdot l_{Fe} \quad (17)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2 \cdot A}{\mu_0} \cdot \left(2 \cdot l_L + \frac{l_{Fe}}{\mu_{r,Fe}} \right) \quad (18)$$

Aus Formel 1 und 4 folgt:

$$\theta = \int H dl = H_{Fe} \cdot l_{Fe} + H_l \cdot l_L = \frac{B}{\mu_0} \cdot \left(\frac{l_{Fe}}{\mu_R} + 2 \cdot l_L \right) \quad (19)$$

$$\Rightarrow B = \frac{\Theta \cdot \mu_0}{\left(\frac{l_{Fe}}{\mu_r} + 2 \cdot l_L\right)} \quad (20)$$

Einsetzen von 20 in 18 und anschließendes Ableiten der Gesamtenergie nach dem Luftspalt ergibt:

$$F_{mech} = \frac{dW_{mag}}{dl_L} = \frac{N^2 \cdot I^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{\left(2 \cdot l_L + \frac{l_{Fe}}{\mu_{r,Fe}}\right)^2} \quad (21)$$

Da die Permeabilität von Eisen groß im Vergleich zur Eisenlänge ist, kann das Verhältnis Eisenlänge/Permeabilität für ausreichend große Luftspalte gestrichen werden und man erhält:

$$F_{mech} = N^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot A}{4} \cdot \frac{I^2}{l_L^2} = k_m \cdot \frac{I^2}{l_L^2} \quad (22)$$

Hierbei wurde die Kraftberechnung linearisiert. Bei kleinen Luftspalten ist der Quotient aus Eisenlänge und Eisenpermeabilität nicht mehr vernachlässigbar. Daher gilt bei kleinen Luftspalten die oben genannte Vereinfachung nicht.

Zusätzlich dazu wurde die Flussdichte als konstant angenommen. Bei hohen Strömen müssen außerdem Sättigungseffekte in Betracht gezogen werden. In diesen Fällen muss die Reluktanzkraft über den verketteten Fluss berechnet werden.

Der verkettete Fluss Ψ ist die Summe aller durch die Leiterschleifen verursachten Windungsflüsse Φ .

$$\Psi = N \cdot \Phi = \frac{N^2}{R_m} \cdot I \quad (23)$$

$$R = \frac{l_n}{A \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}; R_{ges} = \frac{1}{A \cdot \mu_0} \cdot \left(l_L + \frac{l_{Fe}}{\mu_{r,Fe}}\right) \quad (24)$$

Die Gleichung für die magnetische Energie lautet:

$$W_{mag} = \int \left(\int H \cdot dB \right) \cdot dV = \iint H \cdot dI \cdot d\Phi = \int I \cdot d\Psi \quad (25)$$

Die Spule erzeugt magnetische Energie und Co-Energie im Luftspalt [7, S. 48–50]. Die Co-Energie ist keine physikalische Größe, kann jedoch genutzt werden um das Kraftpotenzial abzuschätzen. Im stationären Betrieb entspricht die Änderung der Co-Energie der mechanischen Energieänderung. Ableiten der magnetischen Energie ergibt die einwirkende Kraft.

$$\frac{\partial}{\partial l_L} \int I(l_L) \cdot d\Psi = \frac{d}{dl_L} \left(\Psi_0 \cdot I(l_L) - \int \Psi \cdot dI \right); W_{mag}^* = \int \Psi \cdot dI \quad (26)$$

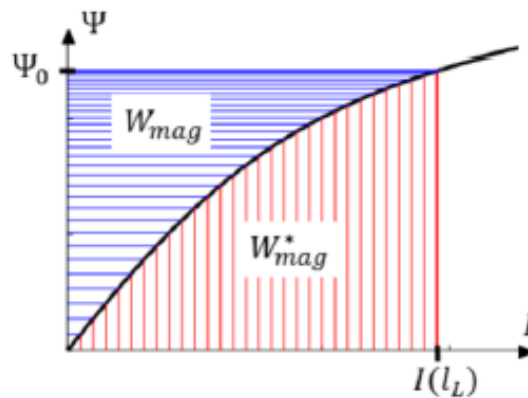


Abbildung 7: Magnetische Energie und Co-Energie [6, Kap. 6]

Die magnetischen Energien und Kräfte sind von dem verketteten Fluss abhängig. Es wird deutlich, dass der Fluss als Kennfeld zur Kraftberechnung hinterlegt werden kann.

2.3.2 Elektrodynamisches Prinzip

Wenn sich eine bewegte elektrische Ladung, beispielsweise ein elektrischer Strom, in einem Magnetfeld befindet, interagiert das Magnetfeld mit dem Magnetfeld der Ladung. Diese Wechselwirkungen rufen eine Kraft hervor, die sogenannte Lorentz-Kraft, die auf eine elektrische Ladung wirkt und diese aus dem Magnetfeld ablenkt (siehe Abbildung 8). Die Gleichung zur Berechnung dieser Kraft lautet:

$$F = I \cdot (l \times B) \quad (27)$$

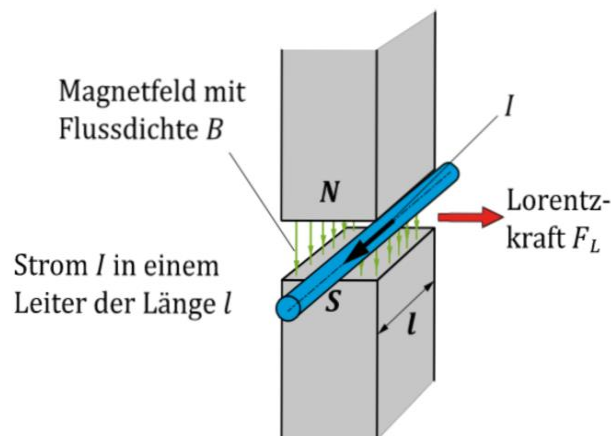


Abbildung 8: Darstellung der Lorentz-Kraft [6, Kap. 6]

Da der Leiter eine Bewegung erfährt, ändert sich der von dem Leiter eingeschlossene magnetische Fluss. Diese Änderung des magnetischen Flusses induziert eine Spannung in der Leiterschleife. Einige elektrodynamische Aktoren nutzen diese induzierte Spannung um den für die Lorentzkraft benötigten Strom hervorzurufen. Dies wird in Abbildung 9 verdeutlicht.

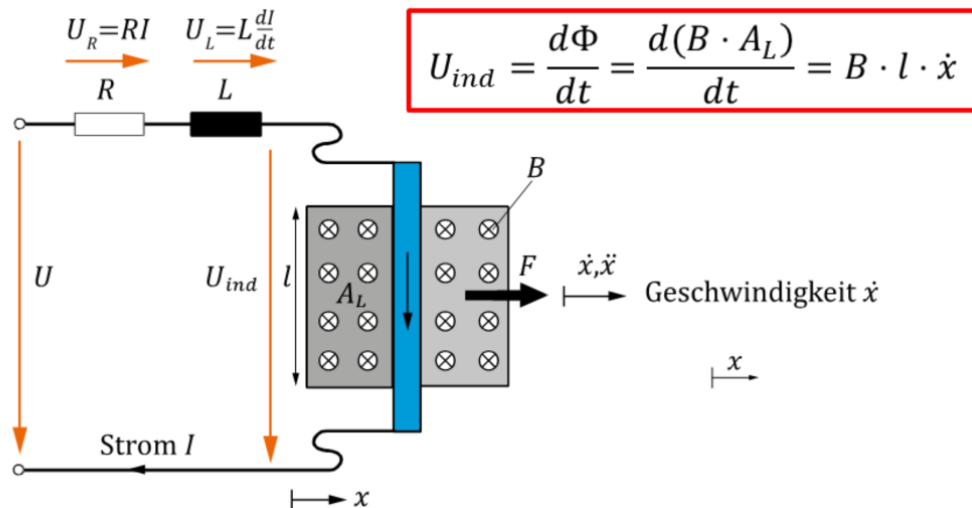


Abbildung 9: Induzierte Spannung einer Leiterschleife [6, Kap. 6]

Beispiele von Aktoren, die das elektrodynamische Prinzip ausnutzen, sind Tauchspulen, Asynchron-, Synchron- und Gleichstrommotoren. Die drei letztgenannten Motoren können auch als Linearaktoren ausgeführt werden. Der Rotor wird dann zum Läufer und kann entlang der Wicklung bewegt werden. Auslegungen mit Eisen im Läufer haben eine höhere Leistungsdichte. Auslegungen ohne Eisen haben eine vergleichsweise gleichförmige Bewegung. Die linearen Ausführungen haben allgemein dieselben Vorteile wie ihre rotatorischen Ausführungen und den Nachteil, dass sie wartungsintensiv sind und einen hohen Strombedarf haben. [8, Kap. Linearmotoren] Die Funktionsweisen der Motoren werden im Folgenden beschrieben:

Asynchronmotor

Der Asynchronmotor besteht aus einem bestromten Stator und einem unbestromten Rotor. Für beide dieser Komponenten sind verschiedene Bauweisen möglich, jedoch nutzen sie das gleiche Antriebsprinzip: Die Bestromung des Stators ruft ein rotierendes magnetisches Feld hervor. Dieses sich verändernde magnetische Feld ruft eine Spannung im Rotor hervor. Diese Spannung treibt einen Strom, der zusammen mit dem vom Stator einwirkenden Magnetfeld den Rotor in Bewegung setzt. Die Bezeichnung dieses Motors stammt von dem zur Induktion benötigten Drehzahlunterschied zwischen Statorfeld und Rotor. Dieser Schlupf genannte Drehzahlunterschied bestimmt die Momentenkennlinie des Motors. Zu den Vorteilen dieses Motors zählt die einfache Ausführung, hoher Wirkungsgrad und Robustheit. [8, Kap. Asynchronmotor]

Synchronmotor

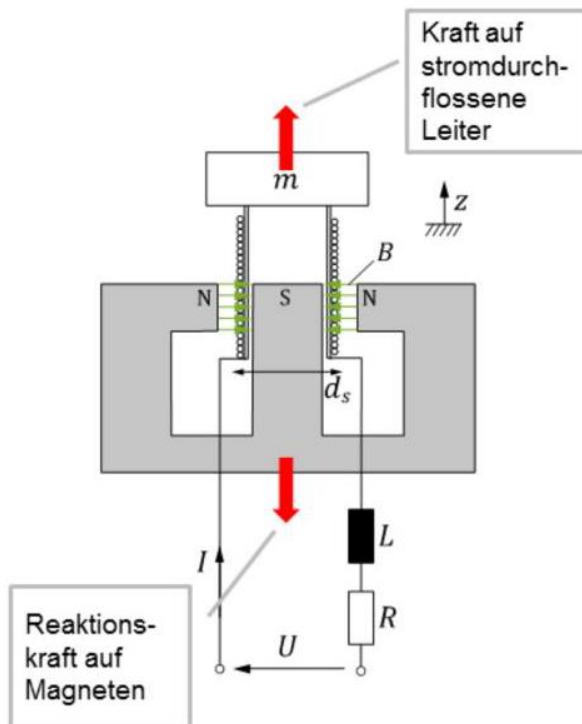
Im Unterschied zum Asynchronmotor erzeugen sowohl Stator als auch Rotor des Synchronmotors ein magnetisches Feld, wobei der Rotor auch ein Permanentmagnet sein kann. Wenn das Feld des Stators zum Drehen gebracht wird, folgt ihm der Rotor gleichschnell, synchron. Kennzeichnend sind die weitestgehend konstante Momentenkennlinie in Abhängigkeit des Lastwinkels zwischen Stator- und Rotordrehfeld.

Gleichstrommotor

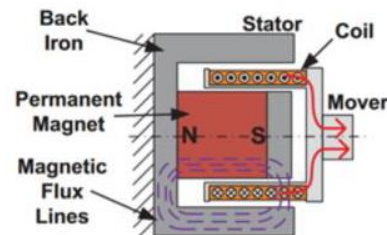
Gleichstrommotoren haben ein statisches Statormagnetfeld und einen drehbar gelagerten Rotor, dessen Leiterschleifen über Kommutatoren mit Strom versorgt werden, um sicherzustellen, dass die Stromrichtung den Rotor immer in der gewünschten Richtung dreht. Gegenüber anderen Motoren ist der Gleichstrommotor besser einstellbar und besitzt eine höhere Leistungsdichte. [9, Kap. Gleichstrommotoren]

Tauchspule

Die weitest verbreitete lineare Ausführung des elektrodynamischen Prinzips ist die Tauchspule. Diese Tauchspule wird von einem magnetischen Feld durchgesetzt, und bei Bestromung der Spule wird diese relativ zum äußeren Magnetfeld von der Lorentz-Kraft bewegt. Konfigurationen wobei die Spule selbst stationär gelagert ist sind nicht unüblich. Tauchspulen sind präzise steuerbar und besitzen eine hohe Dynamik.[6, Kap. 6]



Moving Coil Actuator (auch Voice Coil Actuator)



Moving Magnet Actuator

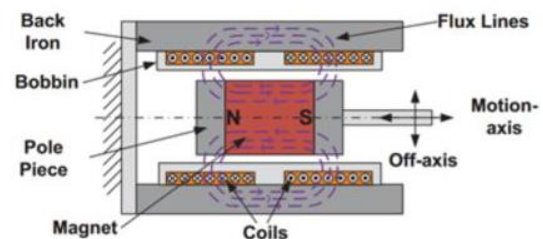


Abbildung 10: Tauchspulen Prinzipskizzen [6]

Es wird zwischen den Konzepten Moving Coil (MC) und Moving Magnet (MM) unterschieden. Bei dem MC-Konzept wird die Spule bewegt, bei MM der Magnet.

3 Stand der Technik

Für das Ein- und Auslegen von Gängen in einem Getriebe kann zwischen drei grundlegenden Lösungsansätzen unterschieden werden. Linear wirkende elektromechanische Aktoren, rotatorisch wirkende elektromechanische Aktoren und (elektro-) hydraulische Aktoren. Für eine Übersicht über Schaltaktoren mit rotatorischen Antrieben wird auf die Arbeit von [10] verwiesen. Da sich diese Arbeit auf linear wirkende elektromechanische Aktoren konzentriert, wird im Folgenden nur auf diese eingegangen.

3.1 Elektromagnetischer Schaltaktor von Getrag

Der Schaltaktor von Getrag beruht auf dem elektromagnetischen Prinzip und kann eine Schaltmuffe in Schaltstellung sowie Neutrallage bringen. Für ein 4-Gang Getriebe wären dementsprechend 4 Aktoren nötig. Durch die Verwendung eines Permanentmagneten wird ein leistungsfreies Halten der Position ermöglicht. Abbildung 11 zeigt eine dreidimensionale Zeichnung der Schaltaktorik. Auf der Welle (12) ist auf der linken Seite ein Losrad (14) angebracht. Die Schaltmuffe (22) ist im geöffneten Zustand gezeigt. Eine Feder (32), welche zwischen dem Radialsteg (34) der Schaltmuffe (22) und einem Sicherungsring (36) liegt, sorgt für eine Vorspannung in der gezeigten Offenstellung. Wird Schaltmuffe (22) nach links geschoben, so wird das Losrad (14) über die Außenverzahnung (28) und Innenverzahnung (24) rotatorisch fixiert. Die ringförmige Aktoranordnung (40) wird an der Getriebeaußenwand (44) befestigt. Eine Ringspule (48) bildet den Elektromagneten (46). Rechts davon befindet sich ein ebenfalls ringförmiger Permanentmagnet (58). Dieser ist radial polarisiert, so dass ein Pol radial Außen liegt, und ein Pol radial Innen liegt. Zu der Permanentmagnetanordnung (56) gehört ein nicht magnetisierbares Trägermaterial (60). Der Spulenkörper (64) ist ebenfalls nicht magnetisierbar. Der magnetisierbare Polkörper (66) ist auf dem Kupplungskörper fixiert und steht dem ebenfalls magnetisierbaren Ankerabschnitt (68) gegenüber. [11, S. 1]

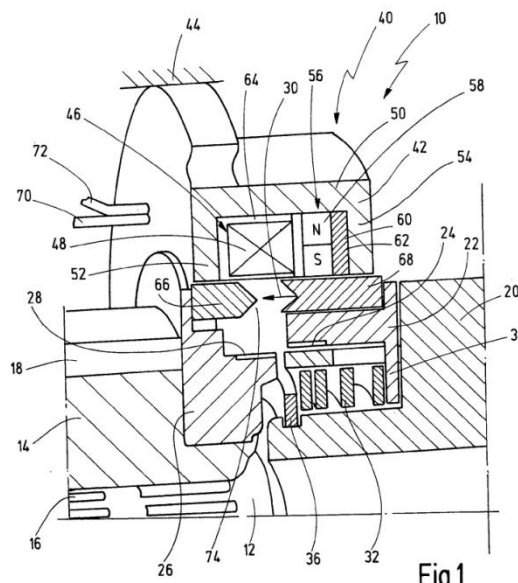


Abbildung 11: Schaltaktor von Getrag [11, S. 1]

In der oberen Zeile von Abbildung 12 ist das Einrücken einer Schaltstufe dargestellt. In der linken Darstellung ist die Spule (48) unbestromt und der Aktor in Ruhestellung. Der Permanentmagnet (58) erzeugt einen magnetischen Fluss, welcher über den Ringsteg (50), den Ringschenkel (54), und den Ankerabschnitt (68) einen magnetischen Kreis bildet. Dieser wird im Folgenden als zweiter magnetischer Kreis (112) bezeichnet. Die Feder (32) und der zweite magnetische Kreis (112) halten die Schaltmuffe (22) in der offenen Position. In der mittleren

Darstellung wird die Schaltmuffe eingerückt. Dazu wird die Spule (48) mit einem positiven Strom bestromt. Dadurch wird ein erster magnetischer Kreis (110) gebildet. Der Kreis erzeugt eine Magnetkraft (114) zwischen den Polkörper (66) und dem Ankerabschnitt (68), sodass der Ankerabschnitt (68) axial verschoben wird, entgegen der Federkraft. Ein Kraftschluss zwischen der Welle (12), der Schaltmuffe (22) und dem Losrad (14) wird hergestellt. Der Gang ist, wie in der rechten Darstellung zu erkennen, eingelegt. Wird der Strom abgeschaltet, so erhält der Permanentmagnet (58) den magnetischen Fluss aufrecht und stellt so leistungsfrei sicher, dass der Gang eingelegt bleibt. [11, S. 5–7]

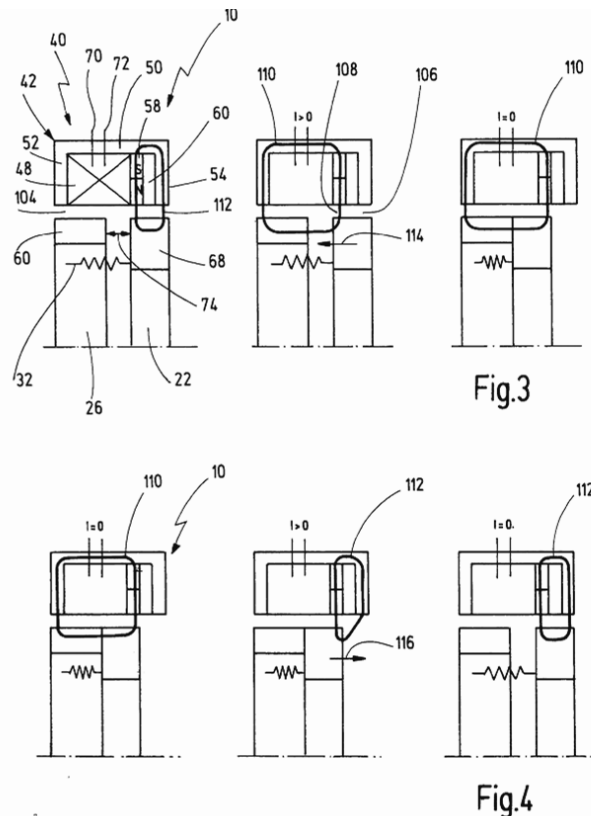


Abbildung 12: Getrag, Einrückvorgang (oben) und Ausrückvorgang (unten) [11, S. 11]

Der Ausrückvorgang ist in Abbildung 12 unten dargestellt. Die Spule (48) wird im mittleren Bild negativ bestromt.¹ Das magnetische Feld der Spule (48) verdrängt das Feld des Permanentmagneten (58) in den zweiten magnetischen Kreis (112). Die magnetische Kraft zwischen dem Polkörper (60) und dem Ankerabschnitt (68) bricht zusammen. Die Federkraft drückt die Schaltmuffe (22) in die Offenstellung und wird dabei von dem zweiten (permanent-)magnetischen Kreis (112) unterstützt. Im Offenzustand wird die Schaltmuffe durch die Feder (32) und den zweiten magnetischen Kreis (112) gehalten. Die Spule (48) kann stromlos geschaltet werden. [11, S. 5–7]

3.2 Direct Drive von John Deere

Das Direct Drive Getriebe von John Deere findet in Landmaschinen Anwendung. Es basiert wie das Patent von Getrag auf dem elektromagnetischen Effekt. Eine Aktoreinheit verfügt jedoch über zwei Spulen und kann so zwei verschiedene Gänge ein- und ausrücken. Abbildung 13 zeigt einen Ausschnitt aus dem Getriebe und der Schaltaktorik. Der Aktor überträgt die Kraft mithilfe des Schaltfingers (shift finger) auf die Schaltstange (shift rod). Diese überträgt die Kraft weiter auf die Schaltgabel (shift fork), welche direkt auf die Schaltmuffe wirkt.

¹ Die negative Bestromung ist in Abbildung 12 nicht korrekt dargestellt.

Fließt kein Strom, so bewirkt die Feder (neutral spring), dass die Schaltstange und die Schaltmuffe (shift collar) zurück in den Offenzustand geht.[12, S. 62–63]

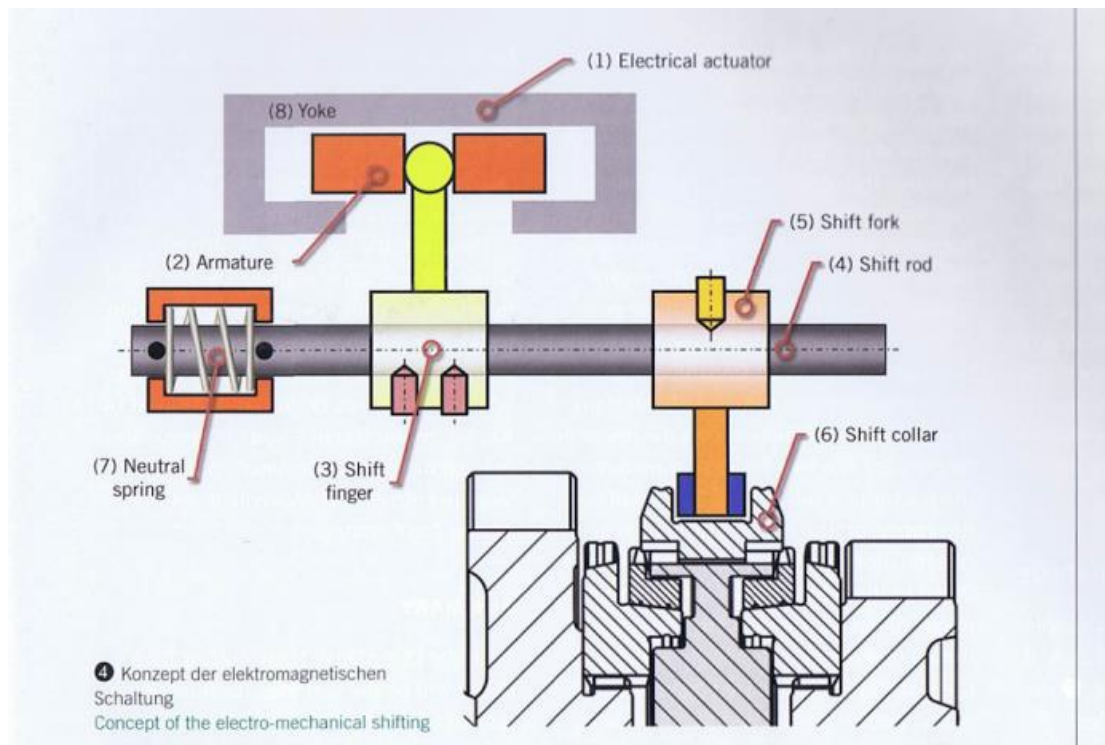


Abbildung 13: Direct Drive von John Deere [12, S. 63]

Im Aktor selbst befinden sich zwei Spulen, welche in Abbildung 14 deutlicher dargestellt werden. Wird die rechte Spule bestromt, so wird ein magnetischer Fluss erzeugt. Der magnetische Kreis geht dabei durch den Anker (Armature) und das umliegende Gehäuse, wodurch eine magnetische Kraft zwischen dem Gehäuse und dem Anker wirkt. Der Anker bewegt sich in diesem Fall nach rechts.

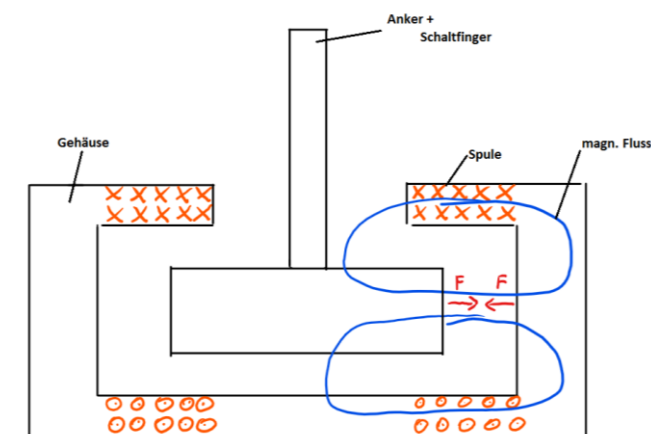


Abbildung 14: Direct Drive Aktor, Prinzipskizze

Ist die gewünschte Position erreicht, so muss der Strom aufrechterhalten werden. Ein leistungsloses Halten des eingelegten Ganges ist nicht möglich. Im Vergleich zu der Lösung von Getrag werden viele mechanische Kraftübertrager benötigt.

3.3 Elektromagnetischer Schaltaktor von ZF Friedrichshafen

Das Patent beruht auf dem elektromagnetischen Prinzip und stellt durch die Bewegung eines Ankers eine formschlüssige Verbindung zwischen zwei Wellen her. [13, S. 1]

Durch die Bestromung einer Spule kann durch den elektromagnetischen Effekt ein Anker bewegt werden. Abbildung 15 stellt schemenhaft den Querschnitt der Verbindungsvorrichtung da. Die Verstellvorrichtung ist ringförmig und coaxial zur Drehrichtung „D“ ausgeführt. Mit dem Anker (10) ist eine Schaltklaue (8,9) verbunden, die über einen Formschluss die Verbindung zwischen an- und abtreibender Welle herstellt. [13, S. 1]

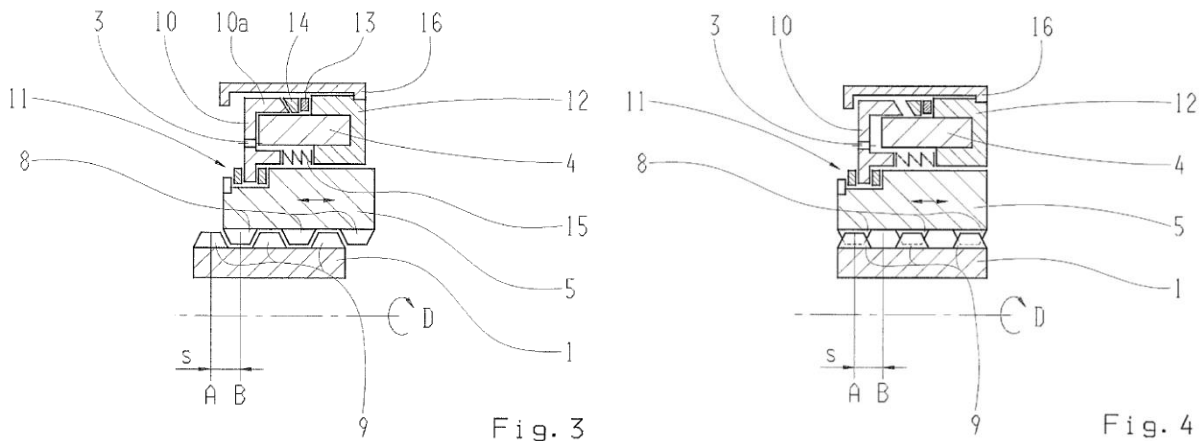


Abbildung 15: Elektromagnetischer Schaltaktor von ZF Friedrichshafen [13, S. 18]

Das Prinzip ähnelt dem elektromagnetischen Schaltaktor von Getrag. Die Schaltmuffe (5) ist fest mit dem Ankerelement (10) verbunden und kann in axialer Richtung bewegt werden. Das Gehäuse (12) ist fest mit der Spule (4) verbunden und ist unbeweglich. Ein ringförmiger Permanentmagnet (13) ist auf dem Magnetjoch (12) aufgebracht. Die Polarisierung des Magneten erfolgt in axiale Richtung, so dass im Offenzustand (linkes Bild, Abbildung 15), der Anker entgegen der Federkraft in der Position gehalten wird. [13, S. 1–11]

Zur axialen Bewegung des Ankers (10) in den eingerückten Zustand wird die Spule (4) so bestromt, dass sich sein Magnetfeld dem Permanentmagneten entgegensetzt und sich der Anker dadurch von seiner Endposition löst und durch die Federkraft nach links verschiebt. Im eingerückten Zustand (rechtes Bild, Abbildung 15) kann die Spule ausgeschaltet werden. Die Position wird durch die Feder gehalten. [13, S. 11]

Soll eingerückt werden, so wird die Spule (4) so bestromt, dass das erzeugte Magnetfeld mit dem des Permanentmagneten (13) übereinstimmt. Dadurch wird eine Kraft zwischen Anker (10) und Magnetjoch (12) erzeugt. Diese führt dazu, dass der Anker (10) sich nach rechts bewegt. Hat der Anker (10) die Position (linkes Bild) erreicht, so kann die Spule (4) ausgeschaltet werden. Der Permanentmagnet (13) hält den Anker in der Position. [13, S. 11]

Für jeden Gang wird ein eigener Aktor benötigt.

