

Elektromechanische und optische Systeme für die Endoskopie

von Diplom-Ingenieur Walter Vogel

von der Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme -
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grads

Doktor der Ingenieurwissenschaften

-Dr.-Ing.-

genehmigte Dissertation

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 18.02.2011

Berlin 2011

D 83

Promotionsausschuss:

- | | |
|---|--------------------------------|
| Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Paul Uwe Thamsen | (TU Berlin) |
| 1. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Lehr | (TU Berlin) |
| 2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Henning Meyer | (TU Berlin) |
| 3. Gutachter: Dr.-Ing. Stephan Schrader | (how-to-organize GmbH, Berlin) |

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Stand der Technik.....	5
1.2	Beschreibung des Vorhabens	9
2	Grundlagen der abbildenden Optik	11
2.1	Kenngrößen der optischen Systeme	11
2.2	Bewertung optischer Systeme	13
2.2.1	Schärfentiefe.....	13
2.2.2	Abbildungsfehler	15
2.2.3	Modulationstransferfunktion (MTF)	16
3	Optische Systeme	19
3.1	Fixfokusoptik	19
3.2	Fokussierbare optische Systeme.....	23
4	Komponenten elektromagnetischer Systeme	26
4.1	Spulen.....	26
4.2	Ferromagnetische Werkstoffe	31
4.3	Analytische Betrachtung elektromagnetischer Linearantriebe	33
4.4	Numerische Untersuchungen	36
5	Magnetische Kupplung	41
5.1	Funktionsweise magnetischer Kupplungen.....	42
5.2	Auslegung und Optimierung	43
5.3	Gegenseitige Beeinflussung der magnetischen Kupplungen	49
6	Elektromagnetische Linearantriebe	52
6.1	Linearmotor mit permanentmagnetischer Selbsthaltung.....	52
6.2	Reluktanz- und Lorentzkraft- betriebener Linearantrieb	65
6.3	Linearantrieb mit zweiphasiger Spulenbestromung	70
6.4	Bistabile Linearantriebe	72
6.4.1	Bistabiler Linearantrieb mit einem Statorpolschuh.....	73
6.4.2	Linearantrieb mit zwei Statorpolschuhen.....	81
6.5	Abschätzung der weiteren Miniaturisierbarkeit	82
6.6	Toleranzanalyse.....	84
6.6.1	Toleranzanalyse eines Schrittmotors.....	84
6.6.2	Toleranzanalyse eines kontinuierlich verstellbaren Linearantriebs	85

6.6.3	Weitere Aspekte beim Aufbau von Linearaktoren.....	86
6.6.4	Betrachtung der radialen Kräfte auf den Läufer.....	90
6.6.5	Zusammenfassung der Toleranzanalyse.....	91
7	Endoskope mit einem distal angeordneten Bildaufnehmer	92
7.1	Optisches System	92
7.2	Entwickelte Videomodule	95
7.2.1	Mechanische Fokussierung	95
7.3	Montage der Baugruppen	96
7.4	Alternativer Aufbau einer Fixfokusoptik	98
8	Endoskopkamera.....	100
8.1	Aufsteckadapter für die motorische Bewegung von Linsen	103
8.1.1	Diskussion der Konzepte und Aufbau von Versuchsmustern	104
8.1.2	Weiterentwicklung des Aufsteckadapters	113
8.2	Automatisiertes C-Mount-Objektiv.....	115
8.2.1	Diskussion der Konzepte.....	115
8.2.2	Versuchsmuster	119
8.2.3	Gestaltung der Positionsrückmeldung.....	123
8.2.4	Weiterentwicklung des automatisierten Objektivs.....	124
9	Zusammenfassung und Ausblick	125
10	Symbole und Abkürzungen	128
11	Literaturverzeichnis.....	130

1 Einleitung

Optische Systeme sind in der letzten Zeit ein fester Bestandteil vieler Lebensbereiche des Menschen geworden. Angefangen bei den digitalen Kompaktkameras aus dem Konsumerbereich bis zu den lithografischen Objektiven für die Herstellung von integrierten Schaltkreisen für die Elektronik, begegnen uns optische Systeme, bzw. die mit ihrer Hilfe hergestellten Produkte überall im täglichen Leben.

Große Entwicklungen sind auch in den medizinischen Anwendungsgebieten, wie der Operationsmikroskopie und der Endoskopie, zu verzeichnen. Die endoskopischen Geräte sind in vielen Bereichen, wie der Human-, Veterinärmedizin und vielen technischen Einsatzorten zu einem Standardinstrument geworden. In der Medizin verwendet man Endoskope sowohl zu diagnostischen als auch zu operativen Zwecken.

Mit der Hilfe von Endoskopen untersucht der Arzt Körperhöhlen oder Hohlorgane, in dem ein langes dünnes Rohr meist in natürliche Körperöffnungen eingeführt wird. Das Rohr enthält optische Baugruppen, wodurch das Objektbild, z.B. die Oberfläche eines Organs, an das Ende des Schafts gelangt und von einem Arzt begutachtet wird. Besonders in der minimal-invasiven Chirurgie ist der Einsatz von Endoskopen nicht mehr wegzudenken. Dadurch wurde es möglich, auch komplizierte Operationen durch kleine Eingriffe zu ersetzen, was eine kürzere Genesungszeit des Patienten nach der Operation zur Folge hat.

Auch der Einsatz der Mikroskopie bei Operationen wurde in den letzten Jahren sehr stark weiterentwickelt, so dass sehr komplizierte Eingriffe im Bereich der Mikrochirurgie ermöglicht wurden. Auch hierbei wird das Objektbild, allerdings extrem vergrößert, zum Okular am Schaftende geleitet.

Auch in der Technik, wie z.B. bei der Qualitätskontrolle, setzt man Endoskope für die Einsicht in schwer zugängliche Bereiche ein. Schon seit Jahren werden in der Automobilindustrie Endoskope zur Untersuchung von Motoren und Motorschäden verwendet, so dass auch viele Werkstätten den Einsatz von Endoskopen praktizieren.

Ein verstärkter Einsatz der Endoskopie ist bei der Luftfahrt zu verzeichnen. Mittels endoskopischer Geräte lassen sich z. B. die Triebwerke eines Flugzeugs ohne aufwendige und kostspielige Demontage gründlich untersuchen. In diesem Technologiesektor soll immer hohe Sicherheit gewährleistet sein, so dass die Ermüdung sowie der Verschleiß der Bauteile schnell diagnostiziert werden muss. Die Endoskope erlauben dies, ohne große Demontearbeiten durchzuführen.

Eine weitere Anwendung der technischen Endoskope ist bei der Polizei und den Zollbehörden zu finden, die sie z.B. zur Durchsuchung von Fahrzeugen, Flugzeugen und Frachtgütern nutzen.

Weitere Einsatzgebiete von Endoskopen sind im Bereich der Inspektion gefährdeter Rohrleitungssysteme anzutreffen. Dies gilt zum Beispiel für Kernkraftwerke und für die chemische Industrie. Dort muss jegliche Leckage vermieden werden. Bei der Kontrolle der Rohrwände auf Risse werden sehr lange und bewegliche, schlauchähnliche Systeme mit Videokameras an

der Spitze eingesetzt, so dass sich Abzweigungen und gekrümmte Rohre akribisch untersuchen lassen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit miniaturisierten Antrieben zur Bewegung von Linsen oder Linsengruppen längs der optischen Achse. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Entwicklung völlig neuer Linearantriebe, die in bisher nicht bekannter Weise die magnetische Feldenergie von Permanentmagneten nutzen. Sie befinden sich in optischen Systemen an der Spitze von Endoskopen und bewegen dort Linsengruppen zur Einstellung der Bildschärfe und des Abbildungsmaßstabs (Zoom). Dabei reduziert der Einsatz der permanentmagnetischen Felder die aufzubringende elektrische Energie, so dass keine für den Patienten schädliche Erwärmung der Endoskopspitze auftritt.

Ein anderer Typ von Kamera befindet sich am Ende des Endoskopschafts. Bei diesen Kameras werden die Linsengruppen bisher noch manuell verfahren. Im Hinblick auf moderne OP-Techniken ist dies nicht vertretbar, so dass im Rahmen dieser Arbeit mehrere Antriebsvarianten entwickelt werden, die erstmals motorisierte Linsenbewegungen in solchen Kameras erlauben, so dass sich eine erheblich einfachere Handhabung solcher Kameras bei minimal-invasiven Eingriffen ergibt.

Allerdings ist die Entwicklung von Linsenantrieben bei kompakten Kamerasystemen ohne eingehende Kenntnis des jeweiligen Linsensystems sowie der Güte der optischen Abbildung nicht denkbar.

Demgemäß werden nach einem kurzen Überblick zum Stand der Technik Grundlagen zur optischen Abbildung erläutert sowie die Notwendigkeit zur Bildschärferegulierung bei medizinischen Endoskopen diskutiert. Dem folgen Betrachtungen zur Auslegung magnetischer Kupplungen und elektromagnetischer Linearantriebe sowie schließlich die Vorstellung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Videomodule. Das letzte Kapitel beschäftigt sich mit einer Endoskopkamera und stellt Lösungen zur motorisierten Bewegung der Linsengruppen vor.