3.4 Mehrpoliger Aktor

Ein Prototyp eines 4-poligen Aktors zur Bewegung der Schaltmuffe wurde an der Universität von Sheffield entwickelt. Der Aktor beruht auf dem elektrodynamischen Effekt. Die Spulen stehen fest und der Magnet bewegt sich. Der innere Zylinder besteht aus einem weichmagnetischen Material, auf den außen Magnete aufgebracht sind. Im umhüllenden Gehäuse sind vier Spulen eingebracht, welche bestromt werden und ein magnetisches Feld erzeugen. Durch den elektrodynamischen Effekt wird eine Kraft auf den inneren Zylinder ausgeübt, welcher eine Bewegung in axialer Richtung ermöglicht.

Durch die Kombination mehrerer Spulen und Magnete wird eine Reduktion des Gewichts bei vergleichsweise großen Hübten erreicht. [14, S. 1–5]

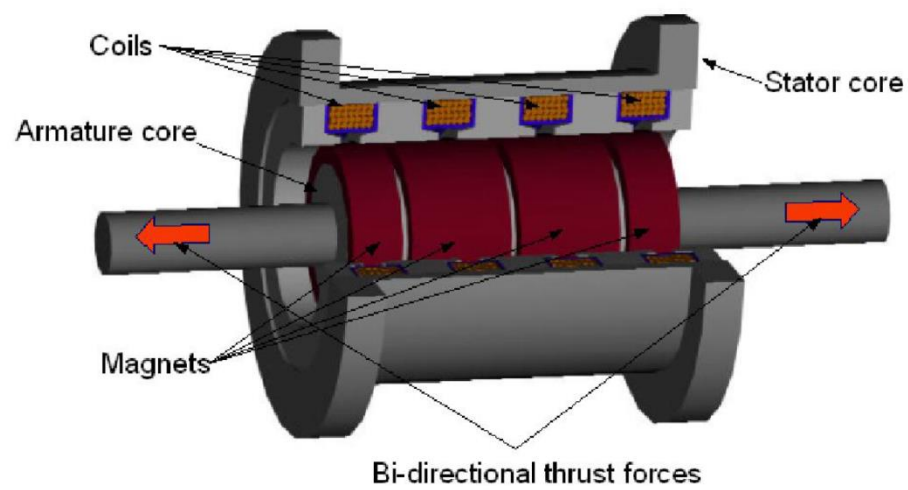


Abbildung 16: 4-poliger Aktor [14, S. 3]

4 Konzeptphase

In der Konzeptphase werden Lösungskonzepte für die Konstruktionsaufgabe entwickelt. Dafür wird zu Beginn eine Anforderungsliste erstellt und die Funktion der Schaltaktorik in Teilfunktionen untergliedert. Für die Teilfunktionen werden Teillösungen gebildet, welche in einem Morphologischen Kasten zusammengefasst werden. Anschließend erfolgt eine Bewertung verschiedener Lösungskonzepte und die Auswahl zweier Konzepte welche später in der Simulation implementiert werden.

4.1 Anforderungen und Teilaufgaben definieren

In einem ersten Schritt müssen die Anforderungen an das System definiert werden. Anschließend wird die Konzeptionsaufgabe in Teilaufgaben unterteilt und für diese Teillösungen ermittelt.

4.1.1 Anforderungsliste

Die Entwicklung und anschließende Bewertung einer Schaltaktorik setzt voraus, dass Anforderungen an das System entwickelt werden. Eine Anforderungsliste sollte möglichst vollständig sein.

Es wird zwischen Festforderungen, Bereichsforderungen, Zielforderungen und Wünschen unterschieden. Nach VDI 222 sind diese wie folgt definiert:

- **Festforderungen (FF)** sind auf jeden Fall zu erfüllen; Lösungen welche nicht den Festforderungen entsprechen, entfallen.
- **Bereichsforderungen (BF)** geben einen Bereich an, in dem sich die geforderte Größe bewegen soll. Das Nichteinhalten der Grenzwerte führt zum Ausscheiden der entsprechenden Lösung.
- **Zielforderungen (ZF)** sollen möglichst erfüllt werden. Das Nichterfüllen von Zielforderungen führt nicht zu einem Ausschluss der Lösung.
- **Wünsche (W)** sind Forderungen welche sich bei einer Erfüllung positiv auf die Bewertung der Lösung auswirken. Die Nichterfüllung von Wünschen führt nicht zum Ausschluss einer Lösung.

Die Anforderungen wurden zum Teil fest vorgegeben. Andere Anforderungen wurden von der Gruppe mit Hilfe von verschiedenen Kreativitätstechniken selbst entwickelt. In Tabelle 1 ist die vollständige Anforderungsliste dargestellt.

Wirkprinzip und -richtung sind durch die Aufgabenstellung definiert, da ein linear-wirkender elektromechanischer Schaltaktuator gesucht wird. Dieser soll mit existierenden rotatorisch-wirkenden elektromechanischen Aktoren konkurrieren können. Dieser Aktor muss in einem begrenzten Bauraum eingebaut werden und eine Schaltmuffe innerhalb von maximal 100 ms um eine Distanz von 10 mm verschieben. Bei der Erfüllung dieser Aufgabe muss er mit bestimmten elektrischen Vorgaben eine jeweils vorgegebene Kraft aufbringen. Dabei soll der Aktor möglichst günstig und einfach umsetzbar sein.

Tabelle 1: Anforderungsliste

Anforderungen				
Bereich	FF/BF/ZF /W	Nr.	Bezeichnung	Wert
Aktorik	BF	1	Wirkprinzip	Elektrodynamisch/ -magnetisch
	FF	2	Wirkrichtung	Linear
Geometrie	BF	3	In Relation zu existierenden Bauteilen	<200 mm x 200 mm x 200 mm, vgl. Schaltwalze
	ZF	4	Bewegte Masse	Masse von Anker+(Schaltgabel)+Muffe
	ZF	5	Masse Muffe	50 g
Funktion	FF	6	Haltekraft	30 N
	FF	7	Reibkraft	50 N
	FF	8	Einrückkräfte (ab 5mm)	250 N
		9	Anzahl einlegbarer Gänge pro Aktor	2
Betrieb	FF	10	Schaltzeiten (Gang einlegen oder auslegen)	100 ms
	FF	11	Hub (Gang einlegen oder auslegen)	10 mm
	BF	12	Maximale Stromstärke	50 A
	FF	13	Vorhandenes Bordnetz	12 V
Weiche Anforderungen	ZF	14	Leistungsbedarf	Geringer als Schaltwalze
	ZF	15	Einfachheit der Konstruktion und Umsetzbarkeit	
	ZF	16	Geringe Kosten	Vgl. mit Schaltwalze

4.2 Funktionsstruktur

Im Folgenden wird die Funktionsstruktur einer Schaltung dargestellt. Diese Aufteilung bildet die Grundlage für den später entwickelten morphologischen Kasten. In dieser Arbeit richtet sich der Fokus auf Schaltungen, bei denen der Aktor nur eine Schaltmuffe bewegt. Die Gangwahl entfällt somit. Der Schaltvorgang wird in folgende Unterfunktionen aufgeteilt:

- Energie leiten,
- Einrücken,
- Ausrücken,
- Schaltstellung halten
- neutrale Lage halten

4.2.1 Energie leiten

Wirkt die mechanische Energie des Aktors nicht direkt auf die Schaltmuffe, so muss die Energie geleitet werden. Die Weiterleitung soll möglichst verlustfrei sein. In der Praxis haben sich Schaltgabeln als Kraftübertrager durchgesetzt. Alternativ kann auf einen Energieleiter verzichtet werden, wenn der Aktor direkt auf der Welle / Schaltmuffe platziert wird.

4.2.2 Einrücken/Ausrücken

Beim Einrücken wird die Schaltmuffe von der Mittelstellung in eine Endlage verschoben. Soll der Gang ausgelegt werden, so wird die Schaltmuffe aus der Endlage zurück in die neutrale Lage geschoben. Beide Funktionen ähneln sich, so dass auf eine getrennte Behandlung möglicher Lösungen verzichtet werden kann. Wird ein Aktor für Einrücken oder Ausrücken verwendet, so besteht die Möglichkeit Rückstellkräfte durch einen Energiespeicher zu erzeugen. Aktor und Energiespeicher werden im Folgenden behandelt.

Der Aktor soll elektrische Energie aufnehmen und in mechanische Energie wandeln. Dies soll mithilfe des elektromagnetischen Prinzips oder des elektrodynamischen Prinzips geschehen. Eine Bedingung aus der Aufgabenstellung ist die direkte Erzeugung einer linearen Bewegung ohne zusätzliche Umformung. Die Funktionsweise der Prinzipien wurde bereits in „Grundlagen elektromechanischer Wandlungsprinzipien“ (vgl. Seite 5) vorgestellt, deswegen wird an dieser Stelle nicht näher auf die Aktoren eingegangen. Aufgrund der geforderten linearen Wirkweise kommen nur die folgenden Aktoren in Betracht:

- Asynchronmotor - Linearmotor
- Synchronmotor - Linearmotor
- Tauchspule (MC)
- Tauchspule (MM)
- Elektromagnet

Das Speichern von Energie kann helfen Rückstellkräfte zu erzeugen. Aufgrund der geringen Energiemengen und hohen Wandlungsverluste ist eine Rückumwandlung der mechanischen Energie in elektrische Energie nicht sinnvoll. Daher werden nur mechanische Energiespeicher betrachtet. Auch Zwischenspeicher-Systeme, welche auf dem hydraulischen oder pneumatischen Prinzip beruhen, werden ausgeschlossen, da sie eine weitere Energiewandlung erfordern.

Feder

Federn werden typischerweise aus metallischem Material mit einer hohen elastischen Verformbarkeit hergestellt. Am weitesten verbreitet ist die Schraubenfeder. Sie wird typischerweise durch eine Axialkraft belastet. Die durch Längenänderung der Feder zugeführte Energie kann durch die Feder gespeichert und nahezu verlustfrei wieder abgegeben werden. Im morphologischen Kasten wird die Feder nicht weiter konkretisiert, so dass eine Anpassung an die Gegebenheiten einer konstruktiven Lösung möglich ist. Gleichwohl erscheint eine Axialfeder als eine der sinnvollsten Lösungen.

Lageenergie

Ein weiteres mechanisches Speicherkonzept nutzt die potentielle Energie durch Lagerung einer Masse auf einem zum Hauptsystem verglichen höherem Punkt. Aufgrund der benötigten Kräfte und Dimensionen wird aber eine unrealistisch hohe Masse benötigt, um eine nutzbare Energiemenge zu speichern.

Schwungrad

Mechanische Energie kann auch in Form von kinetischer Energie gespeichert werden. Eine mögliche Umsetzung stellt der Schwungradspeicher dar, der die Rotationsbewegung einer trägen Masse nutzt. Dieses System ist aber für die Langzeitspeicherung untauglich.

4.2.3 Schaltstellung/neutrale Lage halten

Nachdem die Muffe die gewünschte Position, sei es Gang- oder Neutrallage, erreicht hat, muss sichergestellt werden, dass die Position entgegen etwaiger Störkräfte gehalten wird.

Im Folgenden werden einzelne Teillösungen vorgestellt:

Kugelfeder

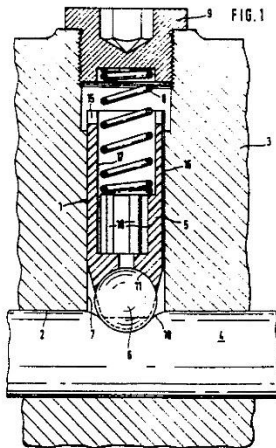


Abbildung 17: Kugelfederarretierung [15]

Die Kugelfederarretierung ist eine mögliche Teillösung zum Halten der Muffe in der gewünschten Position. Dabei rastet ein federndes Druckstück in einer Nut ein. Beim Ausrücken muss die Feder komprimiert und dementsprechend eine Kraft aufgebracht werden. Diese Kraft ist durch die Federsteifigkeit und Tiefe der Nut bestimmt und kann als Haltekraft bezeichnet werden. Eine Technische Zeichnung einer Kugelfeder ist in Abbildung 17 dargestellt.

Selbsthemmung der Übersetzung

Der Selbsthemmungseffekt einer Übersetzung kann zur Positionshaltung der Schaltgabeln, bzw. -muffen genutzt werden. Ein Beispiel ist das Schneckengetriebe. Wenn die Verzahnung einen entsprechend kleinen Steigungswinkel aufweist, tritt Selbsthemmung auf. Man muss bei dieser Teillösung mit einem geringeren Wirkungsgrad rechnen. In Abbildung 18 ist eine mögliche Ausführung einer selbsthemmenden Übersetzung dargestellt.

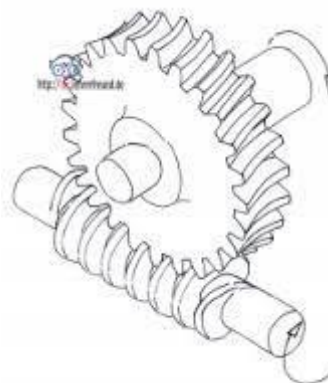


Abbildung 18: Selbsthemmung [16]

Klauen Sperre

Eine Klauen Sperre kann auch für das Halten einer Schaltstellung benutzt werden. Wichtig dabei ist, dass der Abtrieb in seiner Endstelle mechanisch festgehalten wird, damit die Welle nur durch erneute

Antriebsbewegungen ausgelegt werden kann. Als Beispiel dafür wird das Active Interlock gewählt (siehe Abbildung 19), wobei die Schaltwelle mit einem darauf angebrachten Schaltfinger durch Drehung mit einer Schaltschiene „verkantet“ wird. Diese Drehung kann danach nur antriebsseitig rückgängig gemacht werden. Das ist nur eine mögliche Realisierung, Klauensperren können vielfältig ausgeführt werden.

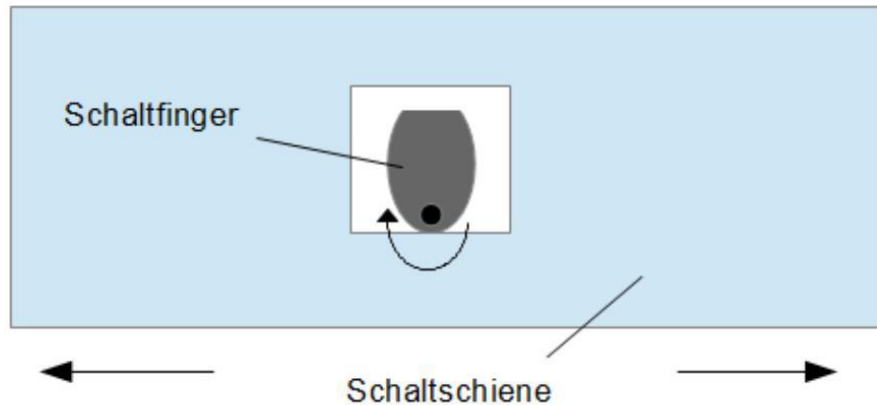


Abbildung 19: Active Interlock Klauensperre [10]

Permanentmagnet

Wird der Anschlag als Permanentmagnet ausgeführt, wird die Schaltmuffe durch den entstehenden magnetischen Kreis in Position gehalten. Auf die Schaltmuffe wirkt dann eine entsprechende Haltekraft in axialer Richtung. Konkret findet diese Teillösung in dem Patent von Getrag Anwendung (vgl. Kap 3.1.)

Haltestrom

Eine weitere Lösung, die gleichzeitig die mechanische Komplexität reduziert, ist das Halten der gewünschten Position durch einen Haltestrom. Hierzu muss permanent elektrische Energie zugeführt werden, um eine Haltekraft sicherzustellen. Es finden keine weiteren mechanischen Bauteile Verwendung. Möglicherweise ist eine Regelung des Stroms notwendig, wenn nicht gegen einen Anschlag gehalten wird.

4.3 Morphologischer Kasten

Der morphologische Kasten überführt alle ermittelten Teillösungen in eine tabellarische Übersicht und erlaubt die Bildung aller möglichen Gesamtlösungen.

Tabelle 2: Morphologischer Kasten

Energie leiten	Kein Leiter	Schaltgestänge						
Einrücken	Feder	Asynchron- Linearmotor	Synchron- Linearmotor	Tauchspule (MC)	Tauchspule (MM)	Elektromagnet	Schwungrad	Lageenergie
Ausrücken	Feder	Asynchron- Linearmotor	Synchron- Linearmotor	Tauchspule (MC)	Tauchspule (MM)	Elektromagnet	Schwungrad	Lageenergie
Schaltstellung halten	Kugelfeder	Selbsthemmung	Permanentmagnet	Klauensperre	Haltestrom			
Neutrale Lage halten	Kugelfeder	Selbsthemmung	Permanentmagnet	Klauensperre	Haltestrom			

Hier sind zwar alle möglichen Gesamtlösungen in ihrer Kombination berücksichtigt, jedoch wird keine Aussage über die Verträglichkeit der Teillösungen untereinander gemacht.

4.4 Beherrschung der Variantenvielfalt

Der Morphologische Kasten weist eine große Variantenvielfalt auf. Es ist nicht praktikabel jede mögliche Gesamtlösung zu analysieren. Aus diesem Grund ist es notwendig die Variantenvielfalt einzuschränken. Dies geschieht über zwei verschiedene Stufen.

4.4.1 Elimination von Teillösungen

In der Gruppe werden die einzelnen Teillösungen besprochen. Lösungen, die nicht umsetzbar oder anderen Lösungen eindeutig unterlegen sind, werden gestrichen.

Ausgeschlossen werden die mechanischen Speichermethoden Lageenergie und Schwungrad, aufgrund ihres Platzbedarfs bzw. benötigter Umformung. Für Ein- und Ausrücken wird auf Linearmotoren insgesamt verzichtet, da sie einen hohen Wartungsaufwand und sehr großen Leistungsbedarf besitzen[8].

Ein Vorteil linear wirkender Aktoren ist, dass auf eine Übersetzung verzichtet werden kann. Wird zum Halten der Position eine selbsthemmende Übersetzung genutzt so geht dieser Vorteil verloren. Die Selbsthemmung wird aus diesem Grund aus dem morphologischen Kasten gestrichen.

Die Klauensperre wird aus den Teillösungen gestrichen, da eine vergleichsweise aufwendige Konstruktion zum Lösen der Sperre benötigt wird.

Ziel ist es den Aktor möglichst einfach und kostengünstig zu gestalten. Die Moving Magnet Variante der Tauchspule erfordert im Gegensatz zur Moving Coil Ausführung keine elektrische Kontaktierung der bewegten Teile und besitzt sonst ähnliche Eigenschaften. Dies reduziert die Komplexität. Daher wurde die Moving Coil Variante aus dem morphologischen Kasten entfernt.

Grundsätzlich ist es möglich den Aktor auf der Welle/ Schaltmuffe zu platzieren. Dadurch kann auf einen Energieleiter verzichtet und Bauraum gespart werden. Die große Stahlwelle begünstigt jedoch Streuflüsse. Um diese zu vermeiden ist eine komplexere Konstruktion notwendig. Wird der Schaltaktor über ein Schaltgestänge mit der Schaltmuffe verbunden, so kann möglicherweise ein leicht angepasster auf dem Markt verfügbare Standardtauchspule oder Standardelektromagnet verwendet werden. Zusätzlich dazu werden keinerlei Veränderungen am Getriebe und der Schaltmuffe durchgeführt. Beide Faktoren senken die Kosten. Es wird sich deshalb dagegen entschieden den Aktor direkt auf der Welle zu platzieren und ein Schaltgestänge verwendet. In Tabelle 3 ist der reduzierte morphologische Kasten dargestellt.

Tabelle 3: Reduzierter Morphologischer Kasten

Energie leiten	Schaltgestänge		
Einrücken	Feder	Tauchspule (MM)	Elektromagnet
Ausrücken	Feder	Tauchspule (MM)	Elektromagnet
Schaltstellung halten	Kugelfeder	Permanentmagnet	Haltestrom
Neutrale Lage halten	Kugelfeder	Permanentmagnet	Haltestrom

4.4.2 Verträglichkeitsmatrix

Bevor Gesamtlösungen entworfen werden können, muss die Verträglichkeit der Teillösungen untereinander bestimmt werden, damit die Variantenflut auf die plausibelsten Optionen reduziert werden kann. Zu diesem Zweck wird eine Verträglichkeitsmatrix in der Gruppe erstellt und vervollständigt.

Tabelle 4: Verträglichkeitsmatrix

	Feder	Tauchspule	Elektromagnet	Haltestrom	Permanentmagnet	Keine Feder
Feder	-	ja	ja	ja	ja	-
Tauchspule	ja	-	-	ja	ja	ja
Elektromagnet	ja	-	-	ja	(ja)	nein
Kugelfeder	ja	ja	nein	-	-	ja
Haltestrom	ja	ja	ja	-	-	ja
Permanentmagnet	ja	ja	(ja)	-	-	ja
Keine Feder	-	ja	nein	ja	ja	-

4.4.3 Paarvergleiche der Teillösungen

Durch einen Paarvergleich der Teillösungen kann eine optimale Gesamtlösung ermittelt werden. Dieser Vergleich wird in der Gruppe anhand der Anforderungsliste und ermittelten Kriterien durchgeführt. Wird eine Teillösung als vergleichbar besser eingestuft, bekommt sie einen Punkt, andernfalls bekommt sie null Punkte.

Es wird mit der Teilaufgabe Schaltstellung/neutrale Lage halten begonnen. Die gefundenen Lösungen werden nach Effektivität, Verklemmungsrisiko, Herstellungsaufwand und Kompatibilität mit den Wirkprinzipien bewertet.

Tabelle 5: Paarvergleich Schaltstellung u. neutrale Lage halten

	Haltestrom	Permanentmagnet	Kugelfeder
Haltestrom	-	0	1
Permanentmagnet	1	-	1
Kugelfeder	0	0	-
Punktsumme	1	0	2

Als nächstes werden die Teilaufgaben Ein- und Ausrücken betrachtet. Diese enthalten die identischen Teillösungen. Die Vergleichskriterien sind Konstruktionsaufwand, Wartungsintensität, Effektivität und Dynamik.

Tabelle 6: Paarvergleich Ein- und Ausrücken

	Tauchspule	Feder	Elektromagnet
Tauchspule	-	0	0
Feder	1	-	1
Elektromagnet	1	0	-
Punktsumme	2	0	1

Die Energiespeicher werden hinsichtlich Integrierbarkeit und Effektivität gewertet.

Tabelle 7: Paarvergleich Energiespeicher

	Feder	Keine Feder
Feder	-	1
Keine Feder	0	-
Punktsumme	0	1

Anhand der Paarvergleiche ergibt sich eine Gesamtlösung mit Kugelfederarretierung für Schaltstellung/neutrale Lage halten, Tauchspule zum Ein-/Ausrücken und keine Energiespeicherung als optimal. Bevor die optimale Lösung betrachtet wird, sollen andere mögliche Lösungen untersucht werden. Hierfür werden zuerst die ausgeschiedenen Teillösungen betrachtet.

4.5 Gesamtkonzepte auswählen

Die Kombinationsmöglichkeiten aus den noch verbleibenden Teillösungen werden in zwei Variantenbäume dargestellt (Abbildung 20 und Abbildung 21). Dabei wird nach elektromagnetischem und elektrodynamischem Prinzip unterschieden. Die rot gekennzeichneten Äste wurden nicht weiterverfolgt. Die Begründung findet sich in den Abschnitten 4.4.1 und 4.4.2.

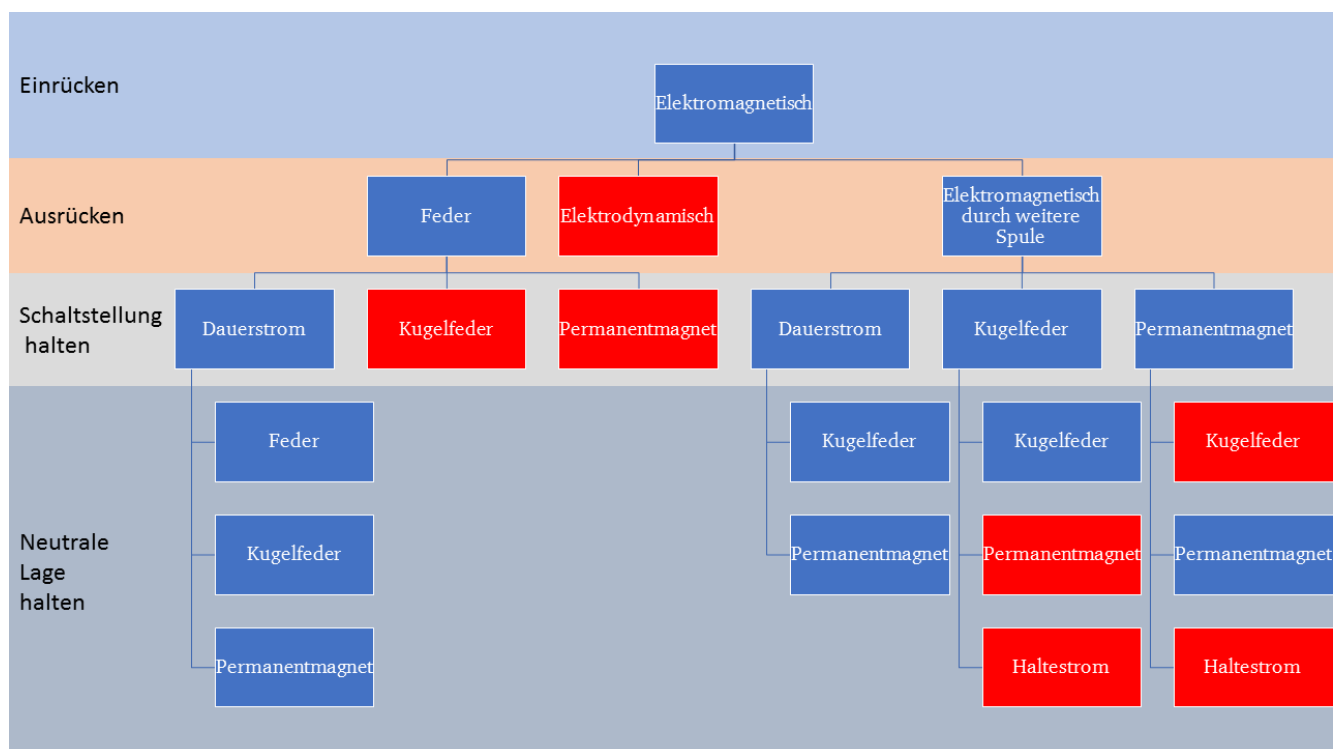


Abbildung 20: morphologischer Baum elektromagnetisches Konzept

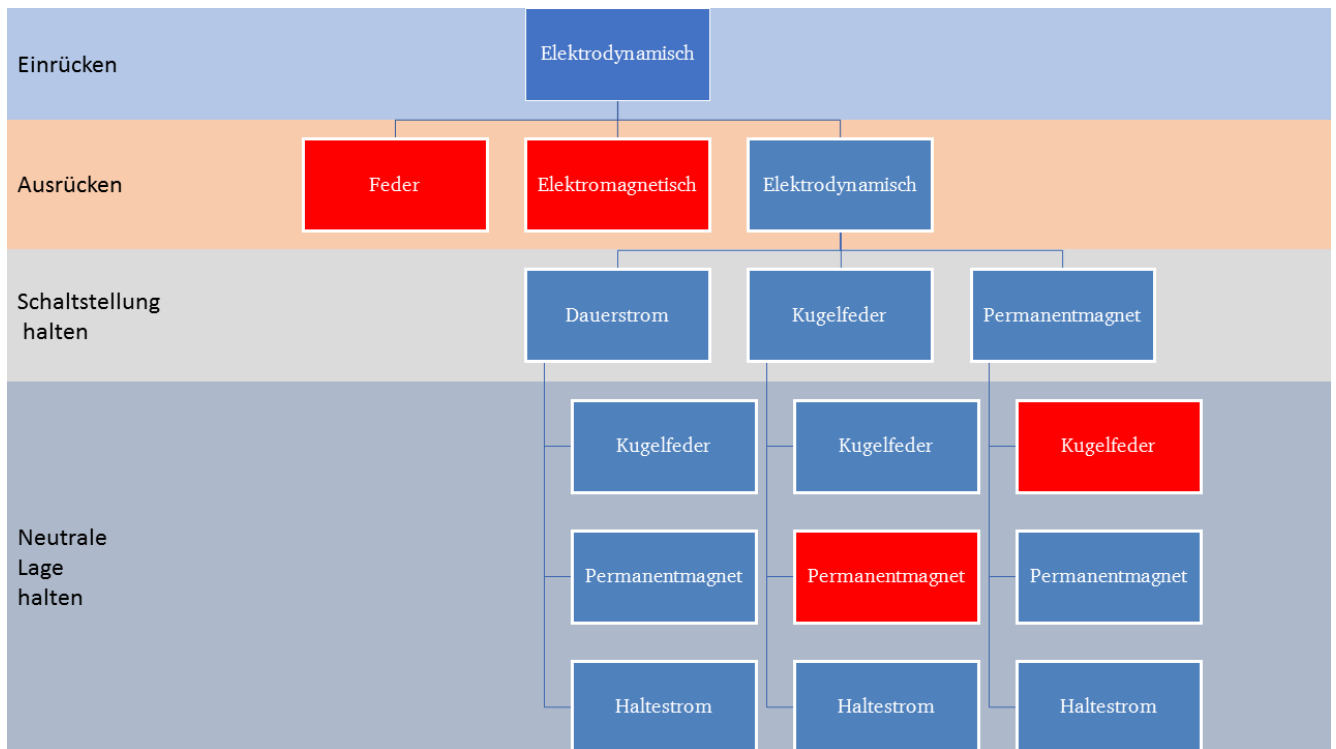


Abbildung 21: morphologischer Baum elektrodynamisches Konzept

Die verschiedenen Ebenen stellen Lösungen für ihre jeweiligen Teilfunktionen dar. In absteigender Reihenfolge sind diese Ebenen „Einrücken“, „Ausrücken“, „Schaltstellung halten“ und „neutrale Lage halten“. Für jeden Baum wurde die Kombination aus elektromagnetischem und elektrodynamischem Prinzip aufgrund der Ergebnisse der Verträglichkeitsmatrix ausgeschlossen.

In Abbildung 20 wird von einem elektromagnetischen Schaltaktor ausgegangen. Wird eine Feder zum Ausrücken eingesetzt, so kann der elektromagnetische Aktor keine zusätzliche Kraft zum Ausrücken beisteuern. Zum Schaltstellung halten bleibt als einzige Teillösung der Haltestrom.