1.1 Stand der Technik

Die endoskopischen Optiken können in erster Linie nach der Position des Bildaufnehmers in zwei große Gruppen unterteilt werden (siehe Abbildung 1-1). Zum ersten sind es die so genannten Chip-on-the-Tip-Endoskope, bei denen das gesamte Videomodul inklusive des digitalen Bildaufnehmers an der Endoskopspitze untergebracht wird. Das Bild eines Objekts wird mittels des optischen Systems auf dem Chip abgebildet und durch die entsprechende Kabeldurchführung nach hinten zu der Bildverarbeitungselektronik und dann weiter zum Monitor geführt. Die starren und flexiblen Endoskope weisen dabei keine wesentlichen Unterschiede bezüglich des optischen Systems auf.

Bei den Endoskopen mit einem proximal angeordneten Bildaufnehmer wird das mit dem Objektiv aufgenommene Bild mittels Stablinsen bei starren, bzw. durch geordnete Glasfaserbündel bei flexiblen Endoskopen, nach hinten zum Endoskopokular transportiert und durch die an die Okularmuschel angeflanschte Videokamera aufgenommen.

Beide Ausführungsformen der modernen Endoskope haben sowohl Vorteile als auch Nachteile, die im Folgenden anhand einiger charakteristischer Kriterien diskutiert werden.

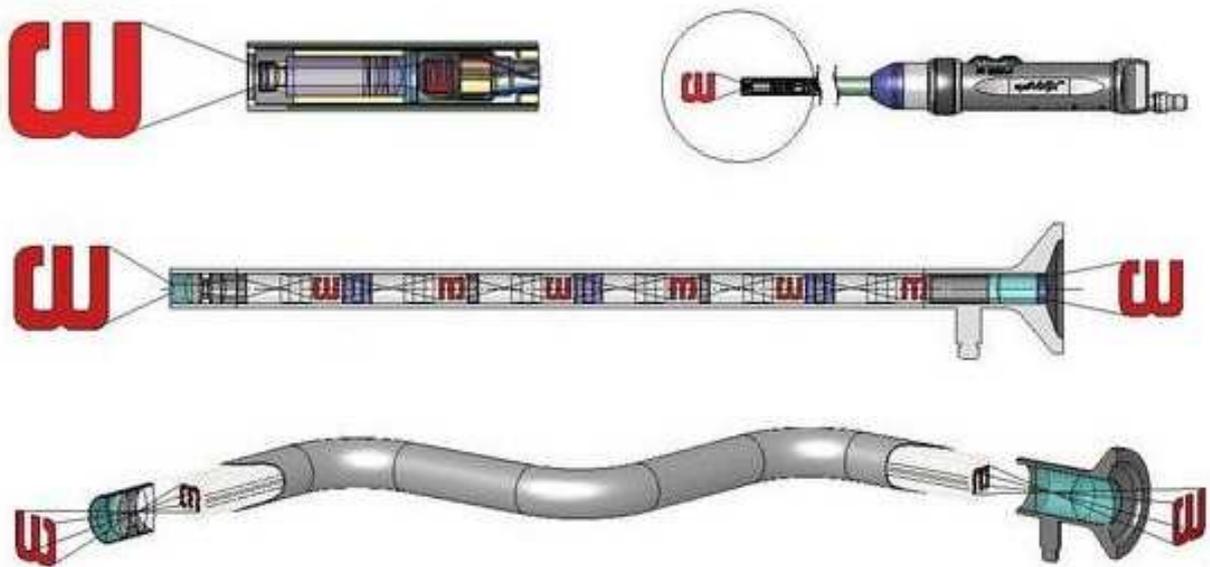


Abb. 1-1 Chip-on-the-Tip-Endoskop (oben), Stablinsenendoskop (Mitte) und flexibles Glasfaserendoskop für die Verwendung mit einer distal angeordneter Kamera (unten) [Rich10]

Betrachtet man die proximalseitigen Kameraköpfe, so können bei diesen aufgrund des zur Verfügung stehenden Bauraums größere digitale Bildaufnehmer verbaut werden, was mehrere Vorteile für die Bildqualität hat. Zum ersten lassen sich Chips mit größerer Pixelzahl verwenden, wodurch eine höhere Auflösung ermöglicht wird.

In der letzten Zeit kommen vor allem Drei-Chip-Systeme mit HD-Auflösung zum Einsatz. Weiterhin besitzen solche Bildaufnehmer größere Pixel, womit die Lichtempfindlichkeit deutlich erhöht wird, da durch die gleiche Lichtmenge mehr Elektronen pro Pixel angeregt werden.

Für die Verwendung in den Chip-on-the-Tip-Endoskopen lassen sich nur kleinere Chips nutzen. So kommen für den Einsatz in einem 10 mm-Endoskop 1/4“- bis 1/6“-Chips und für ein 5 mm-Endoskop 1/10“-Chips in Frage. Allerdings verschwindet der Vorteil der proximalseitigen Endoskopkamera bezüglich der hohen Bildqualität bei der Verwendung in Fiberskopen. Pro Glasfaser kann nur die Information eines einzigen Bildpunkts übertragen werden. Da der Durchmesser der Glasfasern meist größer ist als ein Pixel eines Bildaufnehmers und die Größe des Endoskops begrenzt ist, wird die Bildauflösung stark vermindert.

Ein sehr großer Nachteil, den die konventionellen starren Endoskope aufweisen, besteht in der Verwendung von Stablinsen. Diese erfordern einen hohen Fertigungs- und Montageaufwand. Außerdem besteht erhöhte Bruchgefahr der Stablinsen bei mechanischen Belastungen. Dies zeigt deutlich den Vorteil der Chip-on-the-Tip-Optiken, bei denen der Bildtransport über Kabel erfolgt.

Ein weiterer Vorteil der Chip-on-the-Tip-Optiken besteht in der Gestaltung der Ergonomie solcher Endoskope. Bei konventionellen Stablinsen-Endoskopen wird seitlich ein Lichtleiterkabel über einen Adapter angebracht (siehe Abbildung 1-2 oben), so dass dieser besonders bei der Rotation des Endoskops störend für den Anwender sein kann. Im Gegensatz dazu lassen sich bei den Videoendoskopen die Lichtleiterkabel am hinteren Ende des Endoskopgriffs anflanschen und parallel zum Videokabel führen (siehe Abbildung 1-2 unten).

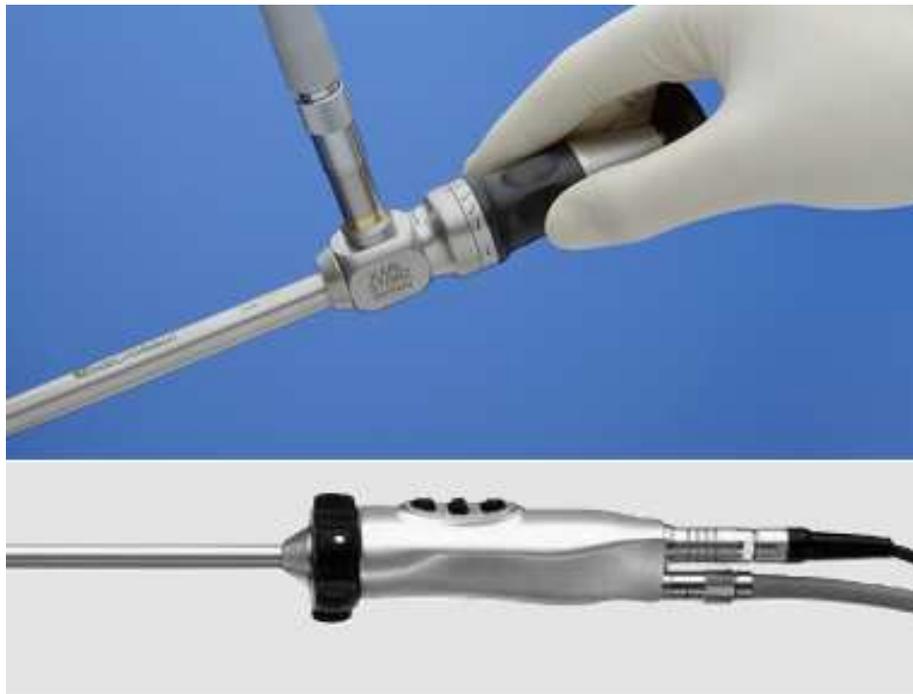


Abb. 1-2 Seitliches Lichtleiterkabel an einem Stablinsenendoskop (oben), gerade Steckverbindung an einem Videolaparoskop (unten) [Karl10]

Zu den wichtigsten Kriterien bei der Zertifizierung und Zulassung von chirurgischen Instrumenten und Geräten zählen die elektrische Sicherheit und die Autoklavierbarkeit. In Bezug auf diese Vergleichskriterien bestehen gravierende Unterschiede bezüglich der Gestaltung der Videoköpfe. Die digitalen Bildaufnehmer, die zugehörige Elektronik und die Verkabelung müssen entsprechend den Anforderungen elektrisch isoliert werden, was erhebliche Schwierigkeiten aufgrund des stark beschränkten Bauraums mit sich bringt. Bei einem konventionellen Endoskop ist dies kein Problem, da im Endoskop selbst keine elektronischen Teile verbaut werden, und man für die Kamera genügend Bauraum zum Verfügung hat, um die entsprechenden elektronischen Teile zu isolieren. Auch bezüglich der Autoklavierbarkeit weisen die proximalseitigen Kameras Vorteile auf, da diese nicht unbedingt in autoklavierbarer Ausführung gestaltet werden müssen, weil sie keinen direkten Kontakt mit dem Patienten haben und bei den Operationen in der Regel mit einem Kunststoffüberzug (Drape) überzogen werden. Sie müssen im Wesentlichen nur durch Plasma-, Gas-Exposition oder durch Einlegen in Alkohol sterilisierbar sein. Im Gegensatz dazu müssen die Chip-on-the-Tip-Videomodule sowohl die Temperaturbeständigkeit von mindestens 134 °C nachweisen, als auch dampfdicht im Endoskopschaft untergebracht werden.

Da die Videoendoskope nach jedem Gebrauch autoklaviert werden, ist es notwendig, eine entsprechende Anzahl an Endoskopen für jeden Eingriff vorrätig zu halten. Bei den konventionellen endoskopischen Systemen wird nur das eingesetzte Stablinsenendoskop autoklaviert, und die Endoskopkamera muss nicht autoklaviert werden, da diese während der Operation mit einem Drape überzogen wird. Außerdem können diese Kameras universell für eine ganze Reihe von starren und flexiblen Endoskopen sowie auch mit Operationsmikroskopen verwendet werden. Dies senkt die Kosten und erleichtert den logistischen Aufwand.

Die diskutierten Vor- und Nachteile der beiden optischen Systeme für die Anwendung in der medizinischen Laparoskopie sind nachfolgend in der Tabelle 1-1 zusammengefasst.

Vergleichskriterium	proximaler Bildaufnehmer	distaler Bildaufnehmer
Bildqualität und Lichtempfindlichkeit	Deutlich höhere Auflösung und Lichtempfindlichkeit durch die Verwendung von größeren, oft Drei-Chip-Bildaufnehmern, oft mit einer HD-Auflösung. Schlechte Auflösung beim Bildtransport mit einem Glasfaserbündel.	Bisher nur die Verwendung von kleineren Ein-Chip-Bildaufnehmern möglich.
Bruchgefahr	Hohe Bruchgefahr bei der Verwendung von Stablinsen.	Geringe Bruchgefahr, da der Bildtransport digital durch ein Kabel erfolgt.
elektrische Sicherheit	Die elektrische Sicherheit des Endoskops ist dadurch gewährleistet, dass keine elektronischen Teile verbaut werden. Die gesamte Elektronik wird in der Kamera verbaut, die sich außerhalb des menschlichen Körpers befindet. Das starre Endoskop wird durch die Okularmuschel von der Kamera elektrisch getrennt.	Sie muss durch spezielle Isolierungsmaßnahmen gewährleistet sein, da elektrische Bauteile direkt im Endoskop verbaut werden.
Autoklavierbarkeit des Bildaufnehmers und der entsprechenden Elektronik	Kein entscheidendes Kriterium, da die Kameras während der Operation mit einem Drape überzogen werden.	Sie muss wegen der Zertifizierung gewährleistet sein.
universeller Einsatz	Eine Kamera kann mit unterschiedlichen Endoskopen benutzt werden.	Der Kamerakopf ist im Endoskop fest verbaut.
Beeinflussung der Ergonomie durch das Lichtleiterkabel	Das Lichtleiterkabel wird seitlich vom Endoskop geführt, wodurch Einschränkungen, besonders bei der Drehung des Endoskops auftreten können.	Das Lichtleiterkabel wird parallel zum Kamerakabel geführt.
Fertigungs- und Montageaufwand bezüglich des Bildweiterleitungssystems	Die Herstellung und die Justage der Stablinsen für die starren Endoskope sowie die Sortierung der Glasfasern bei den flexiblen Endoskopen erfordern einen hohen Aufwand.	Die Bildweiterleitung erfolgt durch ein Kabelsystem, das sich leichter in ein Endoskop integrieren lässt.

Tabelle 1-1 Vergleich der Endoskope mit distalen und proximalen Bildaufnehmern

1.2 Beschreibung des Vorhabens

Das wesentliche Ziel dieser Arbeit besteht darin, anhand praktischer Beispiele Wege aufzuzeigen, wie die Ausstattung der Videokameras mit Aktoren zur Automatisierung der Fokus- und Zoomfunktionen erfolgen kann. Es stellt sich die Frage, wann und warum diese Automatisierung der Kameras im medizinischen Bereich notwendig ist. Im Folgenden werden einige Beispiele gezeigt, bei denen die Motorisierung erhebliche Vorteile bringt und auch vom medizinischen Personal erwünscht ist.

Die motorisierte Bewegung einer Fokuslinsengruppe ermöglicht beispielsweise den Einsatz von Autofokussystemen, wodurch das Bild immer automatisch scharf gestellt wird, oder die Brennweite verändert wird, um das Bild zu vergrößern oder zu verkleinern.

Die Scharfeinstellung des Bildes oder dessen Vergrößerung (Zoom) sind auch heute schon üblich. Allerdings müssen dies der Operateur oder eine Assistenz umständlich z.B. mittels kleiner Rädchen manuell durchführen, so dass die Hände für den eigentlichen Eingriff nicht zur Verfügung stehen. Dagegen erlaubt die Motorisierung der Videoköpfe den Einsatz neuartiger Mensch-Maschine-Systeme, wie z.B. Eye-Tracking, Sprach- oder Gestensteuerung. Dies ist in letzter Zeit Gegenstand der Entwicklung bei vielen führenden Medizintechnikherstellern.

Weitere Vorteile weist die Motorisierung der Kameramodule dann auf, wenn diese vom Bediener räumlich getrennt sind. Dies ist der Fall, wenn die Endoskope nicht vom Assistenzarzt, der die Kamera bedient, sondern von einer passiven Führungseinrichtung gehalten wird. Auch die Verwendung von Videokameras in Kombination mit Operationsmikroskopen lässt sich durch die Automatisierung deutlich ergonomischer gestalten (siehe Abbildung 1-3).



Abb. 1-3 Anwendung von Videokameras mit Operationsmikroskopen. QUINTUS TV-Adapter mit H3-M Kamera, installiert an einem Vario-Operationsmikroskop von Carl Zeiss Meditec (rechts) und VITOM® 25-Optik mit H3-Z-Kamerakopf am pneumatischen Haltesystem POINT SETTER (links) [Karl10]

Aber auch in dem Fall, wenn die Kamera von einem Assistenzarzt gehalten wird, bringt die Automatisierung erhebliche Vorteile, wie beispielweise die Einhandbedienung bei der Fokussierung oder die Verstellung der Brennweite, was eine Steigerung der Ergonomie ermöglicht. Nicht zu unterschätzen sind weiterhin die Marketingvorteile bei der Automatisierung der medizintechnischen Objektivs. Eine ausführliche Recherche der Produktkataloge vieler großer Hersteller bildgebender Systeme im medizinischen Bereich hat gezeigt, dass zum heutigen Zeitpunkt keine motorisierten Videokameras auf dem Markt zu finden sind (eine Ausnahme stellen einige wenige Modelle von Operationsmikroskopen dar). Das Anbieten einer vollautomatischen Endoskop-, bzw. Mikroskopkamera auf dem Markt, trägt dazu bei, diese deutlich von den Konkurrenzprodukten hervorzuheben.

Die Entwicklung der neuen optischen Systeme für endoskopische Zwecke und deren Ausstattung mit mechatronischen Komponenten erfolgt nach der Klassifikation, die im vorherigen Kapitel gemäß der Position des Bildaufnehmers eingeführt wurde.

Zur Automatisierung einer proximalseitigen Videokamera in Verbindung mit starren Stablin-senendoskopen wurden im Rahmen dieser Arbeit folgende Innovationen entwickelt:

- Aufbau eines Videoobjektivs, das über einen C-Mount-Adapter mit einem digitalen Bild-nehmer verbunden wird
- Aufbau eines Adapters mit Aktoren, welche die manuell verstellbaren Drehrädchen bisheriger Videokameras

Betrachtet man die Endoskope mit der Chip-on-the-Tip-Ausführung, so sind dabei folgende Möglichkeiten der motorischen Linsenverstellung möglich:

- Die beweglichen Linsensysteme des Videokopfs werden durch Zugdrähte mit den Aktoren, die sich im Endoskopgriff befinden, verbunden und von dort motorisiert bewegt. Dabei ist zu beachten, dass dies nur bei starren Endoskopen angewendet werden kann. Bei den flexiblen Endoskopen ist eine mechanische Verbindung der in der Endoskopspitze zu bewegenden Linsen mit den Aktoren im Endoskopgriff nur mit einem erheblichen Aufwand realisierbar.
- Die für die Verstellung der Linsen benötigten Aktoren werden zusammen mit dem optischen System an der Endoskopspitze verbaut. Dabei sind hohlzylindrische Aktoren rund um das optische System angeordnet, so dass sich die Linsenfassung der beweglichen Linsengruppe gleich im Läufer des Aktors befindet. Diese Art der Aktoren lässt sich sowohl für die starren, als auch für die flexiblen Endoskope verwenden.

Im Verlauf dieser Arbeit werden spezielle Videoobjektive für den Einbau an der Endoskopspitze entwickelt und aufgebaut. Es werden sowohl die Fixfokusoptiken, als auch optische Systeme mit beweglicher Linsengruppe zum Nachfokussieren betrachtet. Dabei werden die Vor- und Nachteile der jeweiligen Systeme diskutiert. Als Vergleichskriterien dienen die Schärfentiefe und die Lichtstärke der Objektivs.