Wird ein weiterer elektromagnetischer Aktor zum Ausrücken verwendet, so werden für die Teilfunktionen „Schaltstellung halten“ und „neutrale Lage halten“ die identischen Teillösungen verwendet. Dies erhöht die Anzahl an Gleichteilen und reduziert die Komplexität des Systems.

Der im zweiten Baum dargestellte Schaltaktor nutzt zum Ein- und Ausrücken das doppelt wirkende elektrodynamische Prinzip. Damit ist kein Energiespeicher nötig.

Als Teillösungen für „Schaltstellung halten“ und „neutrale Lage halten“ bieten sich Dauerstrom, Einrasten und Permanentmagnete an.

Da jetzt Gesamtlösungen zur Verfügung stehen, sollen diese bewertet und anschließend die optimale Lösung ausgewählt werden. Hierfür werden die Gesamtlösungen durchnummeriert und anhand eines Punkteverteilungssystems werden die jeweils besten elektrodynamischen und elektromagnetischen Ausführungen gewählt.

Die elektromagnetischen Lösungsvarianten sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Übersicht elektromagnetischer Lösungen

Lösungsnummer	Einrücken	Ausrücken	Schaltstellung halten	Neutrale Lage halten
1	Elektromagnet	Feder	Haltestrom	Feder
2	Elektromagnet	Feder	Haltestrom	Kugelfeder
3	Elektromagnet	Feder	Haltestrom	Permanentmagnet
4	Elektromagnet	Zweite Spule	Haltestrom	Kugelfeder
5	Elektromagnet	Zweite Spule	Haltestrom	Permanentmagnet
6	Elektromagnet	Zweite Spule	Kugelfeder	Kugelfeder
7	Elektromagnet	Zweite Spule	Permanentmagnet	Permanentmagnet

Die elektrodynamischen Lösungsvarianten sind in Tabelle 9 gezeigt.

Tabelle 9: Übersicht elektrodynamischer Lösungen

Lösungsnummer	Einrücken	Ausrücken	Schaltstellung halten	Neutrale Lage halten
1	Elektrodynamisch	Elektrodynamisch	Haltestrom	Haltestrom
2	Elektrodynamisch	Elektrodynamisch	Haltestrom	Kugelfeder
3	Elektrodynamisch	Elektrodynamisch	Haltestrom	Permanentmagnet
4	Elektrodynamisch	Elektrodynamisch	Kugelfeder	Kugelfeder
5	Elektrodynamisch	Elektrodynamisch	Kugelfeder	Haltestrom
6	Elektrodynamisch	Elektrodynamisch	Permanentmagnet	Permanentmagnet
7	Elektrodynamisch	Elektrodynamisch	Permanentmagnet	Haltestrom

Die optimale Gesamtlösung besteht aus denjenigen Teillösungen, die im Paarvergleich die höchste Bewertung erhielten. Alle anderen Lösungsvarianten können anhand der in der Anforderungsliste erstellten Kriterien untereinander verglichen und bewertet werden.

Für die Bewertung wird, je nach relativem Erfüllungsgrad der Bewertungskriterien, jeder Lösung eine Punktzahl von 0 bis 3, in Anlehnung an das House-of-Quality-Entscheidungsverfahren[17], erteilt. Die Gesamtlösungen mit den meisten Punkten werden für die Modellierung gewählt.

Tabelle 10: Bewertung elektromagnetischer Lösungen

Lösungsnummer:	1	2	3	4	5	6	7
geringer Leistungsbedarf	2	2	2	1	1	2	2
Bauraumbedarf	2	2	2	1	1	2	2
geringe Kosten	1	2	1	1	2	1	0
einfache Herstellung	2	2	1	1	2	1	1
Wartungsarmut	3	1	2	1	2	1	1
Effektivität	1	1	2	3	2	2	1
Verklemmungsgefahr	3	3	1	1	2	1	2
Gesamtwertung	14	13	11	9	12	10	10

Tabelle 11: Bewertung elektrodynamischer Lösungen

Lösungsnummer:	1	2	3	4	5	6	7
geringer Leistungsbedarf	1	2	2	2	1	2	1
Bauraumbedarf	1	2	2	2	1	2	1
geringe Kosten	2	2	1	3	2	1	2
einfache Herstellung	3	1	2	2	2	2	2
Wartungsarmut	3	2	2	1	2	3	2
Effektivität	3	2	1	3	2	1	1
Verklemmungsgefahr	3	1	2	2	2	3	3
Gesamtwertung	16	12	12	15	12	14	12

Anhand der Gesamtlösungsbewertung kann man zwei Ansätze auswählen: Einen elektromagnetischen Aktor mit Federn zum Ausrücken und Haltestrom, sowie eine Tauchspule, kombiniert mit Haltestrom.

5 FEM Simulation mit FEMM

Wie in Kapitel 2.3 gezeigt, können einfache elektromagnetische oder elektrodynamische Aktoren mit Hilfe der vorgestellten Grundgleichungen beschrieben werden. In dieser Arbeit sollen jedoch neben den einfachen Grundaktoren auch die Einflüsse etwaiger Geometriev Variationen analysiert, sowie Streuflüsse und Sättigungseffekte berücksichtigt werden. In diesem Bereich gerät die analytische Herleitung schnell an Ihre Grenzen, außerdem wird es schwierig für den jeweiligen Fall realistische Werte für Streuflüsse zu definieren. Daher wird im Folgenden auf eine analytische Beschreibung der Aktoren verzichtet. Stattdessen werden mit einer FEM-Simulation Kennfelder generiert, die dann im Matlab-Modell genutzt werden können. Das Vorgehen zur Erstellung der Kennfelder wird im Folgenden verkürzt wiedergegeben.

Bei der verwendeten Simulationssoftware handelt es sich um das Open-Source Programm FEMM [18]. Dieses ermöglicht die FEM-Simulation von Problemen der Elektrostatik, der Wärme- und Stoffübertragung sowie des Magnetismus. Zunächst werden im Preprocessor eine 2D-Geometrie erstellt, sowie Materialeigenschaften und elektrische Kreise definiert. Anschließend wird durch Rotation ein dreidimensionaler Körper erzeugt. Nachdem auch die Randbedingungen definiert wurden, wird die Geometrie über eine Triangulationssoftware in Dreiecke unterteilt. Die Berechnung des Problems erfolgt durch Lösen der entsprechenden Differentialgleichungen.

Nach der Berechnung kann die Lösung im Postprocessor analysiert werden. Es ist möglich die elektrischen und magnetischen Felder sowie Flusslinien grafisch darzustellen, oder auch die wirkenden Reluktanz- und Lorentzkräfte auszulesen. Durch die Kompatibilität von FEMM mit „Matlab“ und „SciLab“ können eine Vielzahl von Berechnungen für sich ändernde Parameter durchgeführt werden (beispielsweise zum Erstellen der Kennfelder). In der Simulation gelten jeweils statische Bedingungen, d.h. weder Strom noch Weg sind zeitlich veränderlich. Durch simulieren verschiedener Ankerpositionen bei verschiedenen Spulenströmen können somit die statischen Kennfelder eines Aktors berechnet werden. In Kombination mit dem simulierten Stromkreis und dem simulierten mechanischen System lassen sich mit den Kennfeldern auch dynamische Probleme lösen (Siehe Kapitel 6.2).

Für das elektromagnetische Modell werden zwei Kennfelder aus der FEM-Simulation ermittelt: Kraft auf den Anker in Abhängigkeit von Weg und Strom, sowie die Flussverkettung in Abhängigkeit von Weg und Strom. Für das elektrodynamische Modell wird die Lorentzkraft in Abhängigkeit des Weges und des Spulenstroms, sowie die Flussverkettung in Abhängigkeit vom Weg erstellt.

Für die Validierung des Modells wird zunächst der im Abschnitt Elektromagnetisches Prinzip (vgl. Kapitel 2.3.1) beschriebene Magnet als FEM-Modell aufgebaut und berechnet. Abbildung 22 zeigt die Magnetkraft in Abhängigkeit vom Luftspalt für die analytische Lösung sowie für die FEM-Simulation. Der Strom liegt konstant bei einem Ampere.

Eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der analytischen Kraftberechnung und der FEM-Simulation ist zu erkennen. Erst für sehr kleine Luftspalte, weicht die Simulation von der analytischen Berechnung ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der analytischen Berechnung der magnetische Widerstand des Eisens vernachlässigt wurde. Für kleine Luftspalte ist diese Annahme jedoch nicht mehr gerechtfertigt.

Außerdem berücksichtigt die analytische Lösung keinerlei Sättigungseffekte, während im FEM Modell B-H Kurven des jeweiligen Materials hinterlegt sind. Der Vergleich validiert die FEM-Simulation. Die Simulationsergebnisse sind auf die Wirklichkeit übertragbar und im Gegensatz zur analytischen Lösung auch bei kleinen Luftspalten und im Sättigungsbereich anwendbar.

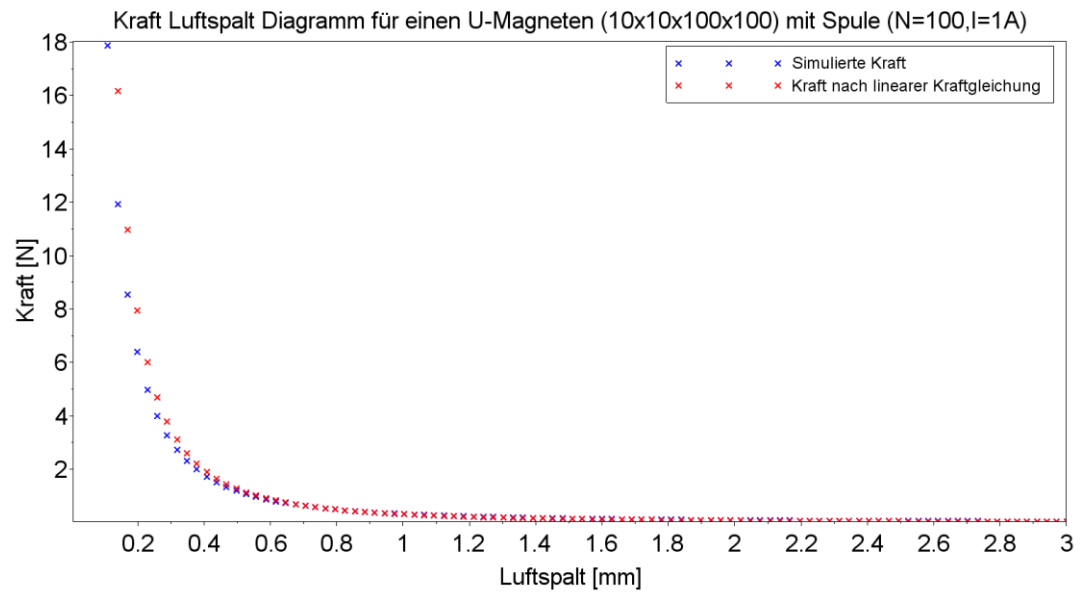


Abbildung 22: Vergleich Analytische Herleitung und FEM-Simulation

6 Elektromagnetisches Modell

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise beim Aufbau des Matlab/Simulink Modells zum elektromagnetischen Schaltaktor beschrieben. In Abbildung 23 ist die Umsetzung der in Kapitel 4.5 erarbeiteten Gesamtlösung (ohne Feder) dargestellt. In einem ersten Schritt werden das mechanische und das elektrische Modell in Simulink beschrieben. Aufbauend auf dem funktionierenden Modell können verschiedene Parameter variiert und optimiert werden. Anschließend werden für den entwickelten Aktor die Verläufe der relevanten Größen bei verschiedenen Schaltszenarien erläutert.



Abbildung 23: 3D Ansicht elektromagnetischer Aktor

6.1 Mechanisches Modell

Im mechanischen Modell wurden alle bewegten Massen zu einer Punktmasse zusammengefasst. Die Gesamtmasse ergibt sich aus der Masse von Schaltgabel (120g vgl. Tabelle 1), Schaltmuffe (50g vgl. Tabelle 1) und dem Anker des Elektromagneten.

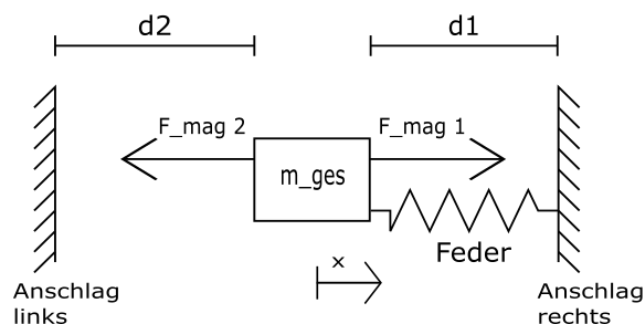


Abbildung 24: Mechanisches Ersatzmodell

Die Koordinate x beschreibt die Bewegung des Ankers. Ihr Nullpunkt ist in der Mittelage und sie ist in Richtung des rechten Anschlages positiv definiert. Durch die Anbindung des Ankers an Schaltgabel und Muffe zählen letztere auch zu den bewegten Massen. Die Größen d_1 und d_2 bestimmen den Abstand zwischen Anker und Eisengehäuse und stellen folglich den Luftspalt des rechten (resp. linken) Elektromagneten dar.

Das Halten des Ankers (und somit auch der Schaltmuffe) in der Mittelstellung, sowie das Ausrücken eines Gangs werden von einer Feder übernommen. Die Feder wird so ausgelegt, dass sie bei einer Auslenkung des Ankers aus der Mittelage um 2 mm eine Haltekraft von 50N entgegenbringen kann:

$$k_{Feder} = 25 \frac{N}{mm}$$

Das Einlegen der Gänge erfolgt durch zwei gegenüberliegende Elektromagnete. Jeweils ein Elektromagnet ist für das Einlegen eines Gangs zuständig. Wird ein Gang eingelegt, so fährt die Schaltmuffe bei Erreichen der rechten (resp. linken) Endposition an einen Anschlag. Die Bewegung der genannten Massen wird durch die folgende Differentialgleichung beschrieben:

$$m_{ges} \cdot \ddot{x} = \sum F_{ext} \quad (28)$$

Hierbei sind F_{ext} alle von außen an die Punktmasse angreifenden Kräfte. Diese sind wie folgt definiert:

- F_{reib} : Reibkräfte die bei der Bewegung wirken (50 N allgemein, 300 N beim Einrücken)
- F_{mag1} : Kraft des Elektromagneten 1 in positive x-Richtung
- F_{mag2} : Kraft des Elektromagneten 2 in negative x-Richtung
- $F_{Kontakt links}$: Kontaktkraft des linken Anschlags in positive x-Richtung
- $F_{Kontakt rechts}$: Kontaktkraft des rechten Anschlags in negative x-Richtung
- F_{Feder} : Kraft der Feder, entgegen der Auslenkung (25 N/mm)

6.1.1 Modellierung der Reibkräfte

Die Reibkraft infolge einer Bewegung des Systems soll konstant 50 N betragen. Wird ein Gang eingelegt, so müssen ab einem Schaltweg von 5mm die Zähne der Muffe in die Schaltverzahnung des Gangrades gedrückt werden. Dies erfordert eine zusätzliche Kraft von 250 N, welche im Modell auch als Reibkraft modelliert wird. Wird ein Gang ausgelegt, so fällt stets nur eine Reibkraft von 50 N an. Folglich gibt es drei Fälle für die Reibkraft zu unterscheiden:

- $|x| < 5mm$: Reibkraft 50 N
- $|x| > 5mm$ und Gang einlegen: Reibkraft 300 N (250 N Schaltverzahnung+50 N Reibung)
- $|x| > 5mm$ und Gang auslegen: Reibkraft 50 N

Um sprunghafte Änderungen der Reibkraft bei Richtungswechseln zu vermeiden, wird die Reibkraft durch ein PT1-Übertragungsglied geglättet. Das heißt, dass bei einsetzender Bewegung zunächst eine Reibkraft aufgebaut wird, bis diese schließlich nach einem Zeitverzug ihren Endwert erreicht hat.

Durch die Glättung mit dem PT1-Glied hat die Reibkraft Tiefpasscharakteristik. Bei hohen Schwingungsfrequenzen der Geschwindigkeit (beispielsweise um eine Ruhelage) reagiert die Reibkraft nicht, beziehungsweise nur geringfügig auf eine Änderung. So wird es ermöglicht, dass die Masse wieder in Ruhe gerät. Hier wurde die Eckfrequenz des PT1-Tiefpass auf 1000 Hz gesetzt, da Richtungswechsel der Reibkraft mit einer Frequenz von 1000 Hz keine Relevanz mehr für das vorliegende System haben. Zwischen der Zeitkonstante des PT1 Glieds und der Eckfrequenz besteht folgender Zusammenhang:

$$\omega_0 = \frac{1}{T} \Rightarrow T = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0} \approx 1,6 \cdot 10^{-4}$$

Nach einer Zeit von 3T hat sich die Reibkraft zu 95% aufgebaut.

$$t_{95\%} = 3 \cdot T \approx 0,48 ms$$

Der Aufbau der Reibkraft findet also für diese Anwendung ausreichend schnell statt.

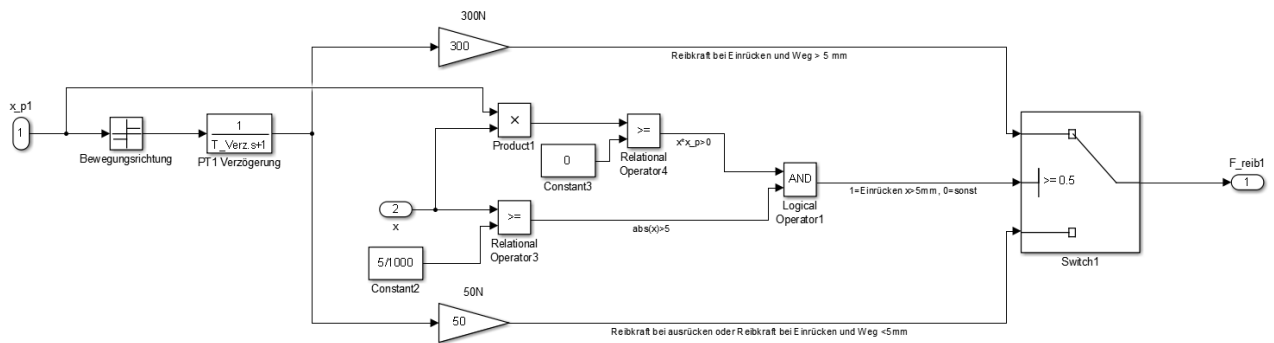


Abbildung 25: Subsystem Reibkraft

In Abbildung 25 ist das Subsystem der Reibkraft dargestellt. Auf dem untersten und auf dem obersten Ast werden die Reibkräfte für die unterschiedlichen Fälle ermittelt. Der Bereich in der Mitte dient zur Ermittlung welche der oben beschriebenen Fälle der Reibkraft zu dem aktuellen Zeitpunkt aktiv ist.

6.1.2 Modellierung der Kontaktkräfte

Ist der Gang komplett eingelegt, so trifft der Anker auf einen Anschlag, der ein weiteres Einrücken verhindert. Die Modellierung der Kontaktkräfte erfolgt analog zur Übung 1 MSII [19] als lineare Feder mit nichtlinearer Dämpfung. Es gilt folgende Gesetzmäßigkeit:

$$F_{\text{Kontakt}} = k_{\text{Anschlag}} \cdot x + \frac{3}{2} \cdot k_{\text{Anschlag}} \cdot x_{\text{Anschlag}} \cdot \alpha \cdot \dot{x} \quad (29)$$

In der Übung handelt es sich um das Modell einer elektromagnetischen Ventilsteuerung. Unter der Annahme von ähnlichen Anschlagmaterialien werden die gleichen Parameter gewählt.

$$k_{\text{Anschlag}} = 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$\alpha = 0,32$$

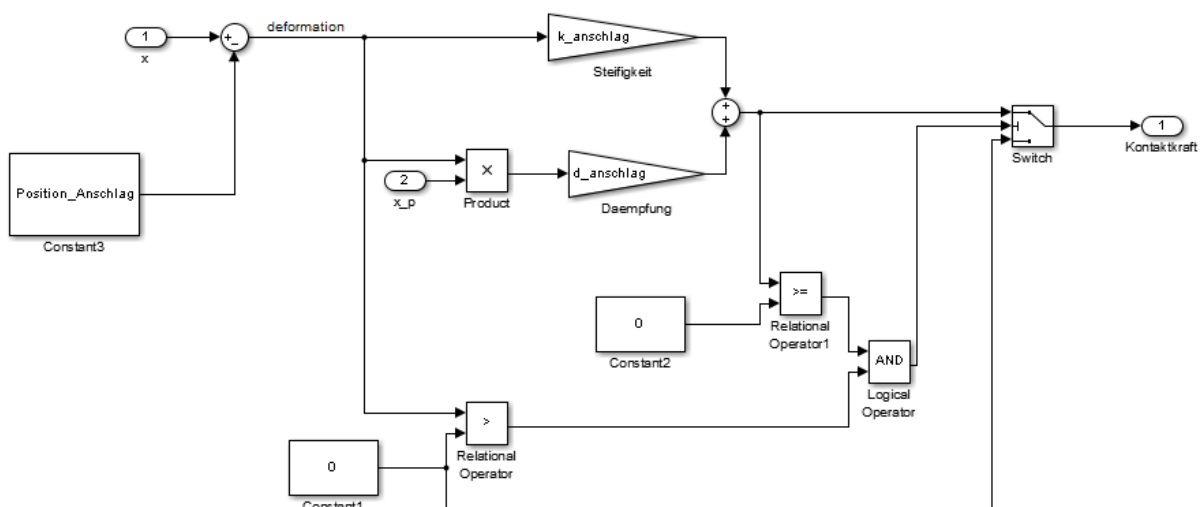


Abbildung 26: Subsystem Anschlag rechts

Abbildung 26 zeigt das Subsystem Anschlag rechts. In das System gehen der Weg und die Geschwindigkeit des Ankers ein. An dem Schalter wird sichergestellt, dass die Anschlagskraft nur dann wirkt, wenn sie positiv ist und eine Deformation des Anschlags vorhanden ist. Weitere Details des Anschlags insbesondere bezüglich des verbleibenden Luftspalts zwischen Anker und Gehäuse sind in Kapitel 6.3 beschrieben.

6.2 Elektrisches Modell

Nun soll der elektromagnetische Aktor modelliert werden. Abbildung 27 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Elektromagneten als Rotationskörper in FEMM. Die Anbindung des Ankers an die Schaltgabel sowie deren Lagerung sind noch nicht berücksichtigt. Eine Optimierung der Geometrie erfolgt in Kapitel 6.4.



Abbildung 27: Prinzipieller Aufbau des Elektromagneten, Kennlinie unbeeinflusst

Der elektromagnetische Aktor setzt sich aus drei Komponenten zusammen:

- Eisengehäuse (blau): leitet die Flusslinien
- Anker (grün): ist axial beweglich gelagert
- Spulen (orange)

Es ist zu beachten, dass Anker und Eisengehäuse nicht in direktem Kontakt sind. Zwischen ihnen besteht ein radialer Luftspalt (hier 0,1 mm), welcher auf der Abbildung nur schwer erkennbar ist.

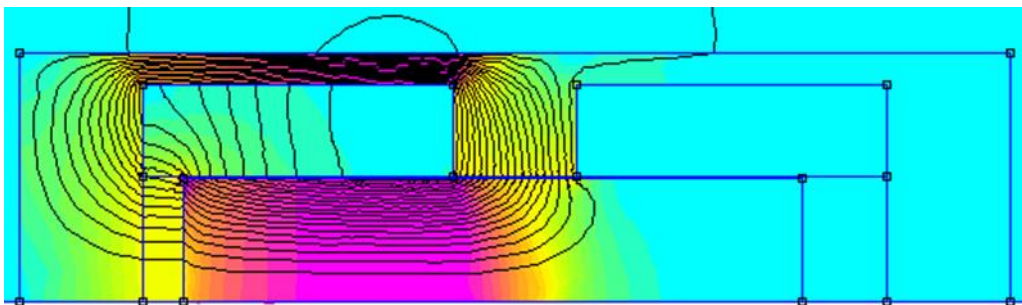


Abbildung 28: Magnetische Feldlinien und Flussdichte bei aktiver linker Spule

Wird eine Spule bestromt (Abbildung 28), so erzeugt sie ein elektrisches Feld. Das elektrische Feld führt zu einer Magnetisierung des Eisenkerns und des Ankers. Es bildet sich ein magnetischer Kreis. Aufgrund des Luftspalts zwischen Anker und Eisengehäuse kommt es zu einer Reluktanzkraft, welche den Anker beschleunigt (hier nach links).

Das Simulink-Modell des elektromagnetischen Aktors wird in Anlehnung an die Übung I [19] aus dem Kurs Mechatronische Systemtechnik II des IMS gebildet. Das Kraft-Strom-Weg Kennfeld und das Kennfeld der Flussverkettung wird durch eine FEM-Simulation ermittelt.

Über die Grundgleichungen des elektrischen Kreises einer Spule kann der im Elektromagneten fließende Spulenstrom bestimmt werden. Durch Strom und Position des Ankers kann wiederum die aktuell aufgebrachte Kraft des Magneten berechnet werden. Diese fließt dann als externe Kraft in das Mechanische Modell (vgl. Kapitel 6.1) ein.

Der elektrische Kreis besteht aus einer Spule an die eine Spannung U_{ext} angelegt wird. Die Spule hat einen Widerstand R_{Spule} . Außerdem bewirkt eine Änderung der Flussverkettung in der Spule (durch Positionsänderung oder Stromänderung) eine induzierte Spannung $U_{ind} = \dot{\Psi}$ (siehe auch Kapitel 2.3.1). Es gilt für die elektrische Grundgleichung:

$$U_{ext} = R_{Spule} \cdot I_{Spule} + U_{ind} \quad (30)$$

Umgestellt nach der Änderung der Flussverkettung in der Spule ergibt sich:

$$\dot{\Psi} = U_{ext} - R_{Spule} \cdot I_{Spule} \quad (31)$$

Die extern angelegte Spannung ist bekannt. Um den Spulenstrom (I_{Spule}) zu bestimmen, wird das Kennfeld der Flussverkettung in Abhängigkeit von Strom I und Luftspalt d $\Psi_{(I,d)}$ in Matlab invertiert. Das Invertieren des Kennfelds erfolgt durch „Umsortieren“ der Matrix. Zunächst wird eine lineare Interpolation für $I_{(\Psi),|d=const}$ für jeden Luftspalt d vorgenommen. Diese interpolierten Werte bilden dann das neue Kennfeld $I_{(\Psi,d)}$. Durch die entsprechend gewählte Auflösung von I in den per FEMM ermittelten Kennfeldern bleibt der Fehler durch die lineare Interpolation gering. Ein Vergleich zwischen den Werten von $\Psi_{(I,d)}$ und $I_{(\Psi,d)}$ bestätigt dies. Man erhält das Kennfeld für den Strom I in Abhängigkeit von Flussverkettung Ψ und Luftspalt d $I_{(\Psi,d)}$. Durch Integration von $\dot{\Psi}$ kann zu jedem Zeitpunkt der Wert für die Flussverkettung Ψ bestimmt werden. Der Spulenstrom kann somit aus der Flussverkettung Ψ (aus Integration) und Luftspalt d (aus mechanischem Modell) ermittelt werden.

Durch das in FEMM ermittelte Kennfeld $F_{(I,d)}$ kann mit Kenntnis der beiden Größen I_{Spule} und d zu jedem Zeitpunkt die auf den Anker wirkende Reluktanzkraft berechnet und in das mechanische Modell zurückgeführt werden.

6.3 Regelung der Elektromagneten

Erste Simulationen haben die erwartete nichtlineare Abhängigkeit der Magnetkraft von Strom und Luftspalt gezeigt. Dementsprechend problematisch gestaltet es sich, den gewünschten Wegverlauf der Schaltmuffe durch die Sollvorgabe einer Spannung zu realisieren. Außerdem wurde festgestellt, dass sich durch die Induktivität der Strom bei Abschaltung der Spannung nur sehr langsam abbaut. Die Kraft des Magneten bleibt dadurch erhalten. Ohne weiteren Eingriff führt dies dazu, dass ein eingelegter Gang erst nach einer gewissen Zeit wieder ausgelegt werden kann. Eine Regelung im Matlabmodell kann dieses Problem durch aufprägen einer negativen Spannung lösen. Zusätzlich können durch die Regelung etwaige Störeinflüsse im System kompensiert werden.

Da die Vorgabe eines Sollstroms wenig praxisrelevant ist, wird anstelle eines Sollstroms eine Sollkraft vorgegeben. Aus der Position und der gewünschten Kraft kann dann der erforderliche Strom bestimmt werden. Dafür wird nach dem gleichen Verfahren wie im vorherigen Abschnitt das Kennfeld $F_{(I,d)}$ zu einem Kennfeld $I_{(F,d)}$ invertiert. Kommt es zu einer Regelabweichung des Stroms, so wird über einen PID-Regler die Eingangsspannung U_{ext} (Stellgröße) verstellt. Es hat sich gezeigt, dass mit höheren Maximalspannungen auch eine höhere Dynamik des Systems erreicht werden kann, jedoch steigt der Leistungsbedarf des Systems. Bei Spannungen Oberhalb der zur Verfügung stehenden Bordspannung von 12 V ist eine zusätzliche Komponente (Boost-Converter / Step-Up-Converter) notwendig, welche die Kosten des Systems erhöht. Die Einstellung der Reglerparameter erfolgt empirisch.

Über die Kraftvorgabe kann nun eine hohe Kraft beim Einrücken angefordert werden, was garantiert, dass der Magnet den Einrückvorgang so schnell wie möglich absolviert. Ist die Endposition erreicht, so kann eine Haltekraft vorgegeben werden, die lediglich die Rückstellkraft der Feder kompensiert um den Anker in Position zu halten. Beim Auslegen eines Gangs und Anfahren der Mittellage kann die Kraft so gewählt werden, dass ein Überspringen über die Mittellage verhindert oder reduziert wird.