Bei der Erarbeitung der neuen Konzepte und der Entwicklung der Prototypen wird unter anderem die Tauglichkeit der Konstruktionen im Bezug auf die spätere medizinische Zulassung und deren Serienproduktion betrachtet.

2 Grundlagen der abbildenden Optik

2.1 Kenngrößen der optischen Systeme

Bündelbegrenzung

Bei abbildenden optischen Systemen unterscheidet man zwei Arten der Bündelbegrenzung. Die in das optische System eintretenden Lichtbündel werden durch eine mechanische Blende begrenzt, sie wird auch als Apertur- oder Öffnungsblende bezeichnet (siehe Abbildung 2-1). Die Aperturblende schränkt den objektseitigen Öffnungswinkel u der Lichtstrahlen, die von einem Objektpunkt ausgehen ein und bestimmt damit die Helligkeit des Bildes. Die Feldblende bestimmt die maximale Größe des Objekts, die auf dem Bildaufnehmer abgebildet wird und begrenzt damit den objektseitigen Feldwinkel w (auch als Sichtwinkel bezeichnet).

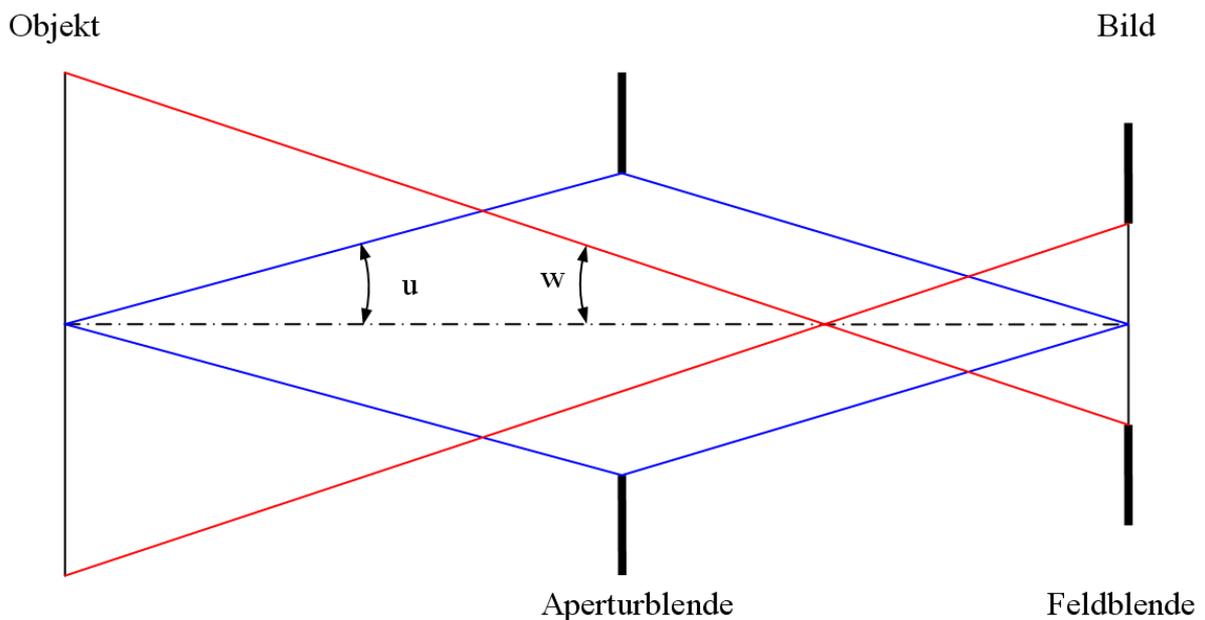


Abb. 2-1 Bündelbegrenzung durch die Apertur- und Feldblende

Genauso wie alle anderen Objekte werden auch die Blenden durch das optische System abgebildet. Die objektseitige Abbildung der Aperturblende wird als Eintrittspupille (EP) genannt. Die bildseitige Abbildung der Öffnungsblende bezeichnet man als Austrittspupille (AP) (siehe Abbildung 2-2). Sie wird durch die Linsen, die sich zwischen der physikalischen Blende und dem Bildaufnehmer befinden, abgebildet. Analog dazu werden die Abbildungen der Feldblende definiert. Sie bezeichnet man als Ein- und Austrittsluke.

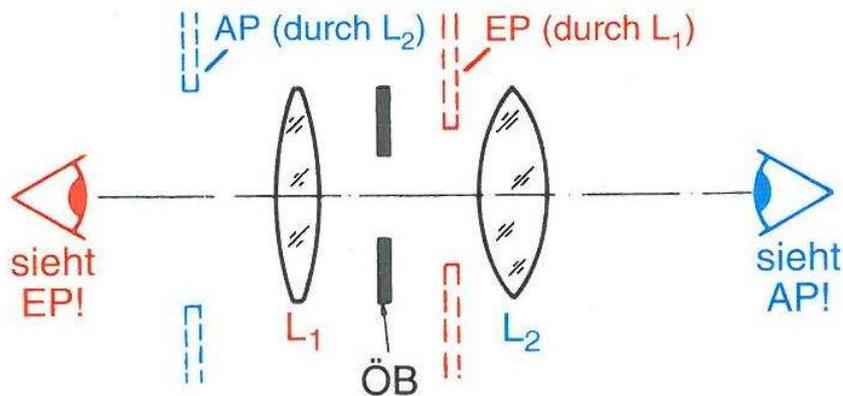


Abb. 2-2 Abbildungen der Öffnungsblende durch das optische System

Brennweite

Die Bildgröße ist durch den Kamerasensor vorgegeben. Die Bilddiagonale solcher Systeme liegt dabei im Bereich von 1,8 bis 6,0 mm (dies entspricht der Chipgröße von 1/10“ bis 1/3“). Auch der Feldwinkel w ist meistens durch die Anwendung festgelegt und somit schon am Anfang der Auslegung eines optischen Systems fixiert. Er liegt im Bereich von 40° bis 120° . Erfolgte die Auswahl des Bildaufnehmers durch die Festlegung des gewünschten Feldwinkels w , kann aufgrund dieser Vorgaben die Brennweite f' des zu entwickelten Systems aus der Gleichung (2-1) berechnet werden.

$$f' = \frac{y'}{\tan w} \quad (2-1)$$

Dabei ist y' die halbe Bilddiagonale und w der halbe Feldwinkel.

Blendenzahl

Entscheidend für die Lichtstärke des Objektivs ist die Blendenzahl k , die durch den Durchmesser der Eintrittspupille (objektseitige Abbildung der Aperturblende) d_{EP} und die bereits festgelegte Brennweite f' ermittelt wird.

$$k = \frac{f'}{d_{EP}} \quad (2-2)$$

Wird die Eintrittspupille d_{EP} verringert, steigt die Blendenzahl und damit auch die Schärfentiefe der Optik, die geometrischen Abbildungsfehler werden reduziert. Allerdings erhöht sich der Einfluss der Beugung, und es vermindert sich die Lichtstärke des Objektivs. Aufgrund dieser großen Bedeutung der Blendenzahl für die Leistungsfähigkeit des optischen Systems, ist man bestrebt, die Möglichkeit zu schaffen, diese im laufenden Betrieb zu verändern (z.B. Irisblenden bei hochwertigen fotografischen Objektiven). Aufgrund des stark beschränkten Bauraums ist dies jedoch beim Aufbau der endoskopischen Chip-on-the-Tip-Optiken nicht möglich.

2.2 Bewertung optischer Systeme

Bei der Auslegung eines optischen Systems oder im konkreten Fall des Objektivs einer Kamera, ist man bestrebt, einen Objektpunkt möglichst genau abzubilden. Abbildungsfehler, Fertigungstoleranzen und die Wellennatur des Lichts führen dazu, dass das von einem Objektpunkt stammende Licht immer auf eine Fläche in der Bildebene verteilt ist. Die Lichtverteilung innerhalb dieser Kreisfläche ist nicht konstant, die Lichtintensität nimmt meist von innen nach außen ab. Auch die Form dieses Scheibchens ist in den meisten Fällen nicht kreisförmig. Durch die Betrachtung der Größe und Form dieser Bildpunkte lässt sich daher eine Aussage über die Leistungsfähigkeit eines Objektivs machen.

2.2.1 Schärfentiefe

Die Schärfentiefe stellt ein entscheidendes Kriterium bei der Bewertung von Objektiven dar. Bei der Betrachtung von räumlich ausgedehnten Objekten ist es erwünscht, nicht nur die Objektelemente, die in einer Ebene liegen, sondern einen möglichst großer Objektbereich scharf abzubilden. Besonders wichtig ist die Betrachtung der Schärfentiefe für die Fixfokussysteme, da diese im Betrieb nicht mehr verändert werden kann.

Die Schärfentiefe beruht auf dem begrenzten Auflösungsvermögen der digitalen Bildaufnehmer, bzw. des menschlichen Auges. Das führt dazu, dass ein Objektpunkt nicht zwingend als idealer Bildpunkt abgebildet werden muss (z.B. Abbildung 2-3 oben) um als scharf abgebildet zu gelten.

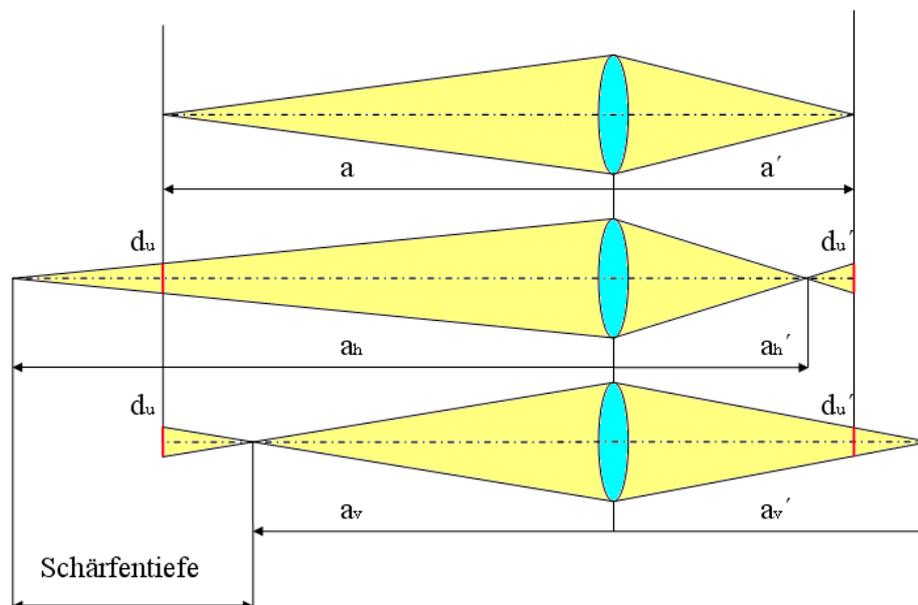


Abb. 2-3 Graphische Darstellung des Bereichs der Schärfentiefen eines optischen Systems

Wird ein zulässiger Unschärfedurchmesser d_u definiert, so können der minimale Objektstand a_v , der maximale Objektstand a_h und der gesamte Schärfentiefebereich nach den Gleichungen (2-3) bis (2-5) berechnet werden [Schr07]:

$$a_v = \frac{a \cdot f'^2}{f'^2 - d'_u \cdot k \cdot (a + f')} \quad (2-3)$$

$$a_h = \frac{a \cdot f'^2}{f'^2 + d'_u \cdot k \cdot (a + f')} \quad (2-4)$$

$$a_{\text{ges}} = a_v - a_h \quad (2-5)$$

Hierbei bezeichnen a_v , a_h und a_{ges} den Bereich der Schärfentiefe (vgl. Abbildung 2-1).

Die Schärfentiefe eines Objektivs lässt sich im Wesentlichen durch die Brennweite und die Blendenzahl beeinflussen. In der Abbildung 2-4 sind die Verläufe der auf Eins normierten Schärfentiefe in Abhängigkeit von der Blendenzahl (unten) und der Brennweite (oben) dargestellt.

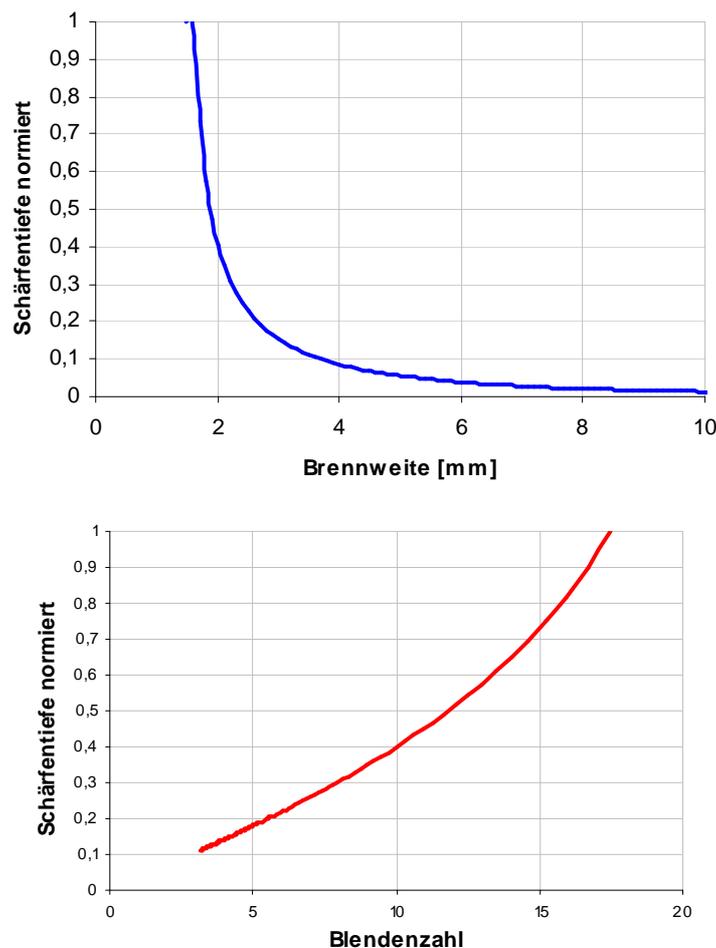


Abb. 2-4 Qualitativer Verlauf der Schärfentiefe in Abhängigkeit von der Brennweite (oben) und der Blendenzahl (unten)

Wie der Abbildung 2-4 (oben) zu entnehmen ist, vergrößert sich der Bereich der Schärfentiefe durch die Verkleinerung der Brennweite des Objektivs, die Blendenzahl beträgt in diesem Fall 7,5. Wobei bei einem vorgegebenen Feldwinkel (was meist auch der Fall ist) die Brennweite nur durch die Auswahl des Bildaufnehmers veränderbar ist. Die Bilddiagonale kann dabei, besonders im Bezug auf die Videomodule an der Endoskopspitze, nur diskrete Werte, wie ca. 4,5 mm (1/4“ Chip), 3,0 mm (1/6“ Chip), bzw. 1,8 mm (1/10“ Chip) annehmen. Die Verkleinerung der Brennweite (durch die Bildgröße) führt dabei jedoch nicht zwingend zu einer erhöhten Schärfentiefe, da sich der zulässige Unschärfedurchmesser wegen der kleineren Pixelgröße vermindert werden muss.

Eine effektivere Möglichkeit, die Schärfentiefe zu beeinflussen, besteht in der Veränderung der Blendenzahl k , was durch das Schließen, bzw. Öffnen der Blende erfolgt, siehe Formel (2-2). Wie man der Abbildung 2-2 (unten) entnehmen kann, steigt die Schärfentiefe mit der Blendenzahl, die durch Verringerung des Durchmessers der Aperturblende erfolgt, wobei die Brennweite konstant ist und 3,5 mm beträgt. Ein negativer Effekt ist dabei die Reduzierung der Lichtstärke der Optik, da die zu der Bildebene gelangende Lichtmenge I umgekehrt proportional zum Quadrat der Blendenzahl verhält.

$$I \propto \frac{1}{k^2} \quad (2-6)$$

Zu beachten ist, dass die analytische Betrachtung der Schärfentiefe anhand der Formeln (2-3) bis (2-5) auf den Annahmen der paraxialen Optik basiert, die eher eine qualitative Betrachtung und Machbarkeitsabschätzung erlaubt. Für die quantitative Betrachtung des Schärfentiefenbereichs ist es notwendig, die genauen (mittels Strahlverfolgung berechneten) Werte des Unschärfedurchmessers bei der Variation der Objektschnittweite zu ermitteln.

2.2.2 **Abbildungsfehler**

Optische Systeme haben die Aufgabe, ein Objekt möglichst fehlerfrei abzubilden. Dabei soll ein Objektpunkt zu einem scharfen Bildpunkt überführt werden. Aufgrund der Abbildungsfehler ist eine absolut scharfe Abbildung nicht möglich. Bei der Auslegung von optischen Systemen ist man daher bestrebt, diese Fehler so gering wie möglich zu halten.

Die Abbildungsfehler lassen sich in vier Gruppen unterteilen:

1. Bildschärfefehler (sphärische Abberation, Astigmatismus, Bildfeldwölbung, Koma)
2. Bildmaßstabfehler (Verzeichnung)
3. Farbfehler (chromatische Aberration)
4. Bildbeleuchtungsfehler (Vignettierung, Streulicht und Reflektionen)

Aberration	Apertur	Feldwinkel
sphärische Aberration	d_{EP}^3	---
Koma	d_{EP}^2	w
Bildfeldwölbung	d_{EP}	w^2
Astigmatismus	d_{EP}	w^2
Verzeichnung	---	w^3
chromatische Längsaberration	---	---
chromatische Queraberration	---	w

Tabelle 2-1 Abhängigkeiten der Aberrationen von Apertur und Feldwinkel [Litf97]

Die Abbildungsfehler sind in hohem Maße vom Durchmesser der Eintrittspupille sowie von der Größe des Feldwinkels abhängig. Dies ist in der Tabelle 2-1 zusammengefasst.

Bei der Entwicklung von endoskopischen Optiken sind für eine gute Übersicht des zu operierenden Bereichs große Feldwinkel von 70° bis 120° erforderlich, so dass der dominierende Fehler bei diesen Optiken meist durch die Bildverzeichnung zustande kommt.

2.2.3 Modulationstransferfunktion (MTF)

Für eine ausführliche Bewertung eines optischen Systems reicht es nicht, nur die einzelnen Abbildungsfehler zu betrachten. Um die Leistungsfähigkeit einer Optik ausreichend zu beschreiben, ist die Betrachtung der Modulationstransferfunktion von Bedeutung. Eine gute Abbildungsqualität zeichnet sich dadurch aus, dass einzelne feine Strukturen nicht nur getrennt von einander (Auflösung), sondern auch mit einem ausreichenden Unterschied zwischen hell und dunkel (Kontrast) wiedergegeben werden.