Probleme bei der Regelung der Kraft entstehen dann, wenn der Anker voll eingerückt ist und kein Luftspalt zwischen Anker und Gehäuse existiert. Sinkt der Luftspalt gegen Null, steigt der Gradient $\frac{dF}{dI}$ - die Kraft in Abhängigkeit vom Strom - sehr stark an. Folglich wird eine Regelung der Kraft über den Strom sehr schnell instabil. Abhilfe kann hier geschaffen werden, wenn auf dem Anschlag ein dünnes Stück paramagnetisches Material befestigt wird. Für dieses paramagnetische Material wird die Permeabilitätszahl von Luft angenommen. So bleibt selbst bei voll eingerücktem Gang noch ein kleiner „Restluftspalt“ zwischen Anker und Eisengehäuse bzw. Anschlag. Dies erleichtert die Regelung von Strom und Kraft bei eingelegetem Gang.

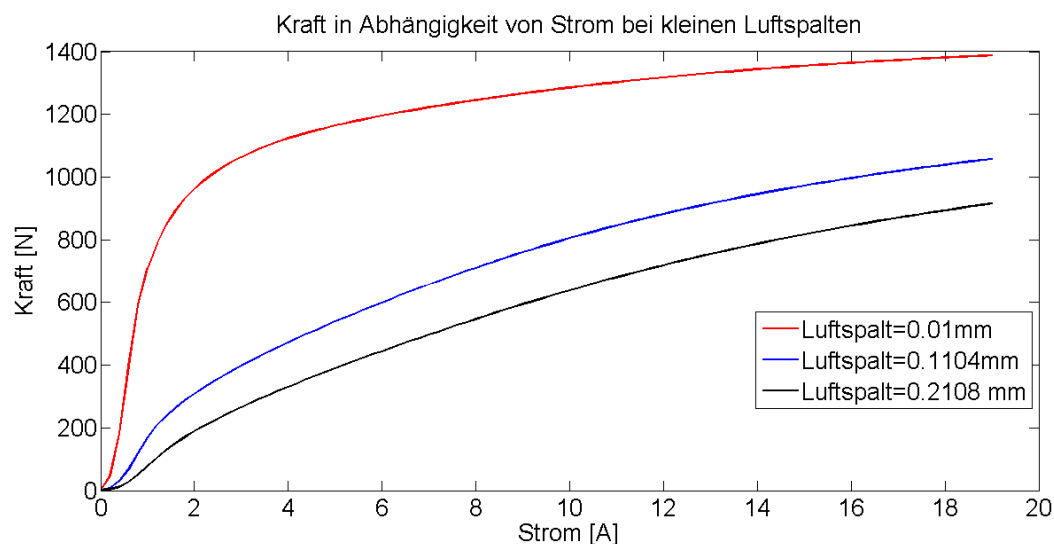


Abbildung 29: Verringern des Kraftgradienten durch Restluftspalt

Der beschriebene Effekt ist in Abbildung 29 qualitativ dargestellt. Je größer der Restluftspalt gewählt wird, desto gleichförmiger ist die Beziehung zwischen Strom und Kraft. Dementsprechend einfacher gestaltet sich die Regelung der Kraft am Anschlag bei größeren Luftspalten. Jedoch steigt auch der Strom der benötigt wird um eine Haltekraft von 300 N (30 N Haltekraft + 250 N Kompensation der Federkraft bei 10 mm Auslenkung + 20 N Reserve) im Anschlag aufzubringen, weshalb der Restluftspalt nicht zu groß gewählt werden sollte.

Beispielhaft ist in Tabelle 12 die benötigte Halteleistung in Abhängigkeit des Luftspalts gegeben.

Tabelle 12: Restluftspalt und benötigter Haltestrom²

Restluftspalt	Benötigter Haltestrom (Haltekraft 300 N)	Leistung (bei 0,4238 Ohm)
0,25 mm	≈ 2 A	1,7 W
0,2 mm	≈ 1,75 A	1,3 W
0,1 mm	≈ 1,2 A	0,61 W

Im Hinblick auf den Leistungsbedarf beim Halten eines Gangs und die Dauerstromfestigkeit des Spulendrahtes wurde der Restluftspalt auf 0,1 mm gesetzt. Dieser Wert stellt einen guten Kompromiss zwischen Strombedarf

² Die Angaben beziehen sich auf die finale Ausgestaltung des elektromagnetischen Aktors

und Regelbarkeit des Systems dar. Um den Dauerstrombedarf einordnen zu können wird dieser in einen Mehrverbrauch bei der Fahrt, bzw. eine CO_2 Emission umgerechnet.

Bei einer Stunde Fahrt benötigt man zum Halten eines Gangs eine Energie von ca. $0,61 \text{ Wh} = 0,00061 \text{ kWh}$. Bei einem durchschnittlichen CO_2 Ausstoß von $587 \frac{\text{g}}{\text{kWh}}$ für den Energiemix in Deutschland [20, S. 19] ergibt sich somit eine CO_2 Erzeugung von $\approx 0,35 \frac{\text{g}}{\text{h}}$ für eine Stunde Fahrt in einem Elektroauto mit 2 Gang-Getriebe.

Für ein mit Ottomotor angetriebenes Fahrzeug ergibt sich bei einem Heizwert von $H_{\text{Benzin}} = 11,1 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ [21] und einem Wirkungsgrad des Ottomotors von 30% ein zusätzlicher Kraftstoffbedarf von $0,61 \text{ Wh} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{11100 \text{ Wh}} \cdot \frac{1}{0,3} = 0,183183 \text{ g} \approx 0,26 \text{ mL}$. Dies entspricht einem CO_2 Ausstoß von $0,26 \text{ mL} \cdot 2,33 \frac{\text{kg}}{\text{L}} = 0,6058 \text{ g}$ [22].

Allgemein wäre auch eine Wegregelung durchaus denkbar und für den vorliegenden Anwendungsfall relevant. Aufgrund der nichtlinearen Abhängigkeit der Reibkraft vom Schaltweg sowie der Positionsabhängigkeit der Magnetkraft müsste die Umsetzung einer solchen Regelung durch eine kaskadierte Regelung von Strom und Weg als Regelgrößen erfolgen. In diesem Fall erschwert jedoch die nichtlineare Regelstrecke (beim Einrücken kommen ab 5 mm Weg 250 N Reibkraft sprunghaft hinzu) die optimale Auslegung der Reglerparameter. Insofern übersteigt die Realisierung dieser Regelung den Umfang der vorliegenden Arbeit.

6.4 Optimierung des Aktors

Nachdem das Simulink Modell nun einsatzbereit ist, können die Auswirkungen verschiedener Einflussfaktoren untersucht werden. Es hat sich gezeigt, dass die folgenden Parameter einen großen Einfluss auf das Verhalten des Elektromagneten haben:

Radialer Luftspalt:

Je größer der Luftspalt desto größer wird der Widerstand des magnetischen Kreises. Folglich sinken magnetischer Fluss und Kraft. Der radiale Luftspalt sollte also unter Berücksichtigung der Umsetzbarkeit und Fertigungskosten so klein wie möglich gewählt werden

Windungszahl:

Je höher die Windungszahl der Spule, desto höher wird die Reluktanzkraft bei gleichbleibendem Strom. Mit der Windungszahl steigen aber auch Widerstand und Induktivität der Spule. Bei einer großen Windungszahl werden geringere Ströme benötigt um eine Kraft aufzubringen, jedoch benötigt man eine höhere Versorgungsspannung um diesen Strom zu erreichen. Durch die gestiegene Induktivität der Spule ist der Zeitverzug bis sich der entsprechende Spulenstrom bei einem Spannungssprung einstellt größer (Dynamik des Systems sinkt). Insofern müssen bei der Wahl der Windungszahl immer Kraftbedarf, Versorgungsspannung, Maximalstrom sowie die dynamischen Anforderungen an das System berücksichtigt werden.

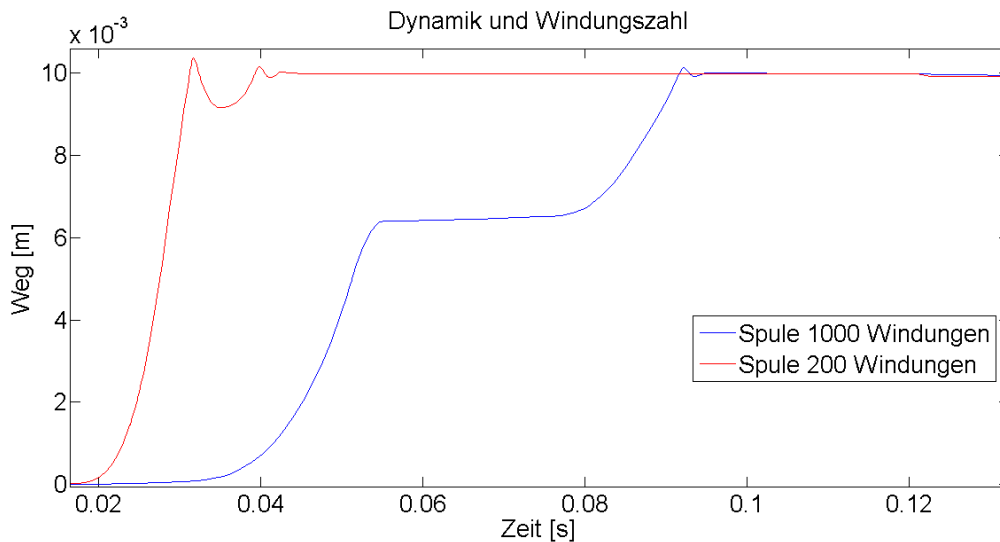


Abbildung 30: Einrückvorgang bei verschiedenen Windungszahlen und gleichen Randbedingungen

In Abbildung 30 ist exemplarisch der Weg Zeit Verlauf beim Einlegen der Schaltmuffe für eine Spule von 1000 und für eine Spule von 200 Windungen gezeigt. Auf den Kraftregler wurde in beiden Fällen ein Sollwertsprung von 0 auf 1000 N zum Zeitpunkt 0,01 s gegeben, sodass eine Spannung von bis zu 35 V gestellt wird. Die bewegten Massen wurden in beiden Fällen auf 1,35 kg gesetzt. Durch den langsamen Kraftaufbau der Spule mit 1000 Windungen reicht die aufgebrachte Kraft bei Erreichen der 5mm Marke nicht aus, um die sprunghaft gestiegenen Reibkräfte (300 N) zu überwinden. Der Anker kommt zum Stillstand, bis die im Zeitverlauf steigenden Reluktanzkräfte die Reib- und Federkräfte übersteigen.

Tabelle 13: Vergleich der Einrückzeiten bei verschiedenen Windungszahlen³

	1000 Windungen	200 Windungen
Spulenwiderstand	3,63 Ohm	0,73 Ohm
Maximalstrom	2,2 A	18,8 A
Einrückzeit	0,0816 s	0,0212 s

Tabelle 13 zeigt die deutlich gestiegene Dynamik der Spule mit 200 Windungen auf. Dies ist vor allem auf die geringere Induktivität der Spule und somit den schnelleren Stromaufbau zurückzuführen. Nachteilig hingegen ist, dass die kleine Spule einen Strom von bis zu 18,8 A benötigt um die erforderliche Kraft zu stellen. Die Simulationen haben gezeigt, dass ein Erhöhen der Windungszahl die (statische) Kraftkennlinie bei gleicher Versorgungsspannung nicht beeinflusst, da auch der erreichbare Strom durch den steigenden Widerstand der Spule sinkt und sich diese beiden Effekte gegenseitig aufheben. Wie Tabelle 14 zeigt, kann ein Erhöhen der Windungszahl dazu genutzt werden, den erforderlichen Maximalstrom zu begrenzen. Es steigen jedoch Gewicht, Kosten, Dynamik und Bauraum des Systems.

Tabelle 14: Maximalstrom bei verschiedenen Windungszahlen und Spannungen

Windungszahl	Widerstand bei gegebenen Abmessungen	Strom bei 12V	Strom bei 24V
200	0,73 Ohm	16,4 A	32,9 A
250	0,92 Ohm	13 A	26,1 A
300	1,2 Ohm	10 A	20 A

³ Der angegebene Strom ist der beim Einrücken auftretende Maximalstrom. Nach dem Einrücken (stehender Anker) stellt sich selbstverständlich der nach dem Ohm'schen Gesetz ermittelte Strom $I = \frac{U}{R_{Spule}}$ ein.

Eisendicke:

Mit der Eisendicke ist die Dicke des Materials gemeint, welches die Spule umgibt. Dieses Material wird benötigt um den magnetischen Fluss zu leiten. Die Dicke des Eisengehäuses sollte so gewählt werden, dass das Eisen bei Maximalstrom nicht in die Sättigung gerät. Wählt man die Dicke des Gehäuses zu gering, so kann sich kein ausreichender magnetischer Fluss ausbilden und die Kraft sinkt. Aus Bauraum-, Gewichts- und Kostengründen ist es natürlich vorteilhaft die Dicke des Eisengehäuses möglichst gering zu halten. Im Folgenden wird dieser Zielkonflikt näher betrachtet und es wird eine optimale Eisendicke für eine Spule mit 200 Windungen bei einem Strom von 19 A ermittelt.

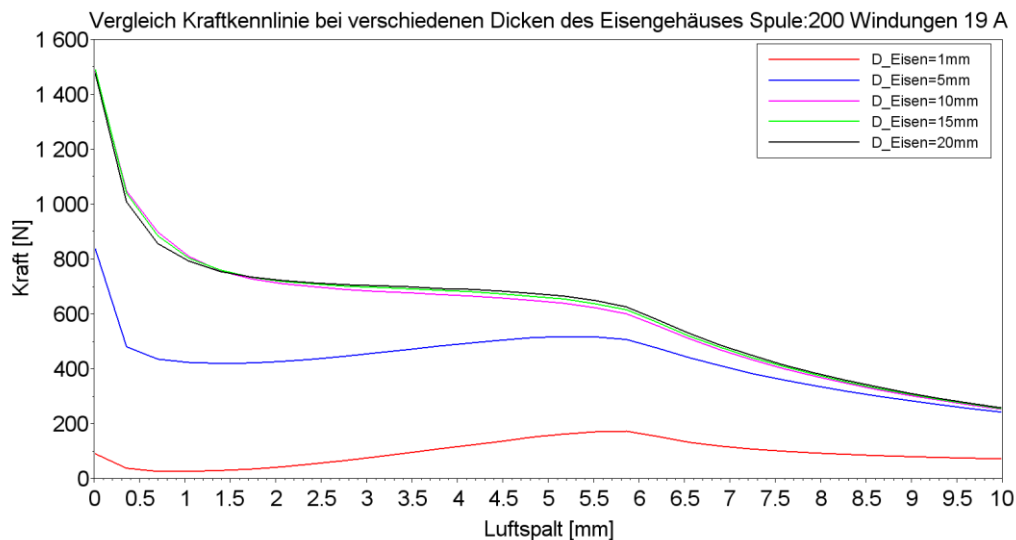


Abbildung 31: Benötigte Eisendicke bei 19 A

In Abbildung 31 ist die Kraft in Abhängigkeit vom Luftspalt bei konstantem Strom für verschiedene Eisendicken dargestellt. In dem Diagramm ist der Sättigungseffekt bei zu klein gewähltem Eisengehäuse deutlich zu erkennen. Für eine Spule von 200 Windungen bei einem Strom von 19 A ist der Eisenkern ab einer Dicke von 10 mm dick genug, um nicht mehr in Sättigung zu geraten. Daher ist ein weiteres Erhöhen der Dicke nicht mehr sinnvoll. Die benötigte Dicke des Eisenkerns steht folglich in direktem Zusammenhang mit der benötigten Kraft. Die Kraft gibt vor, welcher magnetische Fluss im magnetischen Kreis benötigt wird. Das Eisengehäuse muss in der Lage sein den entsprechenden Fluss ohne zu große Sättigungsverluste zu transportieren.

Ankerdurchmesser:

Je größer der Durchmesser des Ankers, desto größer wird der Spulendurchmesser. Somit steigt die Reluktanzkraft. Jedoch steigen auch die bewegten Massen (quadratisch) sowie der Widerstand der Spule. Damit der Anker nicht in Sättigung gerät, sollte der Ankerquerschnitt mindestens dem Querschnitt des Eisengehäuses entsprechen.

Ankergeometrie:

Neben den oben genannten konstruktiven Einflussfaktoren kann auch über die Ankergeometrie bzw. über die Geometrie des Ankergegenstücks der Kraftverlauf deutlich beeinflusst werden. Eine sehr ausführliche Beschreibung der möglichen Geometrien und deren Einfluss auf die Kennlinie findet sich in der Fachliteratur [7, S. 75]. In Abbildung 34 werden zwei Geometrievarianten mit der unbeeinflussten Geometrie (vgl. Abbildung 27) verglichen. Bei „Variante 1“ ist das Ankergegenstück als Topfmagnet ausgeführt, der Anker fährt also ab einem Luftspalt von 10mm in das Gegenstück hinein. Bei „Variante 2“ handelt es sich um einen vorne angeschrägten Anker, der in ein entsprechend geformtes Gegenstück fährt.

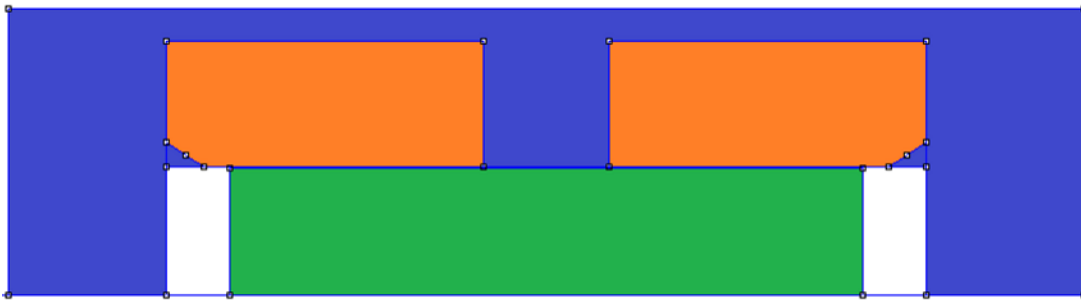


Abbildung 32: Ankergeometrie, Variante 1

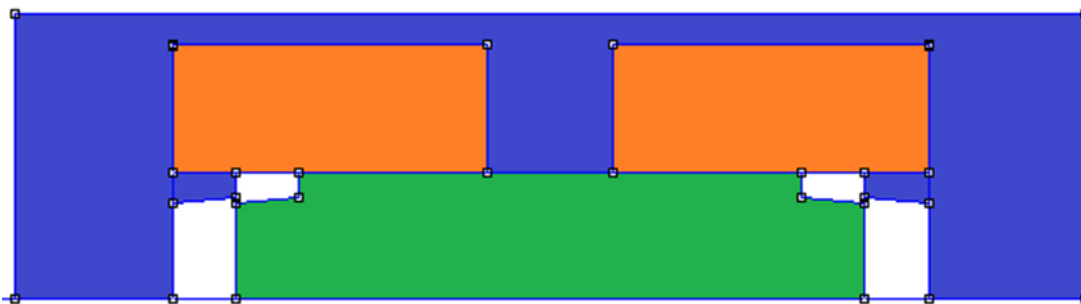


Abbildung 33: Ankergeometrie, Variante 2

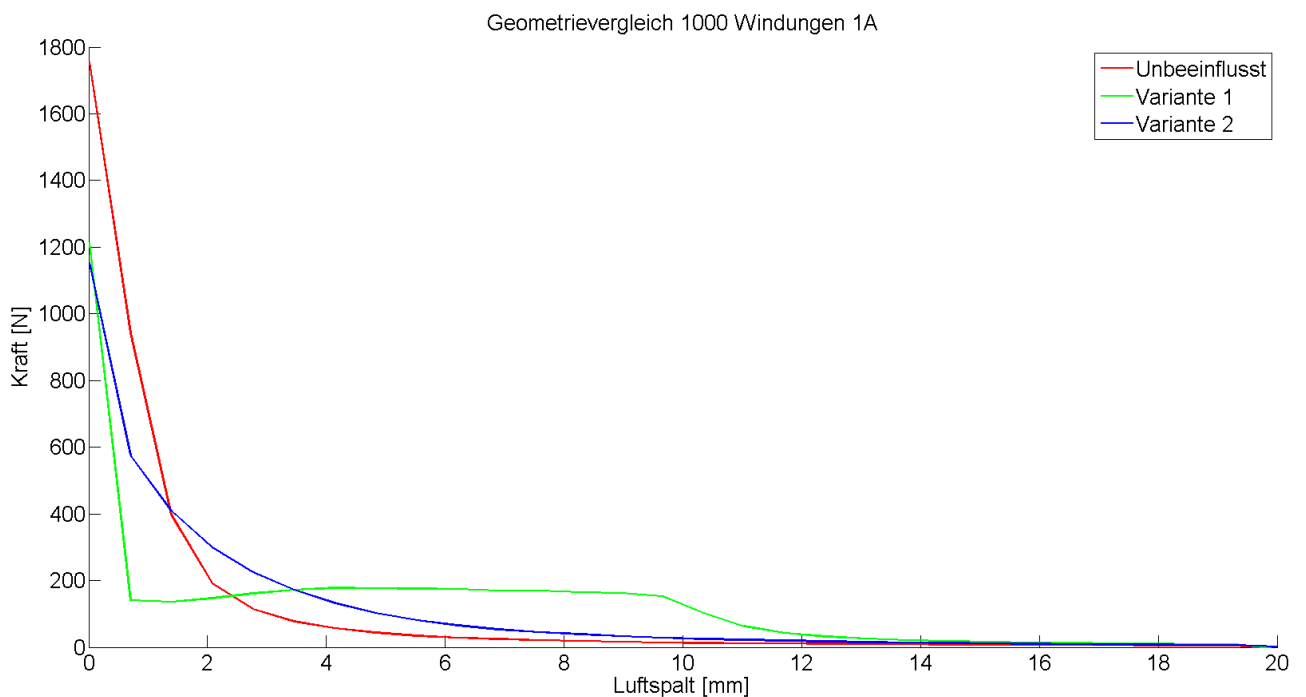


Abbildung 34: Vergleich der Ankergeometrien

Man erkennt, dass Variante 2 schon eine deutliche Verbesserung gegenüber dem unbeeinflussten Anker darstellt, da die Kräfte bei größerem Luftspalt deutlich höher ausfallen. Im Bereich von sehr kleinen Luftspalten bietet Variante 2 geringere Kräfte, was jedoch unproblematisch ist, da der Kraftbedarf trotzdem um ein

Vielfaches überschritten wird. Für Variante 2 wurde eine Geometrievariation durchgeführt, indem Parameter wie Schrägungswinkel und Absatzhöhe variiert wurden. Es wurde nur ein geringfügiger Einfluss bei qualitativ gleichem Kraftverlauf festgestellt.

Der Kraftverlauf von Variante 1 hat schon bei großem Luftspalt ein erhöhtes Kraftangebot, welches näherungsweise konstant bleibt. Bei kleinem Luftspalt ist die verfügbare Kraft dafür bei dieser Variante am geringsten. Über die Länge des Topfes ist der Punkt an dem die Magnetkraft in den linearen Bereich übergeht (hier: 10 mm) frei wählbar. Dieser Kraftverlauf stellt einen nahezu idealen Verlauf dar, da er sehr gut an den Kraftbedarf angepasst ist.

6.5 Detailauslegung

In dem folgenden Abschnitt wird die endgültige Gestalt des Aktors gezeigt (vgl. Abbildung 35). Die Dimensionen des Aktors können den Technischen Zeichnungen entnommen werden (s. Abbildung 67). Da der Anker direkt durch das Gehäuse nach außen geführt wird, gestaltet sich eine Anbindung an eine Schaltgabel als unproblematisch. Der Luftspalt zwischen Eisengehäuse und Anker kann genutzt werden um eine Lagerung des Ankers zu realisieren, allerdings muss diese aus magnetisch nichtleitendem Material bestehen (keine Metalllager).



Abbildung 35: Optimierte Aktorgeometrie

Zwischen dem Eisenkern/Spule und dem großen Durchmesser besteht noch ein Luftspalt. Dieser wurde auf 0,1 mm reduziert. Die konstruktiven Parameter des Aktors wurden im Hinblick auf eine hohe Dynamik sowie geringen Bauraum des Systems gewählt.

Zunächst wurde der Ankerdurchmesser verringert, um die bewegten Massen zu reduzieren. Durch den geringeren Ankerdurchmesser sinkt auch der Durchmesser der Spule. In Kombination mit einer geringen Windungszahl von 150 Windungen konnte so die Induktivität der Spule deutlich verringert werden, was zu einer sehr hohen Dynamik (schneller Stromaufbau) führt. Außerdem sinkt der Spannungsbedarf des Systems. Die Spule benötigt nun zwar einen Strom von ca. 20 A um in jedem Punkt den Kraftbedarf zu decken, durch den geringeren Widerstand von nur noch 0,43 Ohm kann dieser im statischen Fall schon durch die Batteriespannung von 12 V bereitgestellt werden. Im Hinblick auf eine größtmögliche Dynamik des Aktors ist es durchaus sinnvoll auch höhere Betriebsspannungen als die 12 V Batteriespannung zu verwenden. Das Regeln der Eingangsspannung kann mit einem Buck-Boost Converter erfolgen: Beispielsweise der Converter LM5175 [23] von Texas Instruments. Dieser kann eine Eingangsspannung von 3,2 V bis 42 V auf eine Ausgangsspannung von 0,8 V bis 55 V bei einem maximalen Ausgangsstrom von 20 A regeln. Er ist zu einem Preis von circa 3,10 \$ (laut Homepage) erhältlich.

Das Eisengehäuse wurde so dimensioniert, dass bei dem nötigen Strom zum Decken des Kraftbedarfs (ca. 20 A) das Eisen noch nicht in Sättigung gerät (7,5 mm).

Auch die Kennlinienbeeinflussung wurde genutzt, um den Kraftverlauf des Ankers dem Kraftbedarf anzupassen (vgl. Abbildung 36). Hierzu wurde das Ankergegenstück gekürzt, so dass der Kraftanstieg bei einem Luftspalt von ca. 5 mm beginnt. Durch die gerade Form des Gegenstücks konnte ein Absinken des Kraftangebots hin zu kleinen Luftspalten verhindert werden.

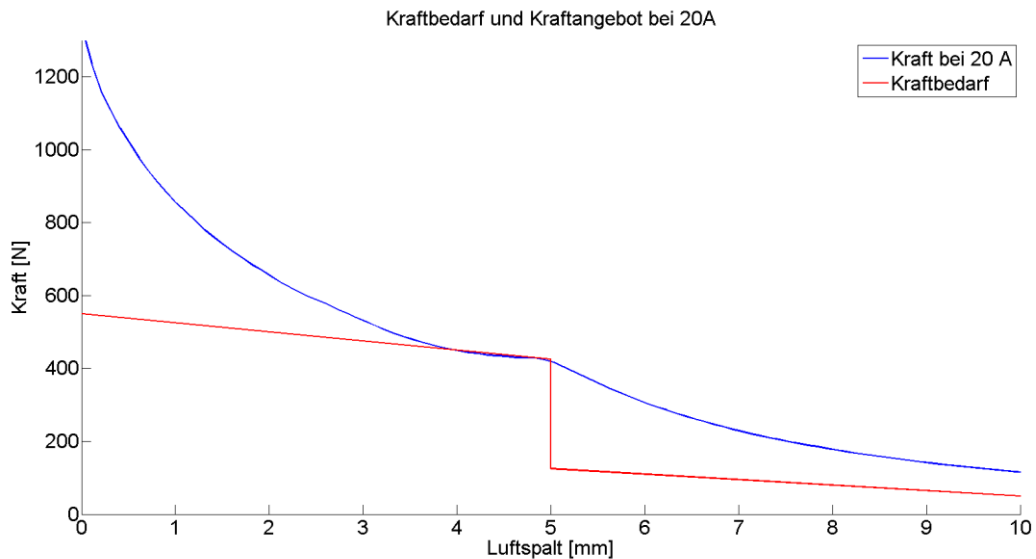


Abbildung 36: Kraftverlauf des optimierten Aktors

Durch den hohen Maximalstrom, ist auch eine Abschätzung der Leiterfestigkeit unabdingbar. Der verwendete Kupferdraht 18 AWG ist nur bis zu 2,3 A [24] dauerstromfest. Die Spulen haben einen mittleren Durchmesser von 42,5 mm. Für 150 Windungen ergibt sich somit eine Kabellänge von $l_{Leiter} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{0,0425m}{2} \cdot 150 \approx 20 m$. Bei einem Kabeldurchmesser von $\varnothing_{Leiter} = 1,02 mm$ ergibt sich ein Volumen von $V_{Leiter} = \pi \left(\frac{0,51}{1000} m \right)^2 \cdot 20 m = 1,63 \cdot 10^{-5} m^3$. Bei einer Dichte von $\rho_{Kupfer} = 8920 \frac{kg}{m^3}$ ergibt sich eine Masse von $m_{Leiter} \approx 0,146 kg$. Unter der konservativen Annahme, dass ein Strom von 30 A fließt und die komplette elektrische Leistung in Wärme gewandelt wird erhält man:

$$P_{Wärme} = R \cdot I^2 = 0,4238 \Omega \cdot (30A)^2 \approx 381,42 W = 381,42 J/s$$

Die spezifische Wärmekapazität von Kupfer beträgt $382 \frac{J}{kgK}$. Somit würde sich der Leiter um $381,42 \frac{J}{s} \cdot \frac{1}{0,146 kg} \cdot \frac{1}{382 \frac{J}{kgK}} \approx 6,9 \frac{K}{s}$ erwärmen. Für kurze Schaltzeiten (<0,1 s) ist die Erwärmung der Kupferspule somit unkritisch.

Die Eckdaten des gewählten Aktors sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 15: Kenndaten, elektromagnetisches System

Windungszahl Spule	150
Ohmscher Widerstand Spule	0.4238 Ohm
Masse Anker	223 g
Maximaler Ankerdurchmesser	35 mm
Minimaler Ankerdurchmesser	10 mm
Abmaße Gehäuse LxD	Ca. 60 x 65mm

6.6 Vergleich mit alternativen Systemen

Zu Beginn wurde erläutert, dass es sich bei dem vorgestellten System um ein auf die Anforderungen (Kraftbedarf) angepasstes System handelt. Um zu sehen wie sich die Anpassungen auswirken wird das gewählte und optimierte System in der folgenden Tabelle mit zwei Zwischenlösungen aus dem Entwicklungsprozess verglichen. Es wird jeweils die gleiche mechanische Strecke benutzt. Auf die Systeme wurde ein Spannungssprung von 12 V bzw. 35 V gegeben. Die durch den Ankerdurchmesser veränderten Massen, sowie der geänderte Widerstand der Spulen wurden berücksichtigt. Der angegebene Strom ist der beim Einrücken auftretende Maximalstrom. Nach dem Einrücken (stehender Anker) stellt sich selbstverständlich der nach dem Ohm'schen Gesetz ermittelte Strom $I = \frac{U}{R_{Spule}}$ ein.