Der Kontrast eines Bilds wird über die Modulation M gemäß (2-7) definiert.

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2-7)$$

Wobei I_{\max} und I_{\min} die maximalen, bzw. minimalen, im Bild vorkommenden Intensitäten sind. Eine Modulation von $M = 1$ bedeutet maximalen Kontrast, $M = 0$ bedeutet keinen Kontrast. Wird ein Objekt mit der Modulation M_O durch ein optisches System abgebildet, so erhält man dessen Bild mit der Modulation M_B . Aufgrund der Abbildungsfehler und der Beugung verringert sich der Kontrast des Bilds, so dass $M_B < M_O$ gilt. Die Kontrastminderung bedeutet eine Umverteilung des Lichts, so dass das Licht von den hellen auf die dunkleren Bereichen gelangt.

Die Modulationstransferfunktion wird durch das Verhältnis von Bildkontrast $M_B(v)$ und Objektkontrast $M_O(v)$ in Abhängigkeit von der Ortsfrequenz v dargestellt. Dabei bezeichnet die Ortsfrequenz die Zahl periodischer Erscheinungen, bezogen auf ihren Abstand. Sie wird häufig in Linien pro Millimeter angegeben [Gros05].

$$\text{MTF}(v) = \frac{M_B(v)}{M_O(v)} \quad (2-8)$$

Die maximal erreichbare Ortsfrequenz ist durch die Lichtbeugung begrenzt. Jedes optische System mit Aperturblende führt zu Beugungserscheinungen, so dass ein idealer Objektpunkt durch das optische System als Beugungsmuster (das Airy-Scheibchen) abgebildet wird. Der Durchmesser des Airy-Scheibchens kann wie folgt berechnet werden [Gros05]:

$$d_{\text{Airy}} = 2,44 \cdot \frac{f'}{d_{\text{EP}}} \cdot \lambda \quad (2-9)$$

Gemäß der Gleichung (2-2) ergibt sich

$$d_{\text{Airy}} = 2,44 \cdot k \cdot \lambda \quad (2-10)$$

Hierin ist λ die Wellenlänge des Lichts, f' die Brennweite, d_{EP} der Durchmesser der Eintrittspupille und k die Blendenzahl.

Die maximal auflösbare bildseitige Ortsfrequenz v_{max} als Anzahl der nebeneinander abgebildeten Punkte (oder meist Linienpaare) pro Längeneinheit kann gemäß dem Rayleigh-Kriterium [Gros05] wie folgt berechnet werden:

$$v_{\text{max}} = \frac{2}{d_{\text{Airy}}} \quad (2-11)$$

Fasst man die Gleichungen (2-10) bis (2-12) zusammen, so ergibt sich:

$$v_{\text{max}} = \frac{d_{\text{EP}}}{1,22 \cdot f' \cdot \lambda} \quad (2-12)$$

bzw.

$$v_{\text{max}} = \frac{1}{1,22 \cdot k \cdot \lambda} \quad (2-13)$$

Der Verlauf der MTF als Funktion der Ortsfrequenz eines aberrationsfreien beugungsbegrenzten optischen Systems kann nach der Gleichung (2-14) analytisch beschrieben werden [Pedr96].

$$\text{MTF}_{\text{OS}} = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\arccos \frac{v}{v_{\text{max}}} - \frac{v}{v_{\text{max}}} \sqrt{1 - \left(\frac{v}{v_{\text{max}}} \right)^2} \right] \quad (2-14)$$

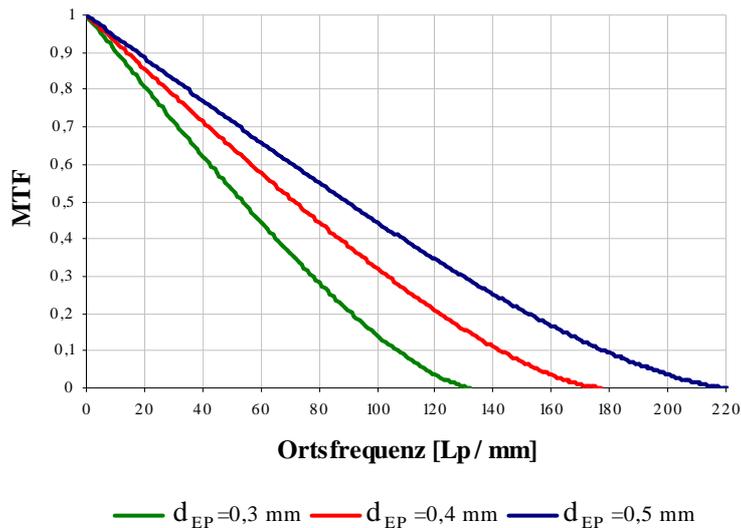


Abb. 2-5 MTF-Verläufe eines beugungsbegrenzten optischen Systems in Abhängigkeit vom Durchmesser der Eintrittspupille

In der Abbildung 2-5 ist die Beugungsbegrenzung der MTF-Verläufe eines optischen Systems mit einem 1/6“-Bildaufnehmer und dem halben Feldwinkel von 35° in Abhängigkeit von der Apertur dargestellt. Die Verringerung des Blendendurchmessers d_{EP} und damit die Erhöhung der Blendenzahl führt aufgrund der Beugung zur Absenkung der MTF-Kurven. Es ist dabei zu beachten, dass diese Betrachtung der MTF eine ideale, fehlerfreie und nur beugungsbegrenzte Punktabbildung voraussetzt. Die optischen Abbildungsfehler verringern weiterhin das Auflösungsvermögen einer Optik. Bei der Auslegung optischer Systeme stellt diese MTF daher die bestmögliche erreichbare Qualität dar.

Die bisherige Betrachtung der MTF bezog sich nur auf einen einzigen Bildpunkt. Da aber die Bildpunkte häufig nicht rotationssymmetrisch angeordnet sind, ist es notwendig, für einen Bildpunkt zwei MTF-Kurven, die sagittale und die meridionale zu betrachten. Die sagittale MTF wird durch die Verwendung der Streifenmuster, die radial zur optischen Achse zeigen, aufgenommen oder berechnet. Bei der meridionalen MTF stehen die Streifenmuster senkrecht zu den sagittalen.

Die Abbildungsqualität eines Objektivs ist über das Bild oft nicht konstant und korreliert mit dem Feldwinkel. Die Abbildungsqualität fällt dann von der Bildmitte zum Bildrand ab. Dadurch ist es notwendig, die MTF-Verläufe für unterschiedliche Feldwinkel zu betrachten.

In den meisten Fällen genügt es nicht, nur das Übertragungsverhalten der Optik zu berücksichtigen, da das Zusammenspiel der Optik (OS), des Bildaufnehmers (BA) und der Bildverarbeitung (BV) die Bildqualität bestimmt, die ein Beobachter wahrnimmt. Damit ergibt sich die Modulationstransferfunktion des gesamten Systems aus dem Produkt der Modulationstransferfunktionen der einzelnen Subsysteme:

$$MTF_{ges} = MTF_{OS} \cdot MTF_{BA} \cdot MTF_{BV} \quad (2-15)$$

3 Optische Systeme

3.1 Fixfokusoptik

Bei der Entwicklung von Videolaraskopen mit einem Durchmesser von 10 mm sind von Beginn an einige Randbedingungen fest vorgegeben. Zum ersten liegt der realisierbare Sichtwinkel bei 70° , der aus dem Bereich der starren Stablinseenendoskope übernommen wurde. Bei der Auswahl des Bildaufnehmers stehen $1/4''$ - und $1/6''$ -CCD-Chips zur Verfügung. Durch die Festlegung des Feldwinkels und der Bilddiagonalen steht die Brennweite des Objektivs fest. Bei der Auslegung solcher Systeme ist man bestrebt, die größt mögliche Schärfentiefe zu realisieren, wobei dies im Bereich der Laparoskopie für die Objektabstände zwischen 20 mm und 200 mm gilt, da dies ungefähr dem Arbeitsbereich bei laparoskopischen Eingriffen entspricht.

In der Abbildung 3-1 ist ein mögliches optisches System zur Verwendung in einem Videolaraskop mit einem $1/6''$ -Bildaufnehmer dargestellt. Wie man der Abbildung entnehmen kann, besteht das optische System aus drei Linsengruppen: einer plankonkaven und einer plankonvexen Linse sowie einem Achromaten. Jede der drei Linsengruppen weist mindestens eine Planfläche auf, was das Schleifen und Polieren der Linsen stark vereinfacht und auch eine leichtere Justage der Linsen im Objektiv ermöglicht.

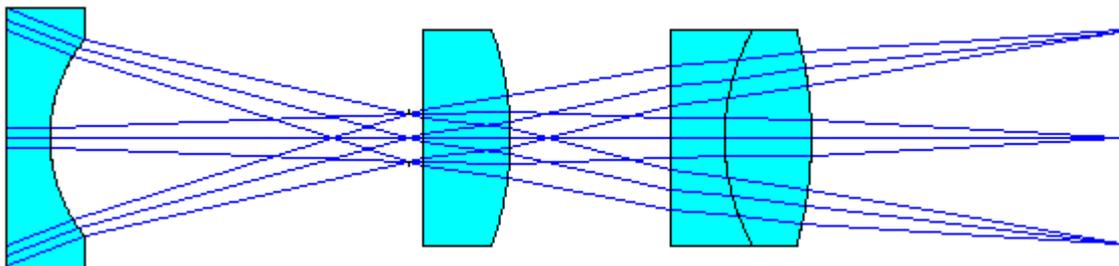


Abb. 3-1 Fixfokusobjektiv mit einem $1/6''$ Bildaufnehmer

Um die Güte eines optischen Systems zu beurteilen, führt man Strahlverfolgungsrechnungen (raytracing) der von einem Objektpunkt ausgehenden Lichtstrahlen durch, die aufgrund von Abbildungsfehlern auf der Bildseite als Lichtfleck (Spot) erscheinen.