Tabelle 16: Vergleich der gewählten Konstruktion mit alternativen Systemen

	Windungen	D_Anker	Strom (12V)	Strom (35V)	Einrückzeit (12V)	Einrückzeit (35V)
System 1	1000	40 mm	2,165 A	2,22 A	0,4118 s	0,0820 s
System 2	200	45 mm	16,35 A	16,82 A (23 V)	Nicht erreicht	0,0183 s (23 V)
Gewähltes System	150	35mm	20,86 A	24,39 A	0,0514 s	0,0167 s

Es ist deutlich zu erkennen, dass die hohe Windungszahl bei System 1 zu einer schlechten Dynamik, dafür aber zu relativ geringen Strömen führt. System 2 hat durch die geringere Windungszahl eine deutlich gestiegene Dynamik. Jedoch kann bei einer Spannung von lediglich 12 V der Kraftbedarf nicht gedeckt werden, weshalb unbedingt ein Buck-Boost Converter benutzt werden muss.

Im gewählten System wird durch die nochmals verringerte Windungszahl eine noch höhere Dynamik erreicht werden. Durch eine weitere Anpassung der Kennlinienbeeinflussung wird nun auch der Kraftbedarf in jedem Punkt gedeckt. Durch den kleineren Ankerdurchmesser baut das System sehr kompakt und weist nur geringe bewegte Massen auf. Da das simulativ ermittelte Kennfeld des zweiten Systems nur bis 25 A berechnet wurde, konnten anstelle von 35 V nur 23 V auf diesen Aktor gegeben werden.

Besonders vorteilhaft ist dieses System, da es sowohl mit einer Spannung von 12 V als auch mit einem Buck-Boost Converter betrieben werden kann. Der Buck-Boost Converter erhöht nochmals die Einrückgeschwindigkeit, jedoch muss der Maximalstrom begrenzt werden. Im Einzelfall kann evaluiert werden, ob die gewonnene Performance den zusätzlichen Entwicklungs- und Kostenaufwand rechtfertigt. Tabelle 16 zeigt auch, dass ein solcher elektromagnetischer Aktor durch die Wahl der konstruktiven Parameter sehr flexibel auf die jeweiligen Randbedingungen und Anforderungen (Betriebsspannung, Maximalstrom, Dynamik, Bauraum, Kosten) angepasst werden kann und muss.

6.7 Verläufe

Für den in Kapitel 6.5 ausgelegten Aktor werden die Zeitverläufe der wichtigsten Systemgrößen in zwei unterschiedlichen Anwendungsszenarien gezeigt und besprochen. In Szenario 1 wird zunächst aus der Mittellage ein Gang eingelegt. Im Anschluss wird vom eingelegten Gang aus wieder die Mittellage angefahren.

6.7.1 Szenario 1

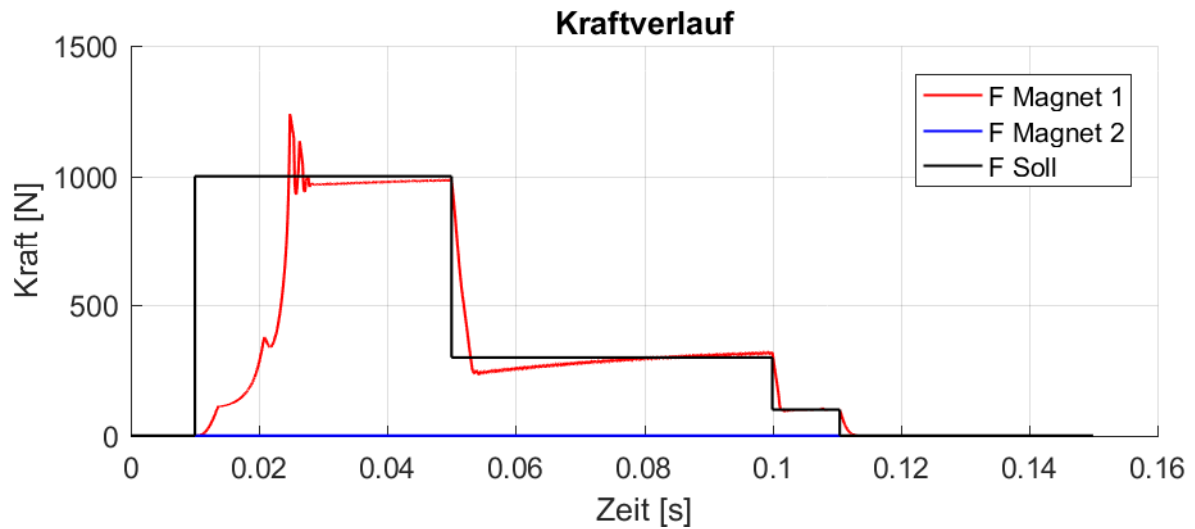


Abbildung 37: Szenario1 - Kraftverlauf

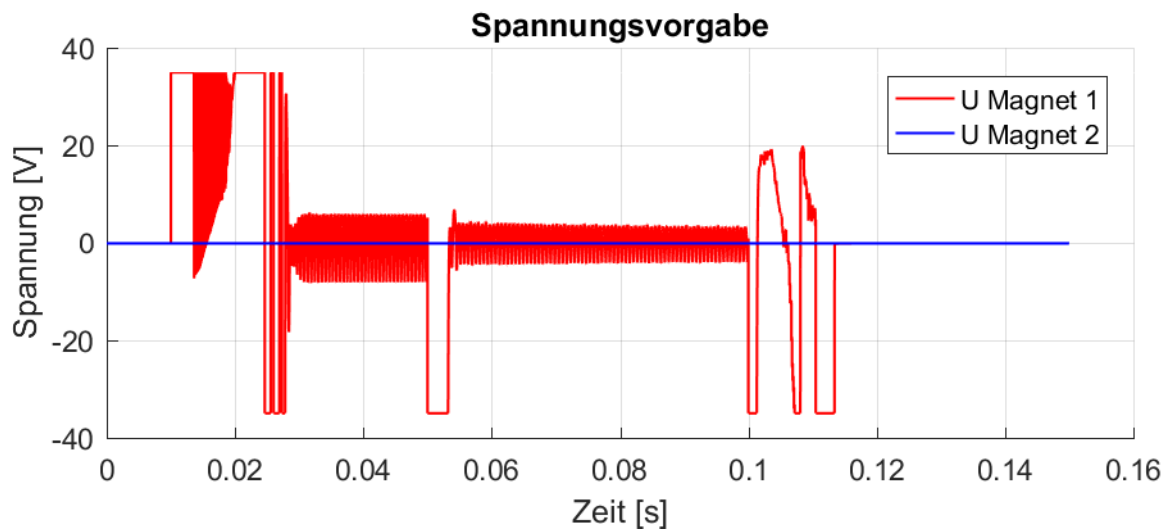


Abbildung 38: Szenario 1 - Spannungsvorgabe

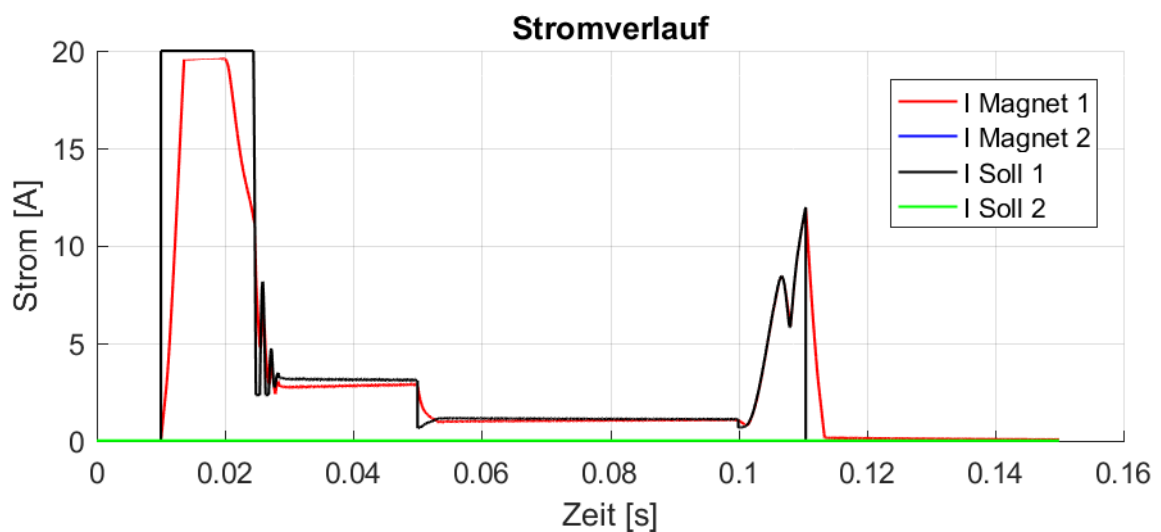


Abbildung 39: Szenario 1 -Stromverlauf

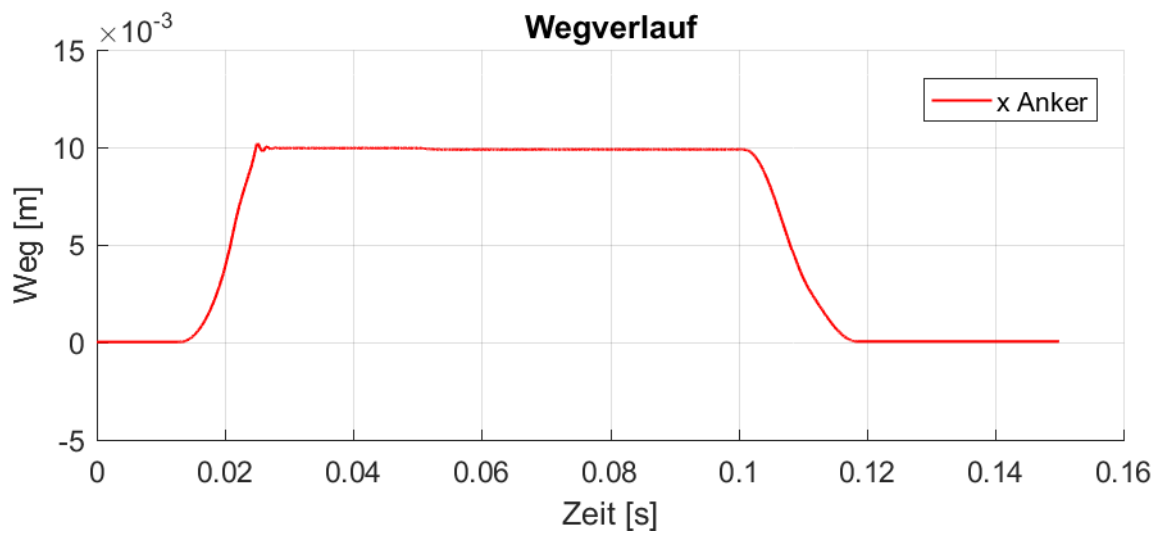


Abbildung 40: Szenario 1 - Wegverlauf

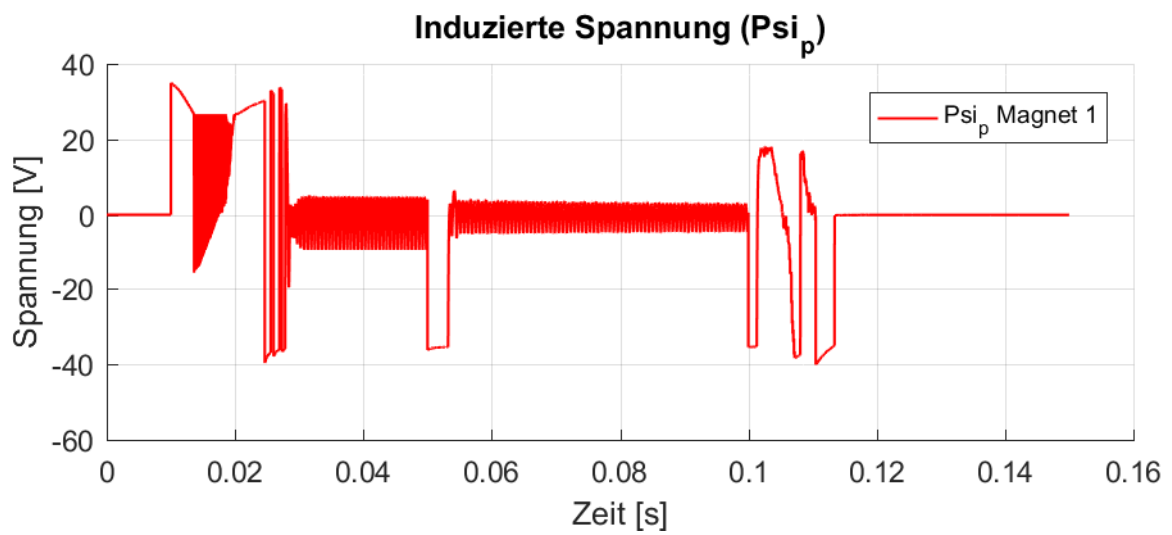


Abbildung 41: Szenario 1 - Induzierte Spannung

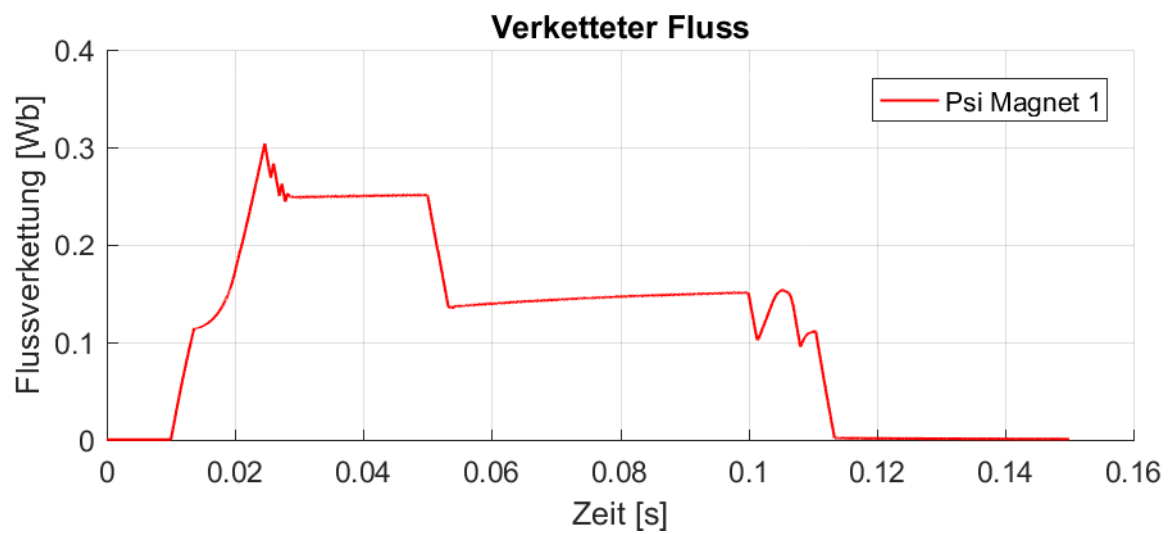


Abbildung 42: Szenario 1 - Flussverkettung

Nach 0,01 s wird die Sollkraft auf 1000 N erhöht, sodass der Magnet mit der maximal möglichen Kraft einrückt. Man erkennt, dass der Regler zunächst kontinuierlich die maximale Spannung von 35 V anlegt, bis der Maximalstrom von 20 A erreicht wird. Durch den sprunghaften Anstieg der Spannung ist auch die Gegeninduktion $\dot{\Psi}$ sehr hoch. Durch das hohe $\dot{\Psi}$ baut sich allmählich eine Flussverketung Ψ in der Spule auf, d.h. der Strom beginnt zu fließen. Der Stromanstieg führt zu einer Kraft die in einer Bewegung resultiert. Durch den kleiner werdenden Luftspalt steigt die Kraft stark an, die Bewegung wird weiter beschleunigt. Bei Erreichen der 5 mm Marke setzt die zusätzlich wirkende Reibkraft von 250 N ein. Hierdurch wird die Geschwindigkeit des Ankers zwar verringert, sie bleibt jedoch so hoch, dass dies im Wegverlauf nur als leichter Knick erkennbar ist. Beim Erreichen des Anschlages wird der Luftspalt so klein, dass die Kraftvorgabe von 1000 N überschritten wird, und der Regler durch Anpassen der Spannung versucht, die Kraft zu verringern. Nachdem der Gang vollständig eingelegt wurde, wechselt die Kraftvorgabe auf die Haltekraft von 300 N (30 N Haltekraft + 250 N Kompensation der Federkraft bei 10 mm Auslenkung + 20 N Reserve), der Regler versucht durch die Spannungsvorgabe den entsprechenden Strom einzustellen.

Zum Zeitpunkt 0,1 s wird das Signal zum Anfahren der Mittellage gegeben. Die Kraftvorgabe wird auf 100 N gesetzt. Dies führt zu einer negativen Spannungsvorgabe durch den Regler, da der noch fließende Spulenstrom schnellstmöglich abgebaut werden muss. Ist die rückstellende Federkraft größer als die Magnetkraft, setzt sich der Anker in Bewegung. Durch den steigenden Luftspalt muss der Regler nun den Strom erhöhen und gibt wieder eine positive Spannung auf das System. Kurz vor Erreichen der Mittelstellung wird die Sollkraft auf 0 N gesetzt. Die Feder zieht den Anker in die Mittellage.

Das Einlegen des Ganges aus der Mittellage hat 0,0148 s gedauert. Hierbei traten Kontaktkräfte von 3680 N am rechten Anschlag auf. Beim Zurückfahren wurde die Mittellage in 0,0185 s erreicht.

6.7.2 Szenario 2

In Szenario 2 wird analog zu Szenario 1 ein Gang eingelegt. Nach 0,1 s erfolgt nun aber ein Umschalten in den anderen Gang.

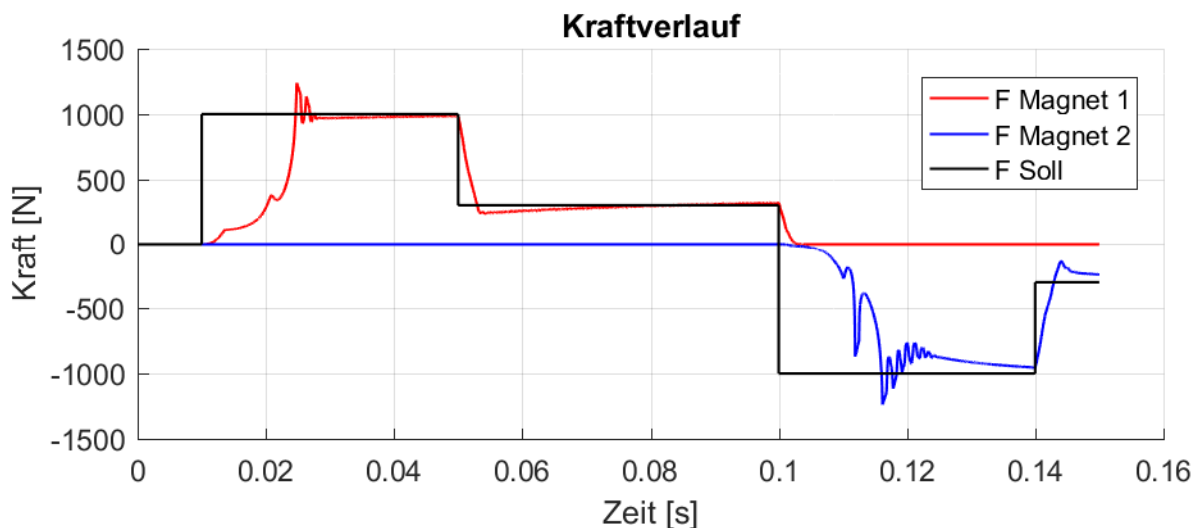


Abbildung 43: Szenario 2 - Kraftverlauf

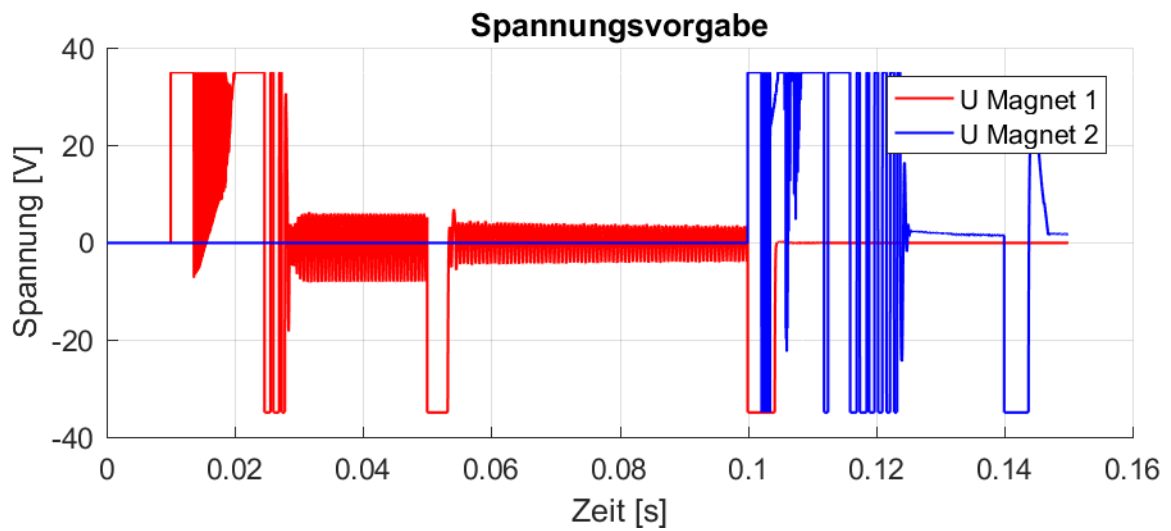


Abbildung 44: Szenario 2 - Spannungsvorgabe

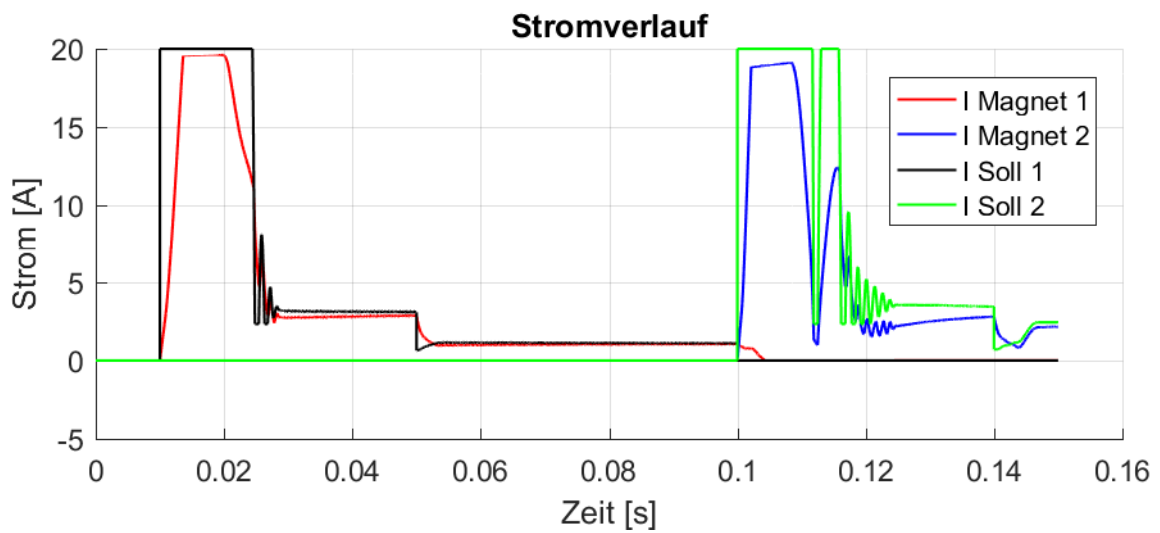


Abbildung 45: Szenario 2 - Stromverlauf

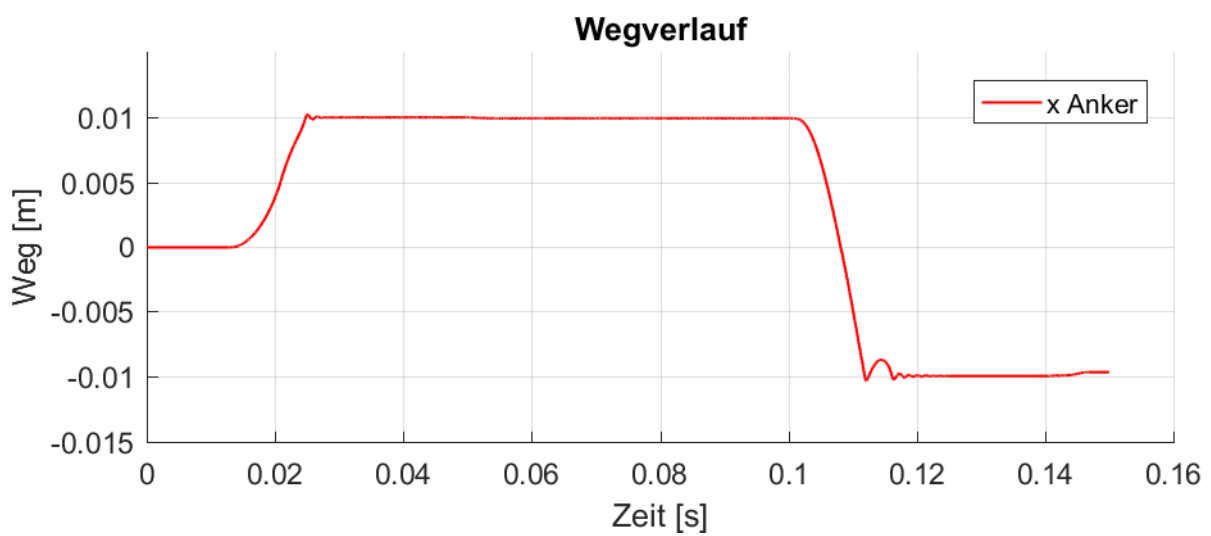


Abbildung 46: Szenario 2 - Wegverlauf

Im Gegensatz zu Szenario 1 wird nun die Sollkraft von 1000 N auf -1000 N gesetzt um schnellstmöglich in die andere Endposition zu fahren. Dementsprechend sinkt der Sollstrom von Elektromagnet 1 A auf 0 A. Da der Kraftabbau von Magnet 1 durch die Induktivität der Spule verzögert wird, gibt der Regler eine negative Spannung auf den Magneten um diesem entgegenzuwirken. Wäre dies nicht der Fall, so würde der Ausrückvorgang deutlich länger dauern. Der Elektromagnet 2 wird hingegen ab 0,1 s mit der vollen Spannung beaufschlagt. Somit setzt sich der Anker in Bewegung und wird immer stärker vom Magneten angezogen. Nach Erreichen des Anschlags schaltet der Magnet auf eine Haltekraft von -300 N um. Zum Umschalten von Gang 1 in Gang 2 hat der Aktor 0,012 s benötigt, wobei am Anschlag nun Kräfte von 6131 N auftraten.

Die Anschlagskräfte in den gezeigten Simulationen sind sehr hoch, jedoch sollte in diesem Fall die Performanz des Systems im Hinblick auf die Geschwindigkeit gezeigt werden. Um in einer realen Anwendung die Kräfte zu senken, kann entweder die schon erwähnte Wegregelung entsprechend umgesetzt werden, oder die Sollvorgaben können angepasst werden. Dies führt jedoch zu längeren Schaltzeiten. Alternativ ist auch die Wahl eines anderen Anschlagsmaterials möglich (beispielsweise Gummi).

6.8 Kostenabschätzung

Für das vorgestellte System sollen die Kosten anhand der Rohstoffkosten abgeschätzt werden. Anstelle von Eisen (wie im FEM Modell hinterlegt) werden Gehäuse und Anker im realen Objekt aus Stahl gefertigt werden. Daher wird hier der aktuelle Stahlpreis zur Kostenabschätzung verwendet.

Tabelle 17: Kostenermittlung, elektromagnetischer Aktor

Bauteil	Material	Menge	Preis	Kosten
Anker	Eisen/Stahl	0,223 kg	5,95 €/kg [25]	1,33 €
Gehäuse	Eisen/Stahl	0,93 kg	5,95 €/kg	5,48 €
Spule 1	Kupfer	0,55 kg	5,24 €/kg [26]	2,89 €
Spule 2	Kupfer	0,55 kg	5,24 €/kg	2,89 €

Es ergibt sich ein Gesamtpreis von 12,59 €. Hinzu kommen selbstverständlich noch Formzuschläge für die verwendeten Materialien sowie Fertigungskosten und Montagekosten.

Zusätzlich müssen noch die elektronischen Komponenten betrachtet werden. Hierzu zählen der Buck-Boost Converter (ca. 3 €) sowie ein Wegsensor zur Positionserfassung, ein Stromsensor zum messen des Spulenstroms sowie der Schaltung und der Controller/Steuereinheit zur Umsetzung der Sollvorgaben/Regelung.

7 Elektrodynamisches Modell

Die Beschreibung des Elektrodynamischen Modells ist ähnlich aufgebaut wie das elektromagnetische Modell. In einem ersten Schritt wird der Aktor in einer dreidimensionalen Abbildung gezeigt. Anschließend wird die Modellierung des Aktors in FEMM erläutert und die dem Matlab Modell zugrundeliegenden Gleichungen erläutert. In Kapitel 7.9 werden Ein- und Ausrückvorgänge in Form von Plots dargestellt und analysiert.

7.1 Design

Der Aktor ist in Abbildung 47 dargestellt. Die beiden Spulen sind kupferfarbig, das eiserne Gehäuse und die auf dem Magneten sitzenden Eisenteile sind in dunkelgrau gezeigt. Der zylinderförmige Magnet ist in hellgrau gezeichnet. Über ein T-Stück ist der Aktor mit der Schaltgabel verbunden.