In der Abbildung 3-2 ist der Verlauf der Spotradien eines Fixfokussystems mit dem Eintrittspupillendurchmesser von 0,30 mm als Funktion des Objektabstands für halbe Feldwinkel w von 0° , $24,75^\circ$ und 35° dargestellt.

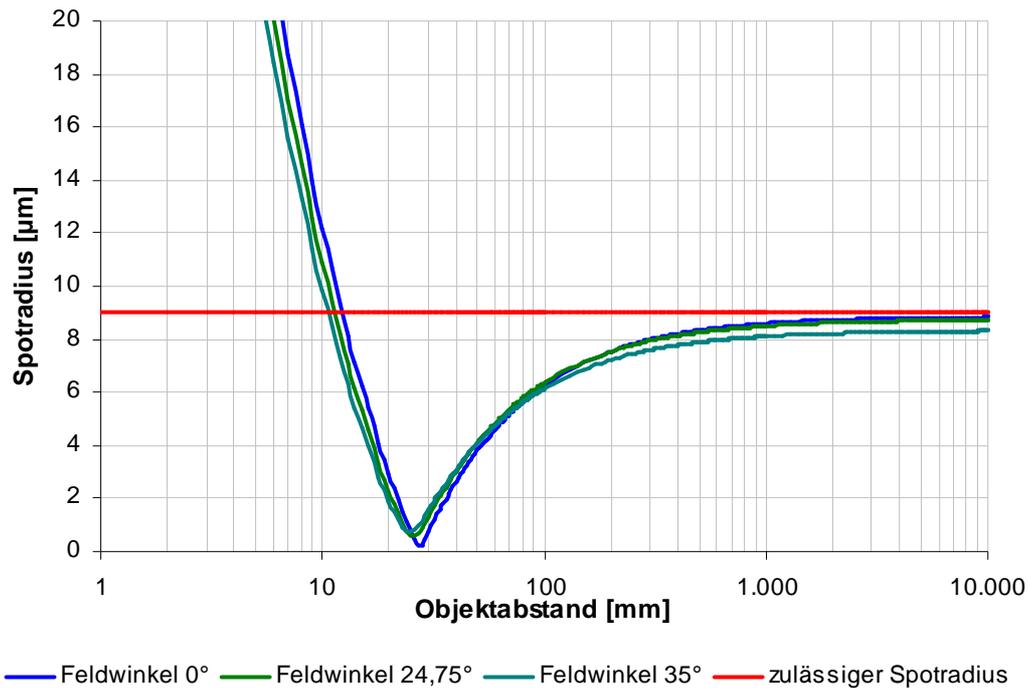


Abb. 3-2 Verlauf der Spotgröße eines Fixfokusobjektivs in Abhängigkeit vom Objektabstand für drei Feldwinkel

Der nominelle Objektabstand, für den die Optik optimiert wurde, beträgt 25 mm. Der Verlauf der Kurven zeigt, dass für die Objekte, die näher als der nominelle Abstand liegen, sehr schnell größere Spots auftreten. Bei größerer Entfernung des Objekts nähern sich die Kurven asymptotisch einem Grenzwert. Das bedeutet, dass vor allem im Nahbereich eine Nachfokussierung erhebliche Vorteile bringt. Der Schärfentiefebereich wird durch einen Spotradius von 9 µm definiert. Dies entspricht der doppelten Größe der Pixeldiagonale des verwendeten 1/6“-CCD-Chips. Dies erscheint als willkürliche Festlegung. Jedoch hat sich diese Definition in der Praxis als nützlich erwiesen.

Bei vorgegebenem Feldwinkel und fester Brennweite stellt die Variation des Eintrittspupillendurchmessers die einzige Möglichkeit dar, die Schärfentiefe des Fixfokusobjektivs zu verändern. In der Abbildung 3-3 sind die Kurven der Spotradien des gleichen Objektivs für unterschiedlichen Durchmesser der Eintrittspupille dargestellt, wobei in diesem Fall, um die Verläufe übersichtlicher zu gestalten, der Mittelwert der Spotgröße von drei Feldwinkeln betrachtet wird.

Wie man der Abbildung 3-3 entnehmen kann, bewirkt die Verringerung des Eintrittspupillendurchmessers eine Vergrößerung des Schärfentiefebereichs. Dabei vergrößert sich der Bereich der Schärfentiefe sowohl im Nahfeld als auch im Fernfeld. Bei der Pupille von $d_{EP} = 0,25$ mm nähert sich der Spotradius im Fernfeld dem Wert 6,9 µm und überschreitet den Wert des zulässigen Spotradius nicht, was nur bedingt Vorteile mit sich bringt, da der Arbeitsbereich bei laparoskopischen Einsätzen eher auf maximal 200 mm beschränkt ist.

Damit ist es sinnvoller, bei der Optimierung der Schärfentiefe den nominellen Objektstand nach vorn zu verschieben, so dass der Verlauf des Spotradius den von der Pixelgröße des Chips bestimmten Radius beim Objektstand von 200 mm schneidet und das Nahfeld weiter ausgedehnt werden kann. Der Versatz der Minima der Schärfentiefe für die Systeme mit unterschiedlichen Durchmessern der Eintrittspupille ergibt sich durch die Mittelung der Werte für die drei berechneten Feldwinkel.

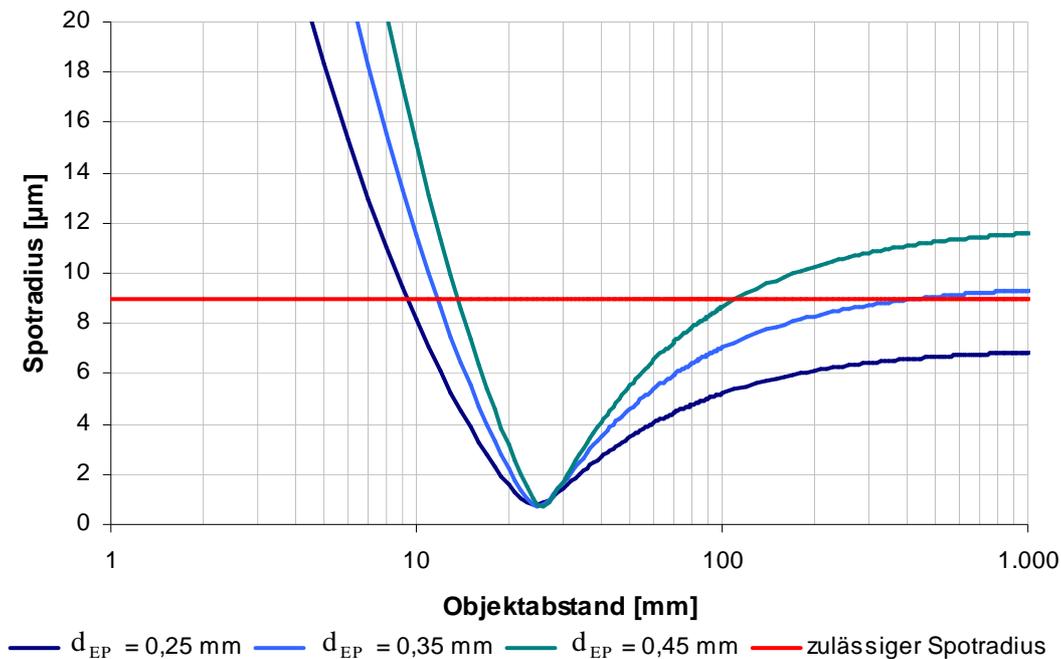


Abb. 3-3 Verlauf der Spotradien in Abhängigkeit vom Durchmesser der Eintrittspupille bei gleichem Objektstand

In der Abbildung 3-4 ist der Verlauf der Spotradien in Abhängigkeit vom Durchmesser der Eintrittspupille dargestellt, dabei wird der Wert des nominellen Objektstands möglichst weit nach vorn verschoben. Das Fernfeld dieser Optiken ist auf 200 mm begrenzt, die Verringerung der Eintrittspupille von 0,45 mm auf 0,25 mm bewirkt die Erweiterung der Schärfentiefe im Nahfeld von 16 mm auf 7 mm. Allerdings wird dadurch die Optik um den Faktor 3,24 lichtschwächer.

Wie man den in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnissen entnehmen kann, stößt die Gütesteigerung einer Fixfokusoptik sehr schnell auf eine physikalische Grenze. Die Erweiterung der Optik durch eine bewegliche Linsengruppe, wodurch das Nachfokussieren ermöglicht wird, stellt dagegen eine Option dar, die Schärfentiefe stark zu erhöhen.