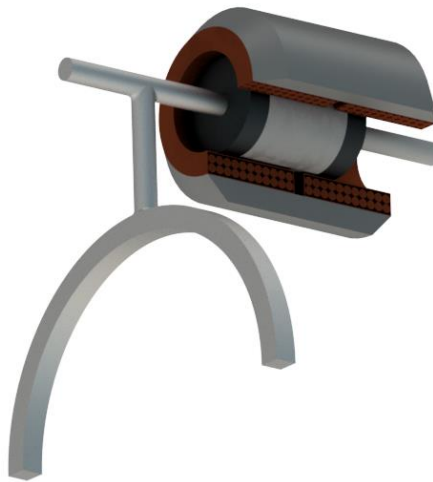


Abbildung 47: 3D-Ansicht

7.2 FEMM-Modell

Das Modell wurde in FEMM rotationssymmetrisch aufgebaut. Der Anker besteht aus einem Permanentmagneten mit zwei Eisenstücken an den Enden. Die Eisenstücke sind notwendig, da die magnetischen Flusslinien senkrecht aus dem Permanentmagneten austreten. Das Eisen an den Enden des Ankers sorgt dafür, dass die magnetischen Flusslinien ihre Richtung in einem Medium mit geringem magnetischem Widerstand ändern können und so möglichst senkrecht durch die Spule treten können.

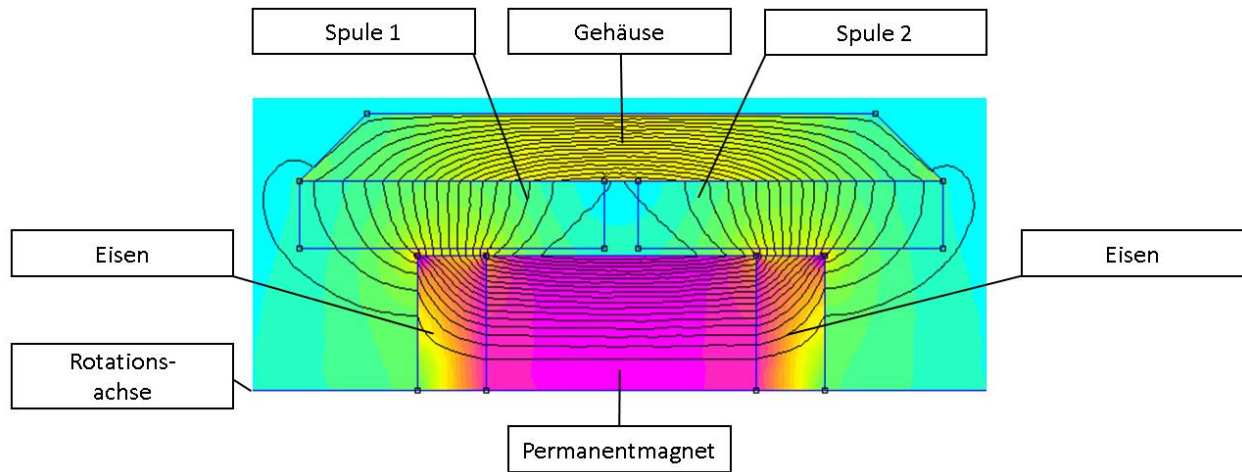


Abbildung 48: FEMM-Modell des elektrodynamischen Aktors (Symmetrieachse liegt auf der unteren Bildkante)

Die Dimensionen sind dem Anhang (Abbildung 69) zu entnehmen. Im Gegensatz zu dem elektromagnetischen Aktor, kann durch eine Umkehr der anliegenden Spannung in der Spule die Lorentzkraft in ihrer Richtung geändert werden und der Aktor bewegt sich in die entgegengesetzte Richtung. Dadurch kann die Mittelstellung ohne eine der Einrückbewegung entgegenwirkende Feder erreicht werden. Da die Flusslinien sowohl aus dem Magneten aus-, als auch eintreten kann durch eine zweite Spule die auf den Anker wirkende Kraft verdoppelt werden.

Die Lorentzkraft kennt drei Stellgrößen zur Beeinflussung: die magnetische Flussdichte B , der durch den Leiter fließende Strom I und die Länge L des vom Strom durchflossenen Leiter.

Die magnetische Flussdichte B ist durch den Permanentmagneten und die Gestaltung des Aktors vorgegeben. Ein Permanentmagnet mit einer hohen magnetischen Remanenz und eine Geometrie, die nur wenige Streuflüsse zulässt, sind hier vorteilhaft. Dadurch werden die Leiter von einem Feld mit hoher magnetischer Flussdichte durchdrungen. Des Weiteren müssen die Feldlinien so gerichtet sein, dass sie senkrecht zu den Leitern stehen. Die Länge des Leiters ergibt sich aus dem Durchmesser der Spule und der Anzahl der Windungen. Die Stromstärke I ist durch die maximal zulässige Stromstärke von 50 A begrenzt.

7.3 Grundgleichungen

Der Anker ist in Simulink als Punktmasse modelliert und erhält folgende Bewegungsgleichung:

$$m\ddot{x} = \sum F_{Ext} = F_L + F_{Reib} + F_{Anschlag} + F_{Kugelfeder} \quad (32)$$

$$m\ddot{x} = I \cdot (\vec{B} \times \vec{l}) + F_{Reib} + F_{Anschlag} + F_{Kugelfeder}$$

Hierbei sind F_{ext} alle von außen an die Punktmasse angreifenden Kräfte. Diese sind wie folgt definiert:

- F_{Reib} : Reibkräfte, die bei der Bewegung wirken (50 N allgemein, 300 N beim Einrücken)
- F_L : Lorentzkraft beider Spulen zusammen
- $F_{Anschlag}$: Kontaktkraft des linken Anschlags in positive x-Richtung
- $F_{Kugelfeder}$: Modellierung des federnden Druckstückes in den End- und Mittellage

Die Grundgleichung für den Stromkreis setzt sich aus dem Widerstand des Leiters, der Induktivität der Spule und der induzierten Spannung zusammen. Die induzierte Spannung wird sowohl durch eine Bewegung des Ankers durch das Magnetfeld erzeugt, als auch durch eine Änderung des Magnetfeldes.

Für den Stromkreis gilt:

$$U(t) = U_R + U_L + U_{Ind} \quad (33)$$

$$U(t) = R \cdot I + L \cdot \frac{dI}{dt} + B \cdot l \cdot \dot{x} + \dot{B} \cdot l \cdot x$$

Um die Änderung von B zu berücksichtigen, wird, wie in dem Modell für das elektromagnetische Prinzip, auf die magnetische Flussverketzung zurückgegriffen. Deren zeitliche Änderung entspricht der durch Änderung der magnetischen Flussdichte B und der durch die Geschwindigkeit des Ankers induzierten Spannung. Also gilt für die elektrische Grundgleichung:

$$U(t) = R \cdot I + L \cdot \frac{dI}{dt} + \dot{\Psi} \quad (34)$$

7.4 Modellbildung:

Das Modell zur Simulation der Bewegung des Ankers wurde in Matlab Simulink erstellt. Das Modell besteht aus drei Subsystemen:

1. Eingangsspannung
2. Spule
3. Mechanik

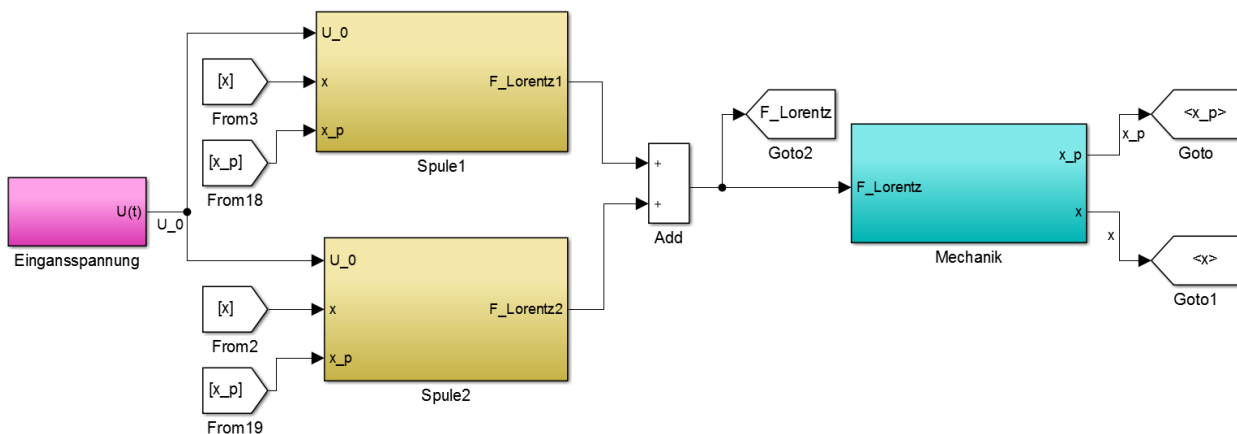


Abbildung 49: Gesamtsystem

7.4.1 Subsystem Eingangsspannung

In dem Subsystem „Eingangsspannung“ werden die Steuerverläufe des Aktors definiert.

Mit Ihnen kann das dynamische Verhalten der Tauchspule analysiert werden. Des Weiteren wird testweise eine Regelung implementiert. Folgende Steuerverläufe werden definiert:

1. Ausrücken aus der Mittellage → Linke Endposition → Rechte Endposition
2. Ausrücken aus der Mittellage → Linke Endposition → Mittellage
3. Positionsregelung

7.4.2 Subsystem Spule

Das Subsystem „Spule“ bekommt als Eingangsgröße die durch den Block „Eingangsspannung“ erzeugte Spannung U_0 . Diese führt in den Summationsblock, in dem alle Spannungen aus dem elektrischen Kreis verarbeitet werden:

$$L \cdot \frac{dI}{dt} = U_0 - R \cdot I - U_{Ind} \quad (35)$$

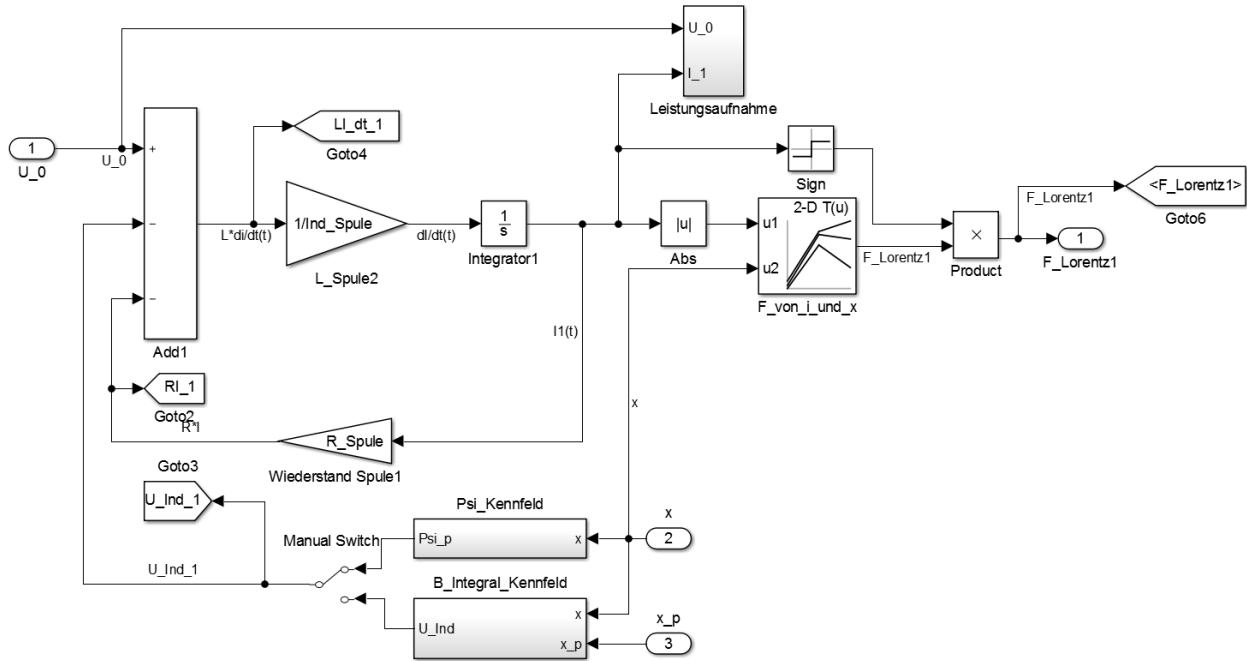


Abbildung 52: Subsystem „Spule“

Die induzierte Spannung kann über die magnetische Flussverketung Ψ berechnet werden. Alternativ wäre auch eine Approximation der induzierten Spannung durch die Geschwindigkeit des Ankers möglich. Beide Varianten liefern annähernd identische Ergebnisse, jedoch berücksichtigt die magnetische Flussverketung sowohl die induzierte Spannung durch die Geschwindigkeit des Ankers, als auch durch die Änderung der magnetischen Flussdichte B , die sich durch die Position des Ankers (=Eisenkern) in der Spule ändert. Daher wird im Folgenden die magnetische Flussverketung verwendet.

Für die magnetische Flussverketung wurde die Kennlinie $\Psi(x)$ in FEMM erstellt. Dessen zeitliche Ableitung entspricht der induzierten Spannung in der Spule. Die Kennlinie ist für beide Spulen identisch, da sowohl die Geometrien, als auch die Position des Ankers bis auf das Vorzeichen seiner x -Koordinate identisch sind.

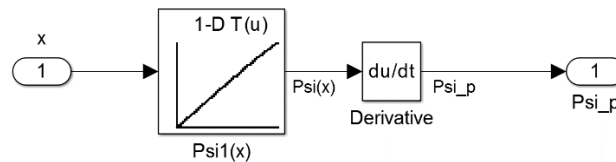


Abbildung 53: Induzierte Spannung durch magnetische Flussverketung

Die Berechnung der Lorentzkraft erfolgt durch ein Kennfeld $F_{(I,x)}$. Dieses wurde mit FEMM in Abhängigkeit von der Stromstärke I und der Ankerposition x erstellt. Da das Kennfeld nur für positive Stromstärken erstellt wurde geht nur der Betrag des Stroms in das Kennfeld ein. Die Krafrichtung ergibt sich aus dem Vorzeichen des Stroms. Diese identische Vorgehensweise gilt auch für die zweite Spule, in der die Ankerposition negativ eingeht, da sich

der Anker hier entgegengesetzt zur ersten Spule bewegt. Die Lorentzkräfte aus Spule eins und zwei können nun addiert werden und ergeben die auf den Anker wirkende Kraft.

7.4.3 Subsystem Mechanik

In dem Subsystem „Mechanik“ wird die Bewegungsgleichung (32) für den Anker umgesetzt.

Die Bewegung ist durch den einen maximalen Weg von 10mm in jede Richtung begrenzt. Überschreitet die x-Koordinate diesen Wert, wird das Subsystem „Anschlag Links“, bzw. „Anschlag Rechts“ aktiv. Die der Bewegung entgegen gerichtete Kraft wird durch ein Feder-Dämpfer-Modell simuliert, welches in Abschnitt Elektromagnet (Kapitel 6.1.2) genauer erläutert wurde.

Außerdem wirkt die Reibkraft der Bewegung entgegen. Diese wird in Kapitel 6.1.1 beschrieben.

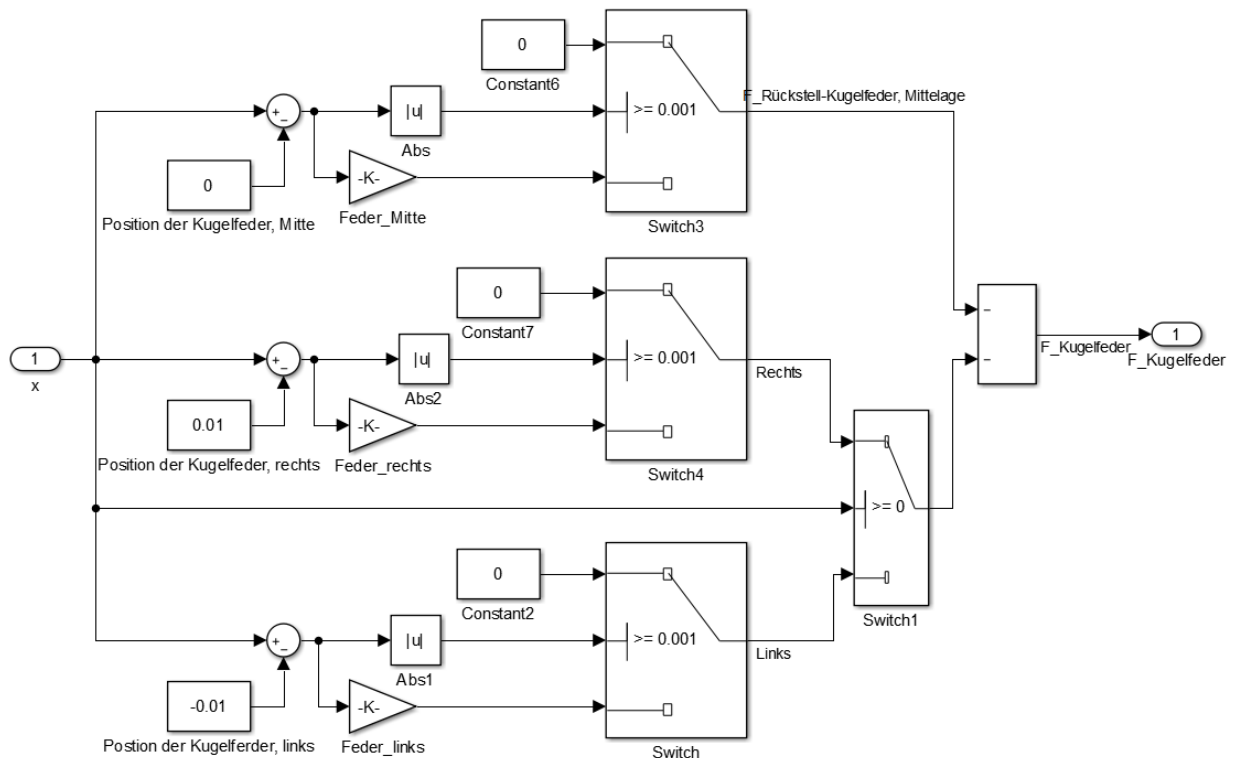


Abbildung 54: Subsystem: „Kugelfeder“

Die Einrastfunktion an den Enden der Bewegung und in der Mittellage wird durch federnde Druckstücke modelliert. Die Federkonstante ist so ausgelegt, dass die Haltekraft 30 N beträgt.

7.5 Optimierung

Mögliche Optimierungsmöglichkeiten ergeben sich bei der Windungsanzahl N , der Geometrie und einer Positionsregelung.

Die maximale Kraft von 300 N ist nur durch die Lorentzkraft aufzubringen, das heißt der Term $F = B \cdot (I \cdot l)$ muss so ausgelegt werden, dass die Lorentzkraft mindestens 300 N zuzüglich einer Reserve erreicht. Dazu kommen nur die Spulenlänge l und die Stromstärke I in Frage, da das Magnetfeld durch den Permanentmagneten vorgegeben ist. Eine Änderung der Dimensionen des Permanentmagneten erhöht nur in einem geringen Maße die magnetische Durchflutung, erhöht aber deutlich die bewegten Massen.

Die maximale Stromstärke I ist einerseits durch die Anforderung einer maximalen Entnahme von 50 A begrenzt, andererseits aber auch durch den Spulenwiderstand. Mit einer Spannung von nur 12 V sind 50 A nur mit einem sehr kurzen Leiter ($R = 0,24 \text{ Ohm}$) zu realisieren. Eine Möglichkeit die Lorentzkraft zu vergrößern ist es, einen Spannungswandler einzusetzen, der mit einer größeren Spannung die Stromstärke ausreichend erhöht. Spannungswandler mit einer großen Leistungsaufnahme sind aber auch sehr kostenintensiv, weswegen für den vorliegenden Fall der gleiche Spannungswandler wie im elektromagnetischen Teil eingesetzt wird, dessen maximal zulässige Stromstärke bei 20 A liegt [23].

Für diese Stromstärke kann also die optimale Leiterlänge ermittelt werden.

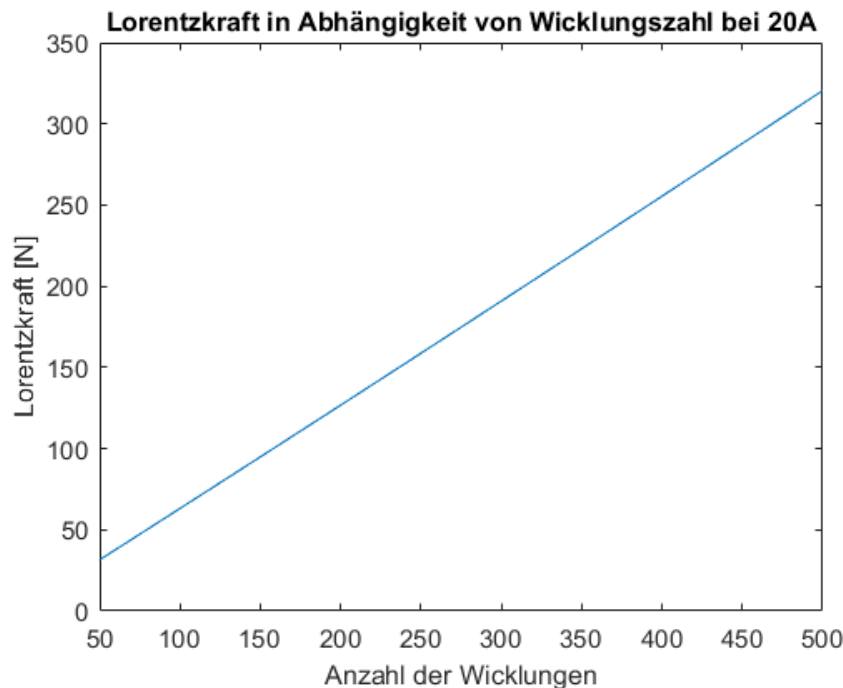


Abbildung 55: Lorentzkraft pro Spule und pro Windungen bei 20 A

Die Ausgabe der Lorentzkraft erfolgte durch eine Simulation mit FEMM. Es bestätigt sich die Vermutung, dass die Lorentzkraft linear abhängig von der Windungsanzahl ist.

Um benötigte Kraft von 300 N zu erreichen muss die Windungsanzahl also mindestens 237 betragen, um etwas Reserve bei der Auslegung zu haben, wird eine Windungsanzahl von 250 gewählt. Mit einer Spannung von 17 V erreichen die beiden Spulen eine Lorentzkraft von 304,5 N, also nur wenig über der Sollkraft von 300 N. Wie in Abbildung 55 zu sehen ist, steigt die Lorentzkraft linear mit der Windungsanzahl an. Um die Kraftreserve also weiter zu erhöhen, müssen weitere Windungen hinzugefügt werden. Dadurch erhöht sich der elektrische Widerstand der Spule. Um einen gleichbleibenden Strom von 20 A zu erhalten muss die anliegende Spannung erhöht werden.

Eine weitere Optimierungsmöglichkeit ergäbe sich durch eine implementierte Positionsregelung, wodurch die federnden Drückstücke entfallen würden. Die End- und Mittelstellung müsste dann durch einen ausreichend großen Dauerstrom gehalten werden. Die benötigte Leistung dürfte vernachlässigbar sein.

In Tabelle 18 sind die nach der Optimierung erhaltenen Eckdaten des Systems zusammengefasst.

Tabelle 18: Kenndaten, elektrodynamisches System

Windungszahl Spule	250
Ohmscher Widerstand Spule	0.855 Ohm
Masse Anker	550 g
Ankerdurchmesser	40 mm
Abmaße Gehäuse LxD	Ca. 95 x 82mm

7.6 Kostenabschätzung

Legt man für die beiden Spulen die reinen Materialkosten zugrunde, errechnen sich die Kosten wie folgt: Die Drahtlänge beträgt insgesamt $l = 2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_{\text{Spule}} \cdot N) = 2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 0,026 \text{ m} \cdot 250) = 81,68 \text{ m}$. Der Querschnitt des gewählten Drahtes „18 AWG“ beträgt $0,823 \text{ mm}^2$, somit ergibt sich für das Gesamtvolumen:

$$V_{\text{Spule}} = 0,823 \text{ mm}^2 \cdot 10^{-6} \cdot 81,68 \text{ m} = 6,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\Rightarrow m_{\text{Spule}} = 6,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot 8920 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \approx 0,6 \text{ kg}$$

Bei einem aktuellen Kupferpreis von $5,24 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ betragen die reinen Materialkosten für die Spule also 3,14 €.

Legt man den Rohstoffpreis für Neodym zugrunde, ergäben sich für den Permanentmagneten bei einem Kilopreis von 46,95 € [27] Kosten von:

$$V_{\text{Magnet}} = (\pi \cdot r_{\text{Anker}}^2 \cdot l_{\text{Magnet}}) = (\pi \cdot (0,02 \text{ m})^2 \cdot 0,02 \text{ m}) = 2,51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$m_{\text{Gesamt}} = 2,51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot 7003 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,176 \text{ kg}$$

Der Preis nach dem reinen Rohstoffwert liegt damit bei 8,26 €.

Die Materialkosten für das verbaute Eisen sind wiederum sehr gering:

Eisenbehaftete Verlängerung (2x):

$$V_{\text{AnkerEisen}} = 2 \cdot (\pi \cdot r_{\text{Anker}}^2 \cdot l_{\text{AnkerEisen}}) = 2 \cdot (\pi \cdot (0,02 \text{ m})^2 \cdot 0,01 \text{ m}) = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Gehäuse:

$$V_{\text{Gehäuse}} = \pi \cdot (r_{\text{außen}} - r_{\text{innen}})^2 \cdot l_{\text{Gehäuse}} = \pi \cdot (0,082 \text{ m} \cdot 0,061 \text{ m})^2 \cdot 0,04 \text{ m} = 5,54 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$V_{\text{Gesamt}} = V_{\text{AnkerEisen}} + V_{\text{Gehäuse}} = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 + 5,54 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 6,79 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$m_{\text{Gesamt}} = 6,79 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot 7874 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,535 \text{ kg}$$

Für einen Preis von 5,95 € pro Kilo Stahl ergäben sich Gesamtkosten von 3,18 €.

Des Weiteren trägt der Spannungswandler mit einem Preis von ca. 2,93 € zu den Kosten bei.

Der Gesamtpreis beträgt also:

Tabelle 19: Preiskalkulation

Spule (2x)	3,14 €
Permanentmagnet	8,26 €
Gehäuse	3,18 €
Spannungswandler (2x)	5,86 €
Gesamtpreis	20,44 €

7.7 Bauraum

Der elektrodynamische Aktor kann in seinen Abmessungen noch weiter optimiert werden, in der oben beschriebenen Konfiguration erreicht er einen maximalen Durchmesser von 82 mm und eine Länge von 95 mm. Zu diesen Optimierungsmöglichkeiten gehören vor allem die Reduktion der Leiterlänge und dadurch auch eine Verkleinerung der Spule. Ein in seiner Leistung vergleichbarer DC-Motor liegt bei 86 mm x 113 mm, dazu kommt noch die Schaltwalze, zur Umformung der rotatorischen in eine translatorische Bewegung. Es ergeben sich aber noch Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Dicke des Gehäuses, vor allem aber bei der Windungsanzahl der Spule.

Ein grundlegend anderes Design ergäbe sich durch die Montage des Permanentmagneten auf die Schaltklaue. Dabei wäre der Aktor in seiner radialen Abmessung wesentlich größer, allerdings müsste auch kein weiteres Bauteil in dem Getriebe verbaut werden. Es ergäben sich aber Schwierigkeiten hinsichtlich des magnetischen Flusses, da dieser durch die Wellen in dem Getriebe gestört würde. Außerdem würden sich die zu bewegenden Massen deutlich erhöhen.

Keine Nachteile ergäben sich durch die Spule, deren Leiterlänge gleichbleiben würde und dadurch weniger Windungen bräuchte. Gleichzeitig müssten diese Windungen auf den kompletten Ein- und Ausrückweg verteilt werden, um sicherzustellen, dass die Lorentzkraft an jeder Stelle ausreichend groß ist.

7.8 Erwärmung

Genau wie für den elektromagnetischen Aktor, ist auch hier der Strom in der Spule sehr groß und beträgt bei einer Eingangsspannung von 17 V ca. 20 A. Die Dauerstromfestigkeit von 18 AWG liegt bei 2,3 A, daher muss die Wärmeentwicklung berücksichtigt werden. Würde sich die Leistung vollständig in Wärme umwandeln, ergäbe sich:

$$P_{\text{Wärme}} = R_{\text{Spule}} \cdot I^2 = (2 \cdot 0.855 \, \Omega) \cdot (20 \, \text{A})^2 = 684 \, \text{W}$$

Mit $c_{\text{Kupfer}} = 382 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ ergibt sich eine Temperaturerhöhung von

$$\Delta T = 684 \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot \frac{1}{0.6 \, \text{kg}} \cdot \frac{1}{382} \frac{\text{kgK}}{\text{J}} = 2.98 \frac{\text{K}}{\text{s}}$$

Für kurze Schaltzeiten ($t_{\text{max}} = 0.1 \, \text{s}$) ist die Erwärmung zu vernachlässigen. Dadurch wird auch die durch den Hersteller empfohlene Maximaltemperatur von 80 °C nicht überschritten (Zum Vergleich, die Curie-Temperatur von Neodym liegt bei diesem Magneten bei 310 °C).

Für konventionelle Systeme (hydraulisch oder mit Elektromotoren) gelten keine Einschränkungen durch Temperatureinfluss.

7.9 Verläufe

Im Folgenden werden zwei Schaltverläufe dargestellt und analysiert: von der Mittellage ausgehend zu den Endpositionen (Szenario 1), sowie von der Mittellage ausgehend an eine Endposition und wieder zurück in die Mittelstellung (Szenario 2). Die Analyse der Verläufe dient zum Verifizieren des Modelles, gerade im zweiten Szenario kommt hier das federnde Druckstück zum Tragen, das den Anker in der Mittellage halten muss.

7.9.1 Szenario 1

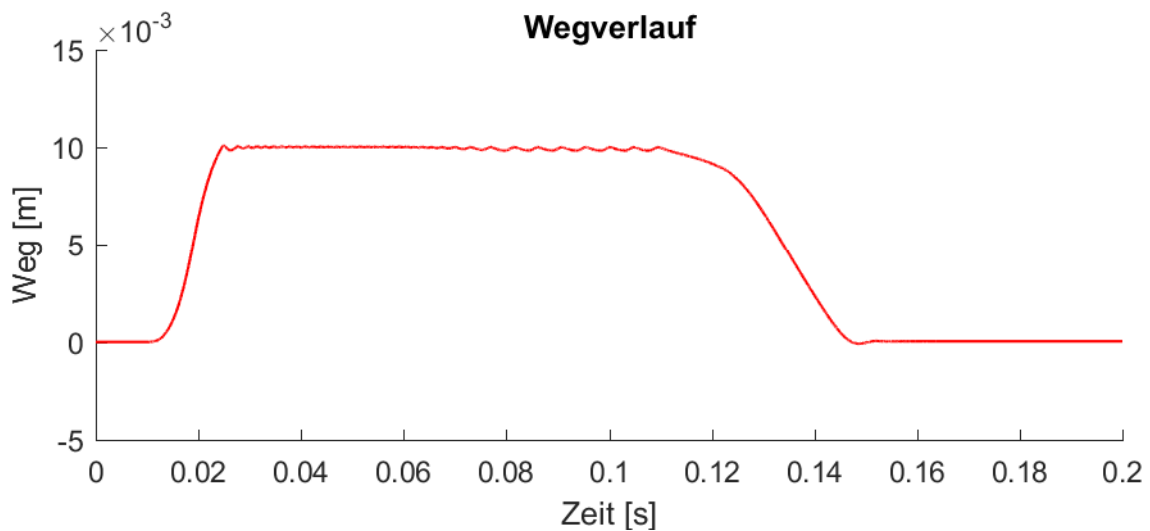


Abbildung 56: Wegverlauf Mittellage

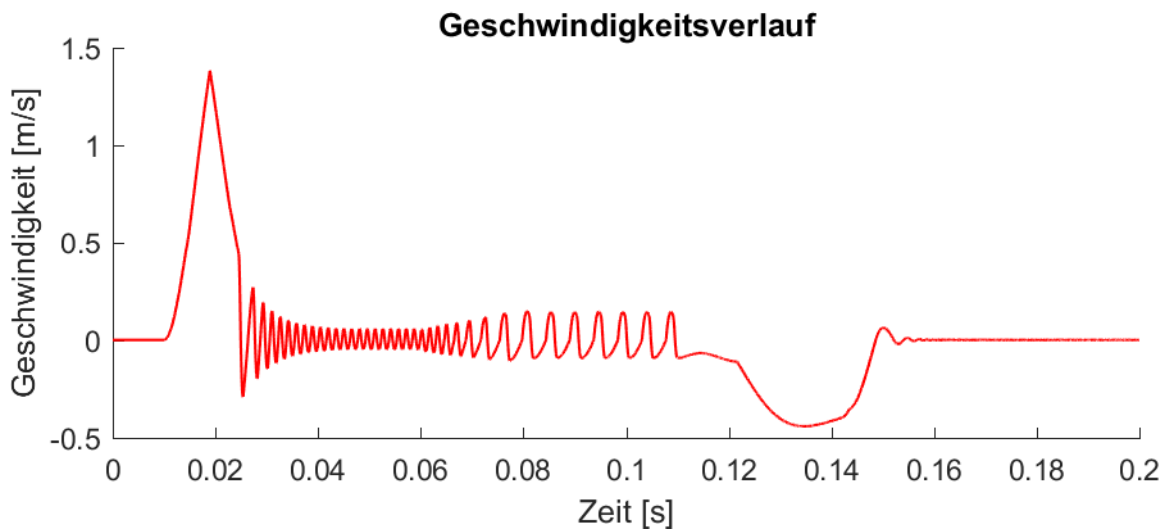


Abbildung 57: Geschwindigkeitsverlauf Mittellage

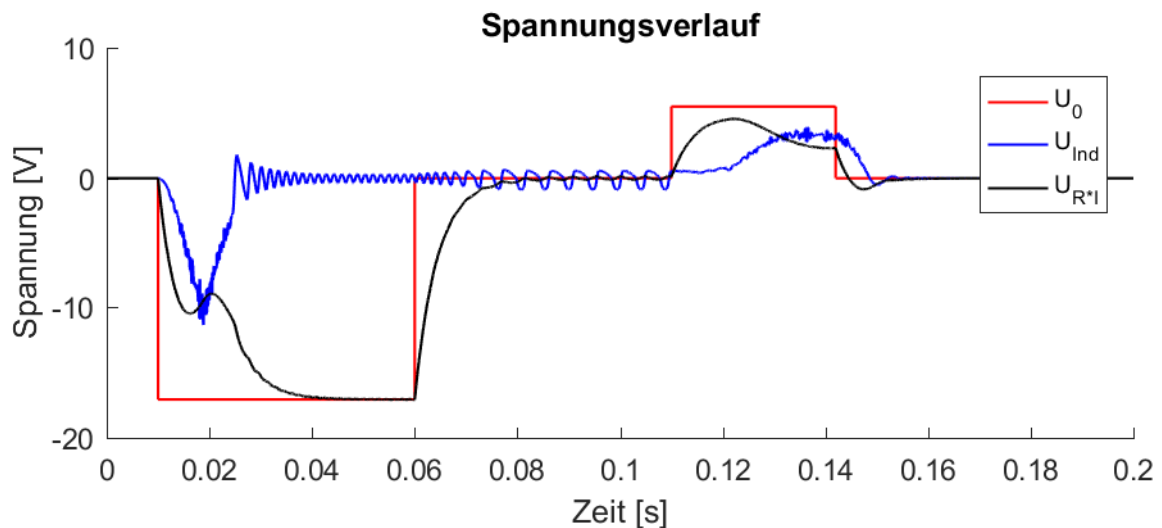


Abbildung 58: Spannungsverlauf Mittellage

Zum Ausrücken in die Mittellage wird das System mit einer Spannung von 5,5 V für eine Dauer von 32 ms bestromt. Beim Abschalten der anliegenden Spannung verbleibt durch die Induktivität der Spule für eine geringe Zeit ein Strom in der Spule. Durch die Kugelfederarretierung bewegt sich der Anker dennoch nicht aus der Mittellage. Des Weiteren wirkt auch die Reibkraft von 50 N der Bewegung entgegen.

Kräfte

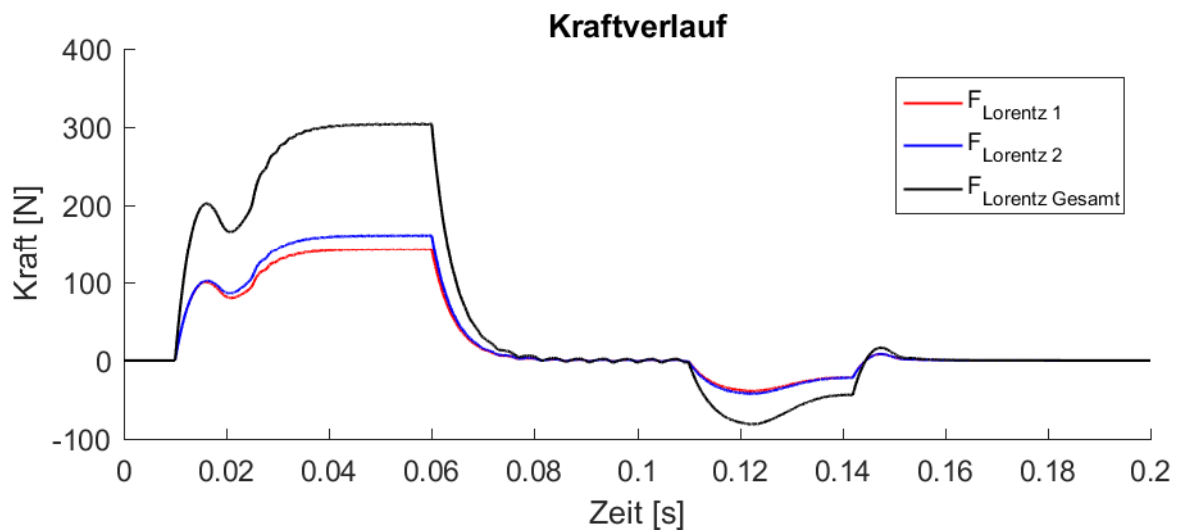


Abbildung 59: Kraftverlauf Mittellage

7.9.2 Szenario 2

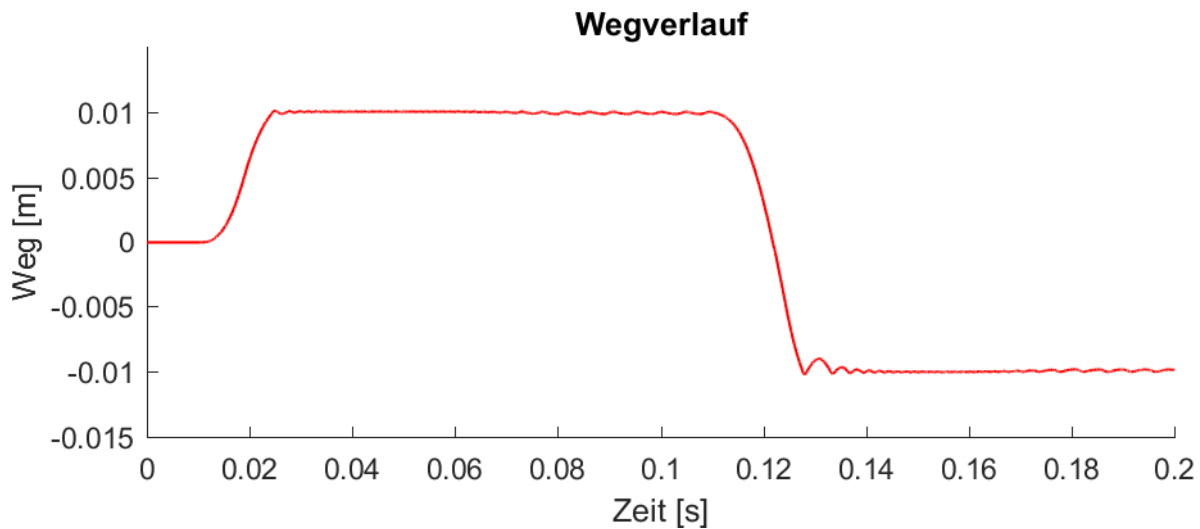


Abbildung 60: Wegverlauf Endpositionen

Der Anker erreicht bereits nach einer Zeit von $\Delta t = 20 \text{ ms}$ seine Endlage, von welcher er durch die Modellierung des Anschlags als Feder-Dämpfer wieder leicht zurückfedert. Bei $t=110 \text{ ms}$ bewegt sich der Anker in die entgegengesetzte Richtung, wo er wiederrum auf den Anschlag prallt und durch die Kugelfedern in Position gehalten wird.

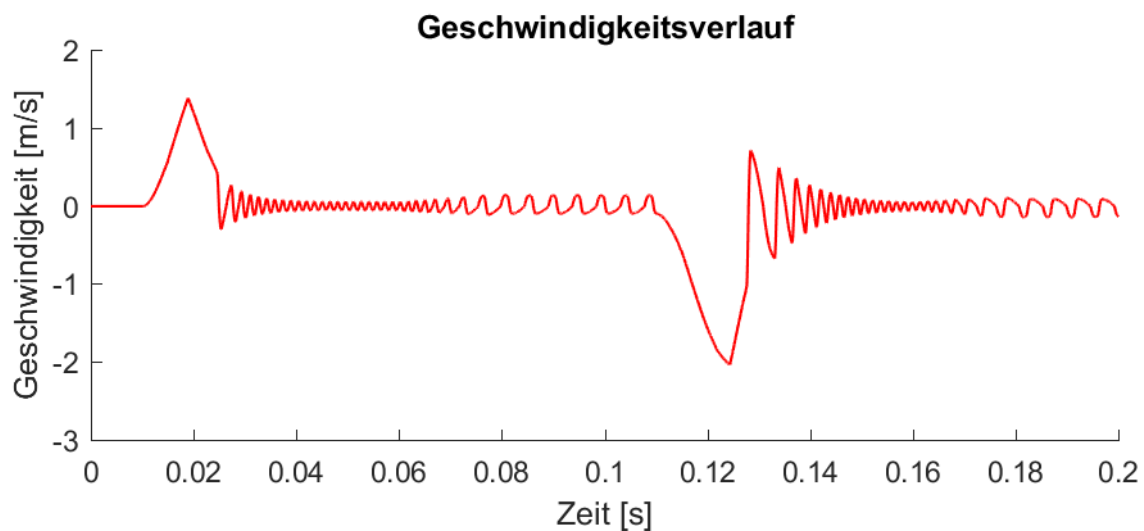


Abbildung 61: Geschwindigkeitsverlauf Endpositionen

Die starken Schwingungen am Anschlag sind wiederum auf die Modellierung der Anschlagskraft zurückzuführen.

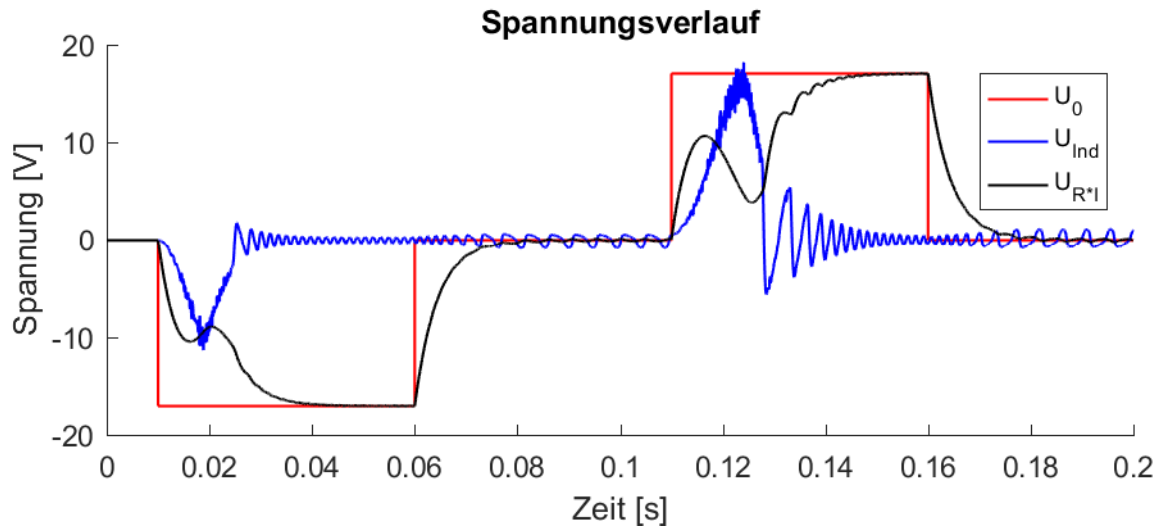


Abbildung 62: Spannungsverlauf Endpositionen

Durch die Induktion der Spule baut sich der Strom im System erst verzögert auf. Dieser zeitliche Verzug hat unmittelbaren Einfluss auf die Lorentzkraft, wodurch sich der Knick in Abbildung 63 erklärt.

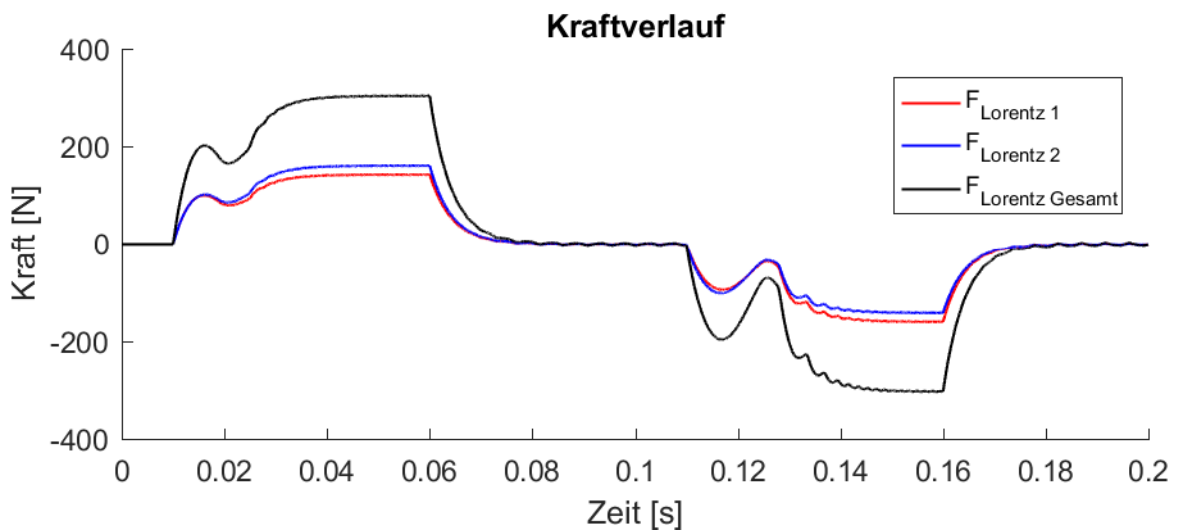


Abbildung 63: Kraftverlauf Endpositionen

Die Lorentzkraft erreicht ein Maximum von 304,5 N. Durch die Massenträgheit des Ankers ist an der Stelle $x = 5$ mm eine ausreichend große kinetische Energie vorhanden, sodass die Lorentzkraft noch nicht die 300 N überschritten haben muss, damit es zum Einrücken kommt. Gleichwohl ist das System so ausgelegt, dass es auch ohne die Massenträgheit des Ankers seine Funktion erfüllt.

8 Vergleich mit Schaltwalze

Um die Dynamik der gezeigten Systeme mit der Dynamik eines Schaltwalzensystems zu vergleichen, soll auch ein gewöhnliches Schaltwalzensystem mit sonst gleichbleibender mechanischer Strecke modelliert werden. In einem ersten Schritt wird die Grundgleichung des Gleichstrommotors und die mechanischen Komponenten der Schaltaktorik vorgestellt. Anschließend findet eine Optimierung wichtiger Kenndaten statt.

8.1 Modellierung des Gleichstrommotors

Da der Einsatz einer Feder zum Ausrücken bei einem Schaltwalzensystem nicht notwendig ist, wird die Federsteifigkeit im mechanischen System zu Null gesetzt (keine Feder). Der Motor wird mit den Differentialgleichungen eines permanentenerregten Gleichstrommotors simuliert. [6, Kap. 6, S. 121]

$$U_{(t)} = I \cdot R + L \frac{dI}{dt} + U_{ind}$$

$$U_{ind} = k_E \cdot \dot{\phi}$$

$$M_M = k_M \cdot I$$

Die Motorkonstanten k_M und k_E sind identisch.

Die Kraft, welche auf die mechanische Strecke wirkt, kann über die Energieerhaltung berechnet werden. Die Umformung der rotatorischen in eine translatorische Bewegung erfolgt hierbei über eine Schaltwalze mit dem Wirkungsgrad $\eta = 70 \%$.

$$M_M \cdot \phi_{mot} \cdot \eta = F \cdot x$$
$$F = M_M \cdot \frac{\phi_{mot}}{x} \cdot \eta = M_M \cdot i_{ges} \cdot \eta$$

Die Winkelgeschwindigkeit des Motors kann aus der translatorischen Geschwindigkeit des mechanischen Systems und dem Übersetzungsverhältnis bestimmt werden

$$\dot{\phi}_{Mot} = i_{ges} \cdot \dot{x}$$

Der Elektromotor erreicht erst bei hohen Drehzahlen entsprechend hohe Leistungen. Die Schaltwalze hingegen sollte so langsam wie möglich drehen um hohe Trägheitskräfte/Momente zu vermeiden. In Abbildung 64 ist ein Schaltaktor mit zwei Übersetzungsstufen zwischen Motor und Schaltwalze dargestellt. Für die Motorträgheit wird die Gesamtübersetzung i_{ges} und für die Schaltwalze die Übersetzung $i_{rot-trans}$, der Rotation der Walze in die translatorische Bewegung, berücksichtigt.

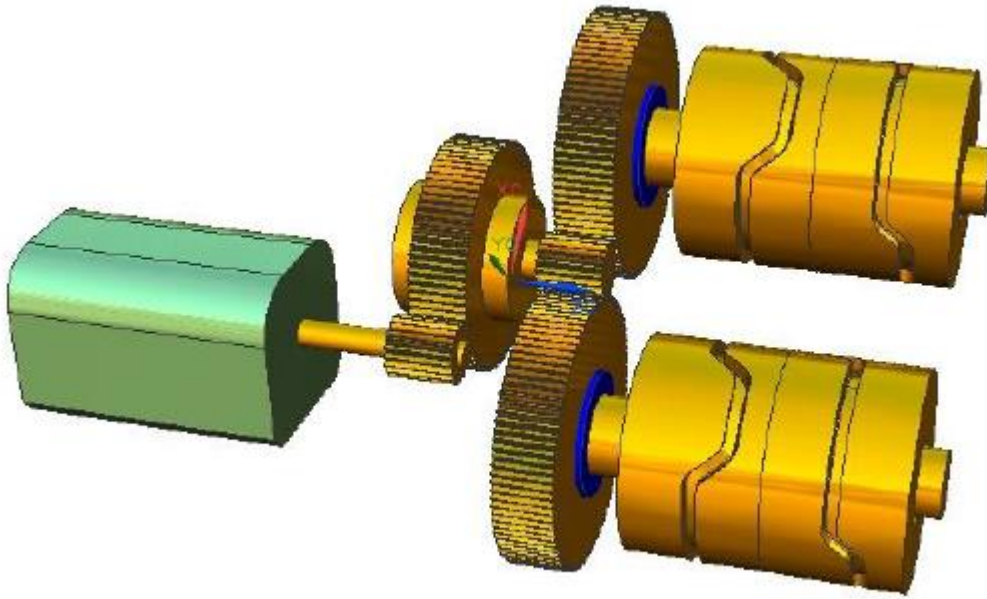


Abbildung 64: Schaltaktorik mit Schaltwalzen [10, S. 62]

Für das mechanische System muss die Masse der bewegten Teile berechnet werden. Dabei müssen neben der Schalmuffe und der Schaltgabel auch die Rotationsträgheit von Motor und Schaltwalze berücksichtigt werden. Die Berechnung der mechanischen Ersatzmasse wird im Folgenden durchgeführt. Die Übersetzung von Walze zur Translation ergibt sich wie folgt:

$$i_{rot-trans} = \frac{\phi_{Walze}}{x}$$

Soll der Schaltvorgang beispielsweise in einer viertel Umdrehung der Walze stattfinden, so ergibt sich eine benötigte Übersetzung von:

$$i_{rot-trans} = \frac{\phi_{Walze}}{x} = \frac{\frac{\pi}{2}}{10 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \approx 160 \frac{1}{\text{m}}$$

Die Übersetzung zwischen Motor und Walze ergibt sich folglich aus $i_{Mot-Walze} = \frac{i_{ges}}{i_{rot-trans}}$.

Die Ersatzmasse von Motor und Walze errechnen sich wie folgt:

$$M_{tr\ddot{a}g,Mot} = \Theta_{Mot} \cdot \ddot{\phi}_{Mot}$$

$$M_{tr\ddot{a}g,Walze} = \Theta_{Walze} \cdot \ddot{\phi}_{Walze}$$

$$F_{tr\ddot{a}g,Mot} = M_{tr\ddot{a}g,Mot} \cdot i_{ges} = \Theta_{Mot} \cdot \ddot{\phi}_{Mot} \cdot i_{ges} = \Theta_{Mot} \cdot i_{ges}^2 \cdot \ddot{x}$$

$$F_{tr\ddot{a}g,Walze} = M_{tr\ddot{a}g,Walze} \cdot i_{rot-trans} = \Theta_{Walze} \cdot \ddot{\phi}_{Walze} \cdot i_{rot-trans} = \Theta_{Walze} \cdot i_{rot-trans}^2 \cdot \ddot{x}$$

$$m_{ers} = \Theta_{Mot} \cdot i_{ges}^2 + \Theta_{Walze} \cdot i_{rot-trans}^2$$

Die Trägheit der Schaltwalze wird als Trägheit einer Vollwelle aus Stahl mit Durchmesser 45 mm und einer Länge von 25 mm angenommen.

8.2 Optimierung des Schaltwalzensystems

Wie der obige Abschnitt gezeigt hat, hängt die Massenträgheit stark von den gewählten Übersetzungsverhältnissen ab. Durch das Gesamtübersetzungsverhältnis kann die Drehzahl des Motors, und somit auch dessen Leistungsaufnahme variiert werden. Die Wahl des Übersetzungsverhältnisses zwischen

Rotation und Translation bestimmt maßgeblich die Drehgeschwindigkeit der Schaltwalze und somit deren Trägheitskräfte.

Um also die Dynamik eines solchen Systems abzuschätzen werden sowohl Leistungsaufnahme, als auch Einrückzeit über der Variation der beiden zur Verfügung stehenden Parameter analysiert.

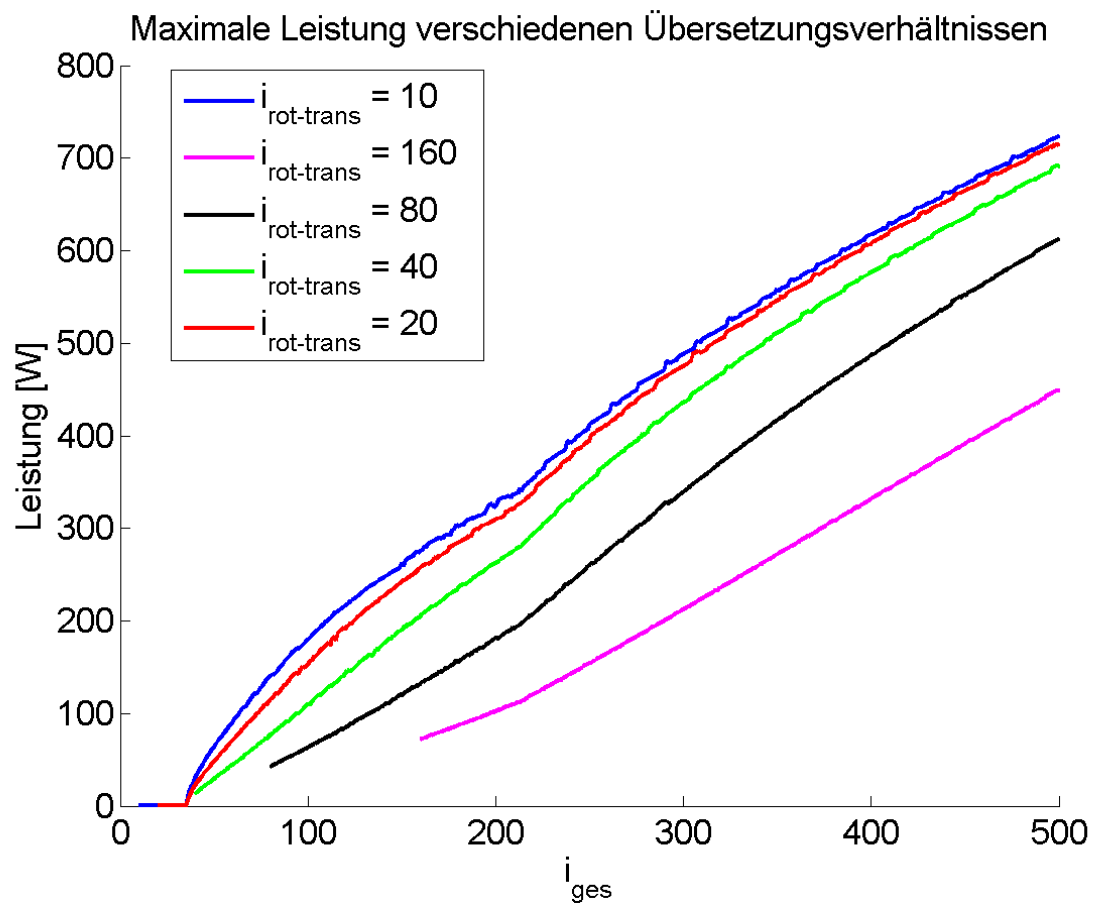


Abbildung 65: Leistung des Motors bei verschiedenen Übersetzungen

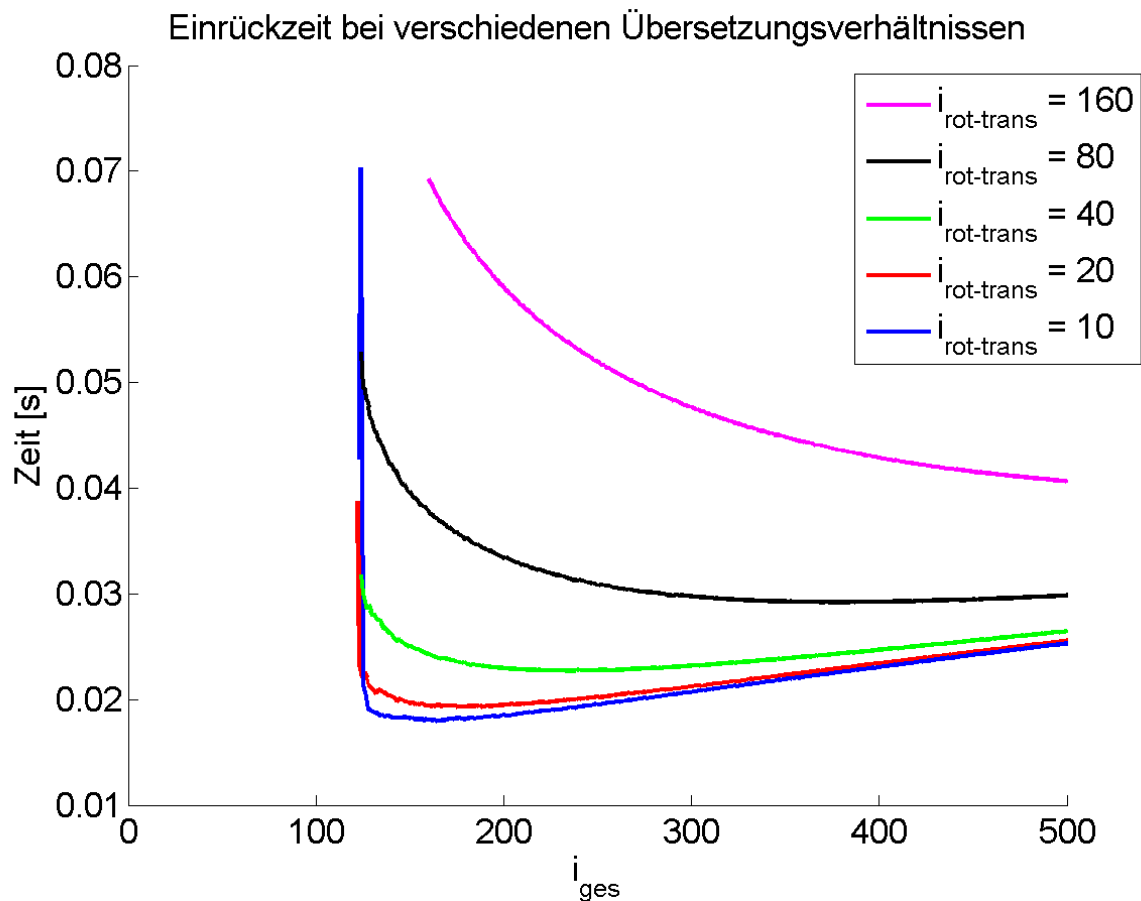


Abbildung 66: Einrückzeit in Abhängigkeit der Übersetzung

Mit steigender Gesamtübersetzung dreht der Motor schneller. Solange der Motor noch nicht seine Grenzdrehzahl überschritten hat, steigt also mit der Übersetzung auch die Leistung (Abbildung 65).

Wird die Übersetzung von Rotation zu Translation verringert, also die Geschwindigkeit der Schaltwalze reduziert, so steigert das deutlich die Dynamik (Abbildung 66), erhöht jedoch auch den Leistungsbedarf des Motors bei gleichbleibender Gesamtübersetzung (Abbildung 65). Ab einem Übersetzungsverhältnis von $i_{\text{rot-trans}} = 20 \frac{1}{m}$ stellt sich keine deutliche Verbesserung mehr ein.

Da das maximale Moment des verwendeten Motors $M_{\text{Mot,max}} = 2,01 \text{ Nm}$ beträgt muss die Gesamtübersetzung mindestens $i_{\text{ges}} = \frac{300 \text{ N}}{2,01 \text{ Nm}} \approx 150 \frac{1}{m}$ betragen um den Kraftbedarf von 300 N beim Einrücken zu decken.

Tabelle 20: Einrückzeit der Schaltwalze

i_{ges}	$i_{\text{rot-trans}}$	Leistung	Einrückzeit
$150 \frac{1}{m}$	$20 \frac{1}{m}$	242,6 W	0,02 s
$175 \frac{1}{m}$	$20 \frac{1}{m}$	278,7 W	0,0193 s

8.3 Vergleich mit den linear wirkenden Konzepten

Im Optimalfall rückt das Schaltwalzensystem in einer Zeit von ca. 19 ms ein und benötigt dafür eine Leistung von ca. 280 W (Tabelle 20).

Der elektromagnetische Aktor kann bei einer vergleichbaren Leistung (252 W, vgl. Tabelle 16) Einrückzeiten von 51,4 ms realisieren. Der elektrodynamische Aktor benötigt eine Leistung von ca. 340 W und erreicht eine Einrückzeit von ca. 20 ms.

Bei der Simulation des Schaltwalzensystems wurde die Massenträgheit der Zahnräder zur Umsetzung der Übersetzung noch nicht berücksichtigt. Eine Gesamtübersetzung von $175 \frac{1}{m}$ erfordert eine mehrstufige Übersetzung mit massiven Zahnrädern, da große Kräfte/Momente übertragen werden. Die Berücksichtigung der zusätzlichen Massenträgheiten wird die Schaltzeit des Schaltwalzensystems deutlich erhöhen, somit sind die 3 Systeme durchaus vergleichbar.

Alle Systeme schaffen den Einrückvorgang und Ausrückvorgang deutlich unter der geforderten Zeit von 100 ms. Ein Vorteil der Schaltwalzenaktorik ist, dass die Anschlagkräfte durch geeignete Systemauslegung eliminiert werden können. Bei dem elektromagnetischen Konzept ist dies nicht so einfach möglich. Im elektrodynamischen Fall, kann diese gegebenenfalls über eine Wegregelung umgesetzt werden.

Die Kosten für den rotatorischen Motor werden auf 20 € geschätzt. Damit liegen die Kosten für den Motor ungefähr in der gleichen Preisklasse wie für den elektromagnetischen oder elektrodynamischen Aktor. Da jedoch für den rotatorischen Schaltaktor noch mindestens zwei Übersetzungsstufen und die Schaltwalze hinzukommen liegt der Preis für das Schaltwalzensystem deutlich über den linear wirkenden Aktoren.

Die reinen Aktoren benötigen alle ungefähr den gleichen Bauraum. Allerdings werden für den rotatorischen Motor noch die Zahnräder und die Schaltwalzen benötigt, wodurch der Bauraum den, der linearen Aktoren übersteigt.

Insgesamt erfüllen alle Aktoren ihre Aufgabe gut. Durch die fehlenden Übersetzungen sind die Kosten und der Bauraum der linear wirkenden Schaltaktoren geringer. Zusätzlich sinkt die Komplexität der Baugruppe und die Dynamik steigt.

9 Fazit

Zu Beginn dieser Arbeit wurde eine Literatur- und Patentrecherche zu linear wirkenden Schaltaktoren durchgeführt. Aufbauend auf den gefundenen Konzepten wurden unter Zuhilfenahme verschiedener Kreativitätstechniken und Methoden der Produktentwicklung ein elektrodynamisches und ein elektromagnetisches System entwickelt. Kennfelder beider Aktoren wurden in einer FEM-Simulation ermittelt. Anschließend konnten die Systeme in Matlab Simulink implementiert und simuliert werden.

In diesem Projekt wurde eine Möglichkeit aufgezeigt wie Kennfelder von elektrodynamischen als auch elektromagnetischen Aktoren simulativ ermittelt, und anschließend zum Aufbau eines dynamischen Modells genutzt werden können.

Die durchgeführten Simulationen haben die Eignung beider Aktorkonzepte für elektrisch synchronisierte Getriebe, sowie deren Potential hinsichtlich Dynamik und Bauraumbedarf deutlich gemacht. Der Vergleich mit dem Schaltwalzenaktor hat gezeigt, dass der Bauraum und die Kosten durch einen linear wirkenden Aktor gesenkt werden können. Zusätzlich dazu sinkt die Komplexität des Bauteils. Die Dynamik der entwickelten Systeme ist sogar geringfügig besser als bei einem Schaltwalzensystem.

Die Erkenntnisse hinsichtlich der Kennlinienbeeinflussung sowie der konstruktiven Einflüsse beschreiben, wie ein entsprechender Aktor flexibel auf die unterschiedlichsten Anforderungen angepasst werden kann. Die auftretenden Zielkonflikte wurden genau beschrieben. Als einer der wichtigsten Faktoren ist die Windungszahl der Spule für beide Aktoren identifiziert worden. Für die Dynamik ist eine geringe Windungszahl der Spule empfehlenswert. Dadurch steigt jedoch der benötigte Strom. Für den elektrodynamischen Aktor ist zusätzlich die Geometrie des Ankers und dessen Gegenstücks von großer Bedeutung. Diese Arbeit kann somit als Grundlage dienen um einen Prototypen aufzubauen und diesen hinsichtlich Dynamik, Bauraum und Kosten zu optimieren.

Als Ausblick für weitere Entwicklungen in diesem Bereich wären konstruktive Änderungen der Konzepte, beispielsweise eine Integration des Aktors in oder auf der Schaltmuffe. Beim elektrodynamischen Modell wäre es denkbar, die Spulenwicklungen so zu verteilen, dass bei einer Ankerposition von 5mm, dort wo die Einrückkräfte einsetzen, die Wicklungsanzahl zunimmt und damit auch die Lorentzkraft.

Bei Regelung bedarf bei beiden Systemen einer Überarbeitung. Die Umsetzung einer Wegregelung erscheint hier durchaus sinnvoll. Sollte ein Buck-Boost Converter verwendet werden, so muss dessen Eignung überprüft und dessen Übertragungsverhalten berücksichtigt werden

10 Anhang

10.1 Technische Zeichnungen

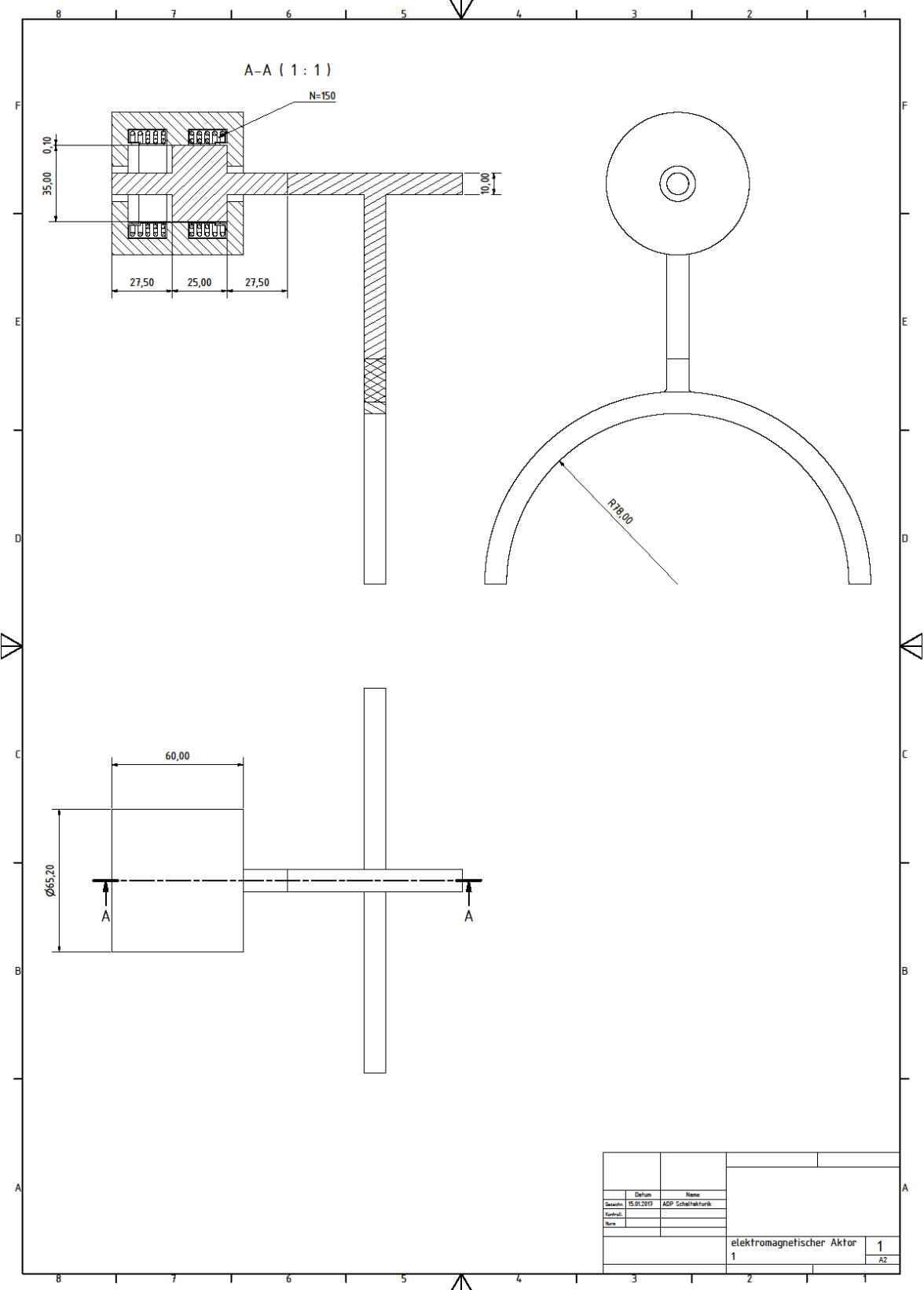
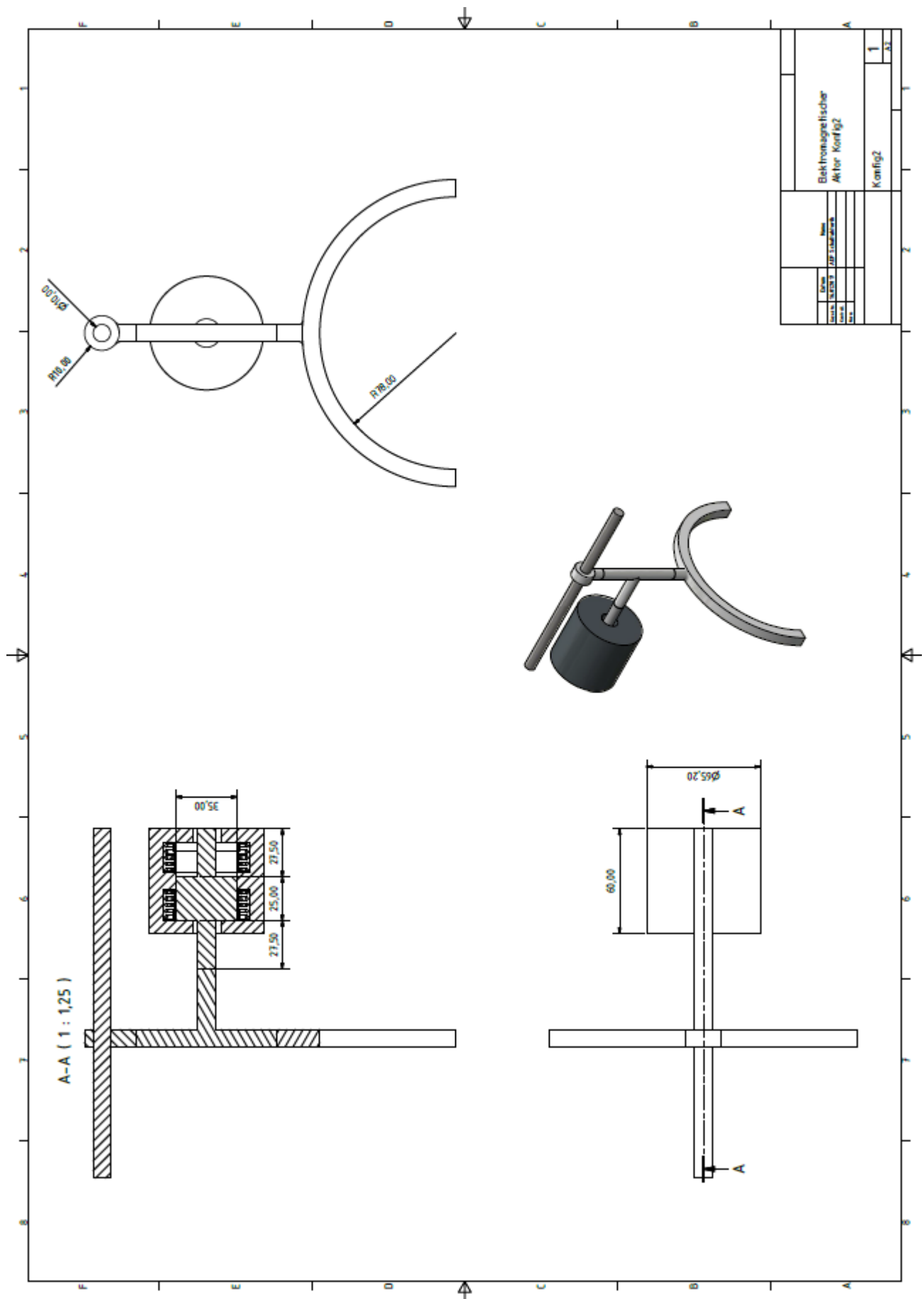


Abbildung 67: Elektromagnetischer Aktor Konfiguration 1



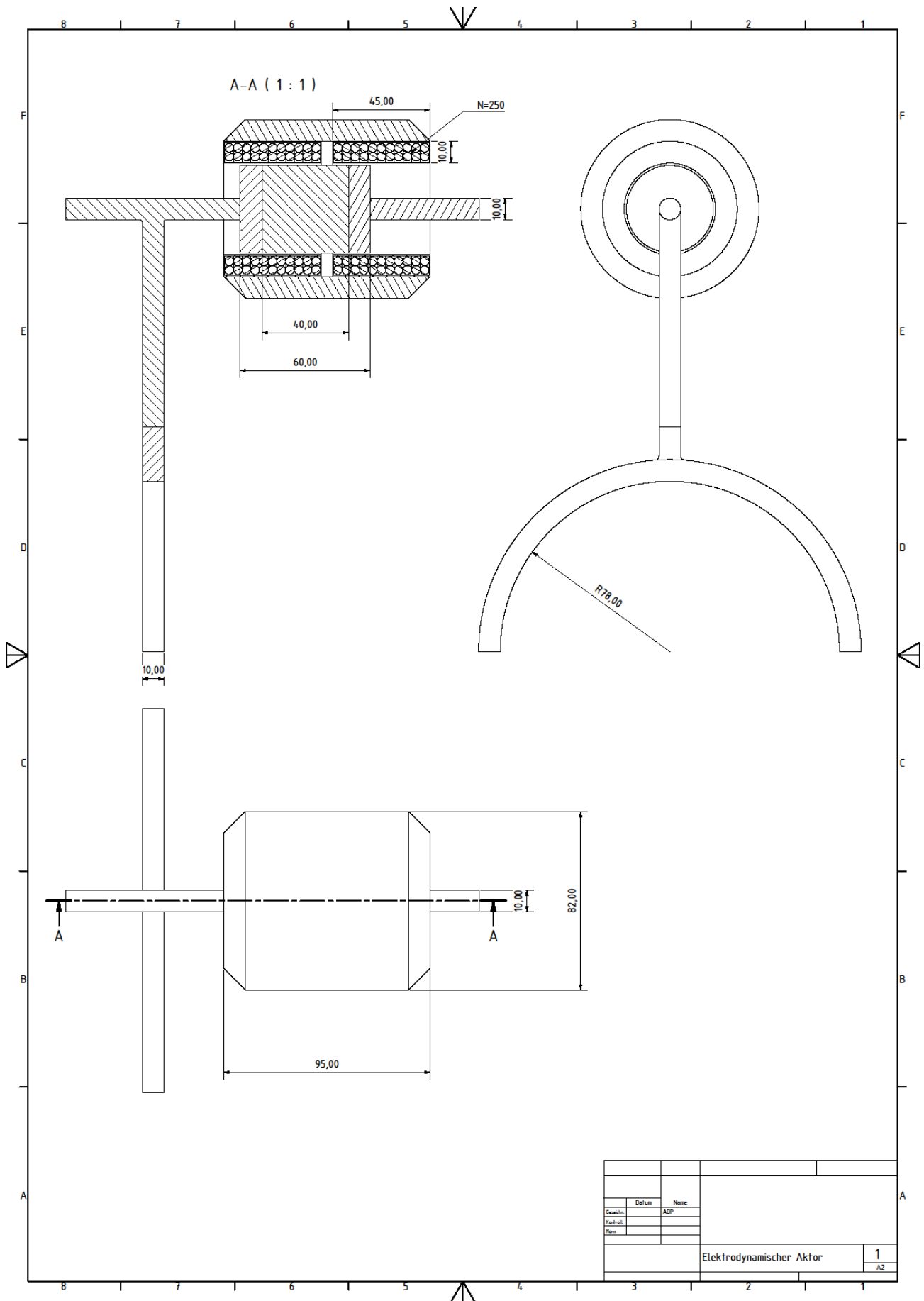


Abbildung 69: Elektrodynamischer Aktor

10.2 Parameter des elektromagnetischen Simulink Modells

```
%-----  
%Variablen des mechanischen Systems und der Spule  
%-----  
I_Soll_Max=20; %Spulenstrom ist auf 19A begrenzt (Sollstrom)  
U_Soll_Max=35; %Spannung des Step up Converters ist auf 35V begrenzt  
  
k=25000; %Steifigkeit der Feder in [N/m]  
F_reib=50; %Coulombsche Reibung bei Bewegung [N]  
F_einrueck=300; %Kraft die zum Einrücken benötigt wird [N]  
k_anschlag =1e7;  
d_anschlag =1.5*0.32*k_anschlag;  
Position_Anschlag=9.9/1000; % Position des Anschlags in [m]  
Offset_Luftspalt=10/1000; %Gibt an wie groß der Luftspalt in Nullstellung ist [m]  
  
%T_Verz=1/3*1/1000; %Nach 1/1000 Sekunde hat sich die Reibkraft zu 95% aufgebaut  
f_0=1000; %Eckfrequenz des PT1 Glieds  
T_Verz=1/2/pi/f_0; %Zeitkonstante des PT1 Glieds  
  
Controller_P=1000; %P-Anteil des PID Spannungsreglers  
Controller_I=100; %I-Anteil des PID Spannungsreglers  
Controller_D=10; %D-Anteil des PID Spannungsreglers  
  
%-----  
%Berechnungen  
%-----  
  
%load('Kennfeld_6_12_2016'); %Laden des ermittelten Kennfelds  
%load('Kennfeld_15_12_16_Variante3');  
%load('Kennfeld_27_12_2016');  
load('Kennfeld_03_01_2017');  
  
m=Kennfeld.m+0.17; %Masse der bewegten Teile in [kg] = Masse Anker (aus Kennfeld)+  
Masse Gabel(120g)+Masse Muffe(50g)  
R_Spule=Kennfeld.R_Spule; %Widerstand der Spule in [Ohm]  
  
Kennfeld_Strom.i =Kennfeld.i;  
Kennfeld_Strom.d =Kennfeld.d;  
Kennfeld_Strom.Psi=Kennfeld.Flux;  
  
Kennfeld_Strom =inverse_psi_modif(Kennfeld_Strom);%Invertieren des Psi(d,i)  
Kennfelds --> Strom(d,Psi)  
  
Kennfeld_StromKraft =inverse_F_modif(Kennfeld); %Invertieren des Psi(d,i)  
Kennfelds --> Strom(d,Psi)  
  
%-----  
%Darstellen der Kennfelder  
%-----  
figure(1)  
mesh(Kennfeld.d,Kennfeld.i,Kennfeld.F);  
xlabel('Luftspalt [m]');  
ylabel('Strom [A]');  
zlabel('Kraft [N]');  
title('Kraft Kennfeld');
```

```

figure(2)
mesh(Kennfeld_StromKraft.d,Kennfeld_StromKraft.F,Kennfeld_StromKraft.i);
xlabel('Luftspalt [m]');
ylabel('Kraft [N]');
zlabel('Strom [A]');
title('Strom-Kraft Kennfeld');

```

```

figure(3)
mesh(Kennfeld.d,Kennfeld.i,Kennfeld.Fluss);
xlabel('Luftspalt [m]');
ylabel('Strom [A]');
zlabel('Flussverkettung [Wb]');
title('Flussverkettung Kennfeld');

```

```

figure(4)
mesh(Kennfeld_Strom.d,Kennfeld_Strom.Psi,Kennfeld_Strom.i);
xlabel('Luftspalt [m]');
ylabel('Flussverkettung [Wb]');
zlabel('Strom [A]');
title('Strom Kennfeld');

```

```

%-----
%Berechnungen
%-----
sim('Mechanik')

ind1=find(Weg.signals.values>=0.0099, 1 ); %Erstes Erreichen von 10mm
Zeit=Weg.time(ind1)-0.01 %Einrückzeit

```


10.3 Parameter des elektrodynamischen Simulink Modells

```
%Punkte des Aktors in FEMM
AktorErstellen;

%Kennfelder
load('B_von_x_GehaeuseKurzSchraeg');
load('B_von_x_GehaeuseKurzSchraeg_250N');
load('B_von_x_GehaeuseLang');
load('F_von_i_und_x_D35');
load('F_von_i_und_x_D40');
load('F_von_i_und_x_D40_250N');
load('Kennfeld_Psi');
load('Kennfeld_Psi_250N');

%Materialkonstanten
mue_0=4*pi*1E-7;

%Parameter der Spule
d_Spule= (D_Mag/2+Luftspalt+H_Spule/2)/1000*2; % [m]
l_Spule=L_Spule/1000; % [m]
R_Spule=0.855076; %250N
R_Spule=1.71015; % [Ohm]
Ind_Spule=(N_Spule^2*mue_0*pi*(d_Spule/2)^2)/l_Spule; % [H]

%Parameter des Ankers
rho_Magnet=7003; % [kg/m^3] für Neodym
m_Magnet=pi*((D_Mag/2)/1000)^2*L_Mag/1000*rho_Magnet; % [kg]
rho_Eisen= 7860; % [kg/m^3]
m_Eisen= pi*((D_Mag/2)/1000)^2*(L_Fe1^2)/1000*rho_Eisen; %Beide Verlängerungen aus
Eisen zusammen

m_Ges=m_Magnet+m_Eisen+0.120+0.050; %[...+Schaltgabel+Muffe]

%Parameter für Bewegungsgleichung
d_mech = 10; % [N/(m/s)]
Position_Anschlag=10/1000; % Position des Anschlags in [m]
F_reib=50; %Coulombsche Reibung bei Bewegung [N]
F_einrueck=300; %Kraft die zum Einrücken benötigt wird [N]
k_anschlag =1e7;
d_anschlag =1.5*0.32*k_anschlag;
k_Kugelfedermodell = 30000;

K=1;
T=0.005*1/3;
T=(1/3)*(1/1000); %Nach (1/1000 s) sind 95% Kraft erreicht
```

Literaturverzeichnis

- [1] H. Tschöke, Hrsg., *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Basiswissen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [2] H. Naunheimer, B. Bertsche, G. Lechner, J. Ryborz, und W. Novak, *Fahrzeuggetriebe: Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion*, 2., Bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2007.
- [3] M. Hilgers, *Getriebe und Antriebsstrangauslegung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2016.
- [4] T. Friedmann, „Plug-in-Hybrid“, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.carfacto.de/glossar/plug-in-hybrid>. [Zugegriffen: 24-Jan-2017].
- [5] W. Klement, *Fahrzeuggetriebe*, 3., Aktualisierte und erw. Aufl. München: Hanser, 2011.
- [6] P. D.-I. S. Rinderknecht, „Skript zur Vorlesung Mechatronische Systemtechnik 2“. Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau, Technische Universität Darmstadt, SoSe-2016.
- [7] E. Kallenbach u. a., Hrsg., *Elektromagnete: Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung ; mit 38 Tabellen*, 4., Überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012.
- [8] P. D.-I. habil. D. h. c. A. Binder und P. D.-I. S. Rinderknecht, „Skript zum Praktikum für mechatronische Aktoren“. SoSe-2015.
- [9] P. D.-I. habil. D. h. c. A. Binder, „Skript zur Vorlesung Elektrische Maschinen und Antriebe“. WiSe-2014.
- [10] C. Han, C. Zinke, J. Schad, J. Yang, T. Li, und Z. Ma, „Entwicklung elektromechanischer Systeme zur Gangwahl in Getrieben“, TU Darmstadt, Darmstadt, 2014.
- [11] D. Knoblauch, „Schaltkupplungsanordnung für Kraftfahrzeuggetriebe sowie Verfahren zum Ein- bzw. Ausrücken einer Gangstufe“, DE 10 2006 004 125 A1, 02-Aug-2007.
- [12] J. Seeger, „Neues Doppelkupplungsgetriebe für Traktoren“, *ATZ offhighway*, Nr. Oktober, S. 58–67, 2012.
- [13] A. Böck und G. Gerauer, „Verbindungsvorrichtung und Getriebe für einen Fahrzeugantriebsstrang sowie Verfahren zur Betätigung einer solchen Verbindungseinrichtung“, DE 10 2012 210 287 A1, 19-Dez-2013.
- [14] A. Turner, K. Ramsay, R. Clark, und D. Howe, „Direct-Drive Electromechanical Linear Actuator for Shiftby-Wire Control of an Automated Transmission“, in *2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Piscataway, NJ, 2006.
- [15] W. Steinberger, H. Zettner, R. Christmayr, und H. Gulden, „Übersetzung von Patent EP0239869“. [Online]. Verfügbar unter: http://translationportal.epo.org/emtp/translate/?ACTION=abstract-retrieval&COUNTRY=EP&ENGINE=google&FORMAT=docdb&KIND=A1&LOCALE=en_EP&NUMBER=0239869&SRCLANG=EN&OPS=ops.epo.org/3.2&TRGLANG=de. [Zugegriffen: 31-Jan-2017].
- [16] „Schneckengetriebe“, 2008. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.lehrerfreund.de/technik/1s/schneckengetriebe/3232>. [Zugegriffen: 13-Jan-2017].
- [17] H. Klobardanz, „Skript zur Vorlesung Produktinnovation“. SoSe-2016.
- [18] „Finite Element Method Magnetics: HomePage“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>. [Zugegriffen: 27-Dez-2016].
- [19] P. D.-I. S. Rinderknecht, „1. Übung zur Vorlesung Mechatronische Systemtechnik II“. Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau, Technische Universität Darmstadt, SoSe2016.
- [20] P. Icha und G. Kuhs, *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015*. Dessau: Umwelt Bundesamt, 2016.
- [21] „Energie-Lexikon: Heizwert - Brennwert“, *Gammel Engineering – Ihr unabhängiger Ingenieurdienstleister*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.gammel.de/de/lexikon/heizwert---brennwert/4838>. [Zugegriffen: 19-Jan-2017].
- [22] „Treibstoff Vergleich“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.ruemmele.ch/eco/co2.php>. [Zugegriffen: 23-Jan-2017].
- [23] „Datenblatt Buck-Boost Converter LM5175-Q1“. Texas Instruments, 2016.
- [24] M. Lund, „Wire Gauge and Current Limits Including Skind Depth and Strength“, 2016. [Online]. Verfügbar unter: http://www.powerstream.com/Wire_Size.htm. [Zugegriffen: 02-Jan-2017].
- [25] „Aktuelle Stahlpreise pro Tonne, Stahlpreisentwicklung“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.stahlpreise.eu/>. [Zugegriffen: 10-Jan-2017].

- [26] „Kupferpreis in Euro | Kupfer | Kupferkurs | Kupferzertifikate | Zertifikate auf Kupfer“, *finanzen.net*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.finanzen.net/rohstoffe/kupferpreis/euro>. [Zugegriffen: 31-Dez-2016].
- [27] „Preismonitor November 2016 - cpl_16_11.pdf;jsessionid=29E7E322377A5B6B579B38B5A30C80CB.1_cid284“. [Online]. Verfügbar unter: http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/Preisliste/cpl_16_11.pdf;jsessionid=29E7E322377A5B6B579B38B5A30C80CB.1_cid284?__blob=publicationFile&v=2;%20Stand:%2024.01.2017. [Zugegriffen: 31-Jan-2017].