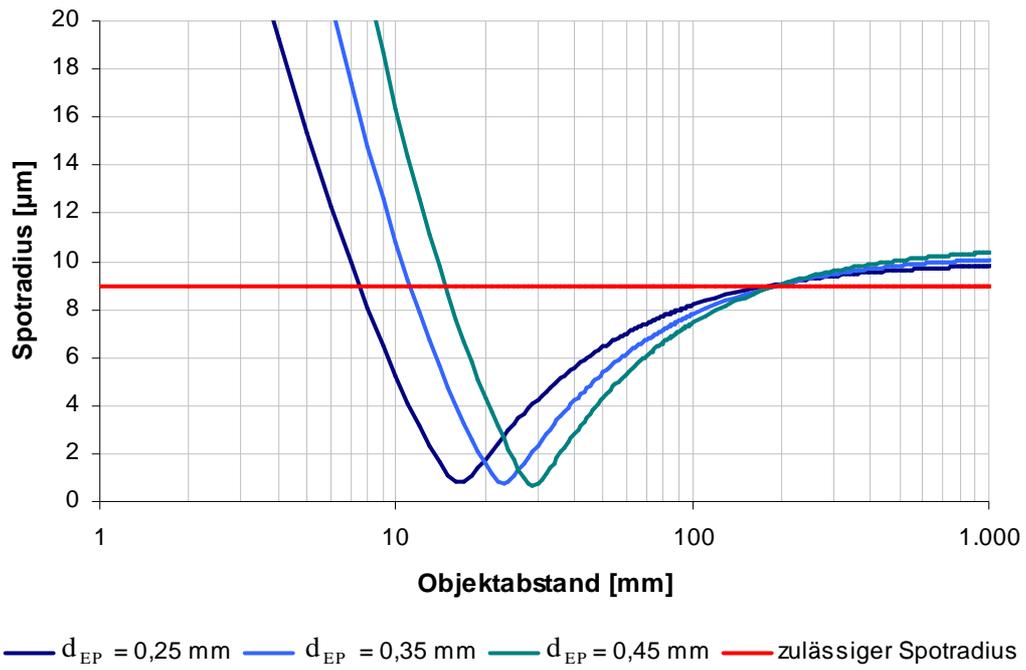


Abb. 3-4 Verlauf der Spotradien in Abhängigkeit vom Durchmesser der Eintrittspupille bei variabler Objektabstand

3.2 Fokussierbare optische Systeme

Der Aufbau einer fokussierbaren Linsenordnung erfolgt auf der Basis der in der Abbildung 3-1 vorgestellten Optik. Zum Nachfokussieren wird der Achromat, der sich zwischen der festen Linsengruppe und dem Bildaufnehmer befindet, axial verschoben. Die einfachste Möglichkeit zum Nachfokussieren besteht im Aufbau einer Zweistellungsoptik. Dabei kann der Fokusachromat nur zwei diskrete Positionen, für das Nahfeld und das Fernfeld, annehmen. Die Bewegung der Linsengruppe kann in diesem Fall mit Hilfe eines bistabilen Linearantriebs realisiert werden (s. Kapitel 6.3). In der Abbildung 3-5 ist der Verlauf der Spotradien eines Zweistellungsfokussystems dargestellt.

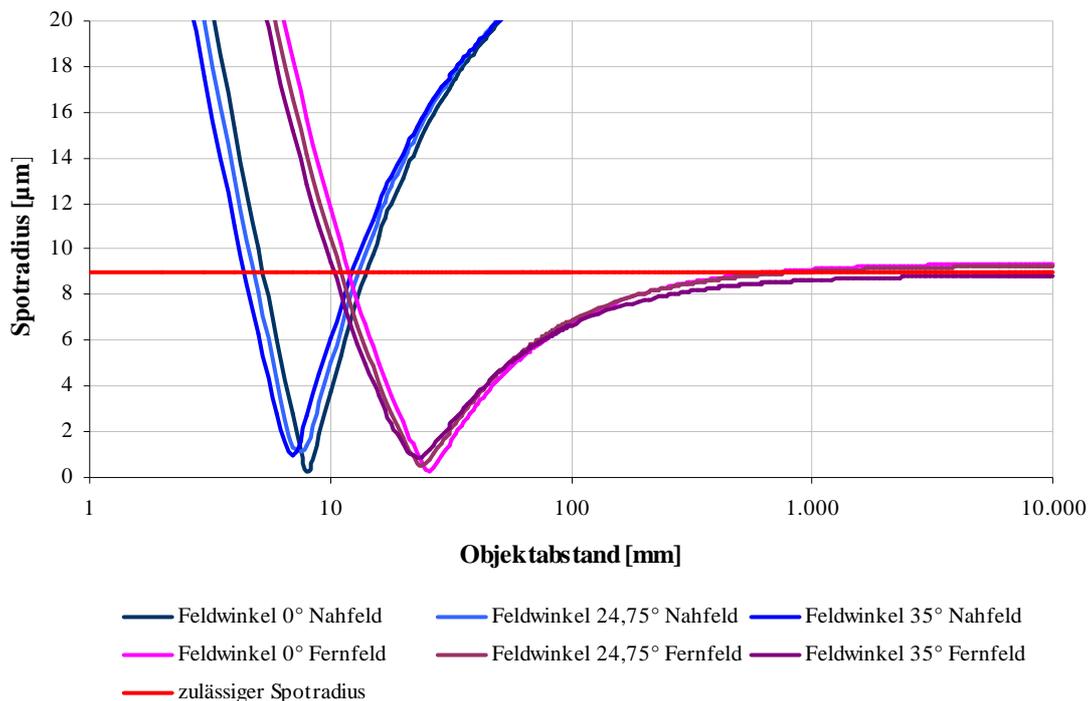


Abb. 3-5 Verlauf der Spotradien eines Zweistellungsfokussystems

Bei der Auslegung von Zweistellungsfokussystemen ist es von großer Bedeutung, dass die Schärfentiefebereiche des Nah- und Fernfelds eine Überlappung aufweisen, damit kein Unschärfbereich im Bild vorkommt.

Mittels des Zweistellungsfokussystems können zwei unterschiedliche Arten der Verbesserungen erzielt werden. Zunächst lässt sich bei gleichem Durchmesser der Eintrittspupille durch Nachfokussieren der Bereich der Schärfentiefe vergrößern. Weiterhin ermöglicht das Nachfokussieren bei konstantem Schärfentiefebereich das Öffnen der Blende, wodurch die Lichtempfindlichkeit des Objektivs vergrößert wird.

In der Abbildung 3-6 sind die Verläufe der Spotradien in Abhängigkeit vom Objektstand für eine Zweistellungsoptik mit einer Eintrittspupille von 0,3 mm im Vergleich zu einer Fixfokusoptik mit gleicher Eintrittspupille dargestellt.

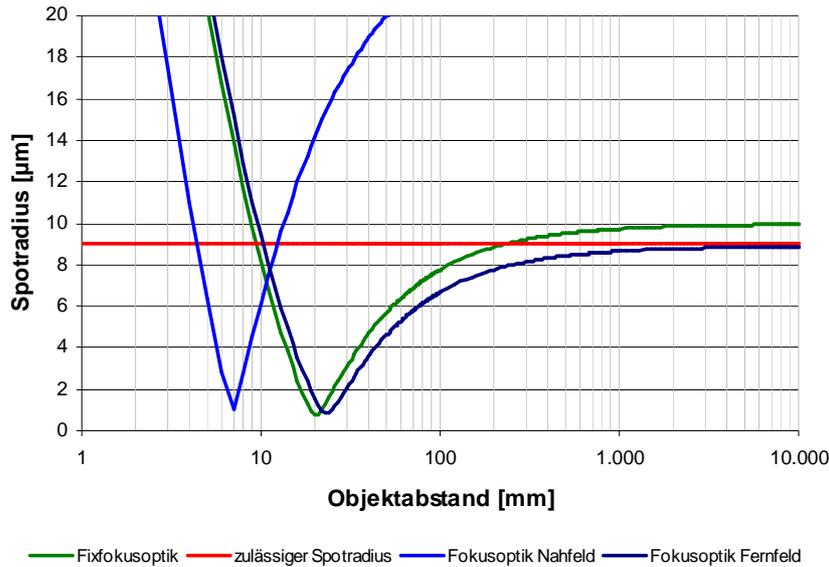


Abb. 3-6 Vergleich des Spotradienverlaufs einer Fixfokusoptik und einer Zweistellungsfokusoptik bei einem Durchmesser der Eintrittspupille von 0,3 mm

Wie man dem Diagramm entnehmen kann, ermöglicht die Nachfokussierung eine Erweiterung des Schärfentiefebereichs im Fernfeld von 200 mm auf Unendlich und im Nahfeld von 10 mm auf 4,5 mm. Eine Vergrößerung des Durchmessers der Eintrittspupille um den Faktor $\sqrt{2}$ bewirkt eine Verdopplung der auf dem Bildaufnehmer auftretenden Lichtmenge. Die Verluste der Schärfentiefe können dabei durch den Einsatz der Zweistellungsfokusoptik kompensiert werden. Der Spotverlauf eines solchen Beispiels ist in der Abbildung 3-7 dargestellt. Die Fixfokusoptik mit einer 0,3 mm-Pupille besitzt einen Schärfentiefebereich von 11 mm bis 200 mm. Die Vergrößerung der Lichtausbeute um den Faktor zwei setzt in diesem Fall eine Pupille mit dem Durchmesser von 0,424 mm voraus. Durch den Einsatz eines Zweistellungsfaktors wird der Schärfentiefebereich (8 mm bis Unendlich) sogar vergrößert.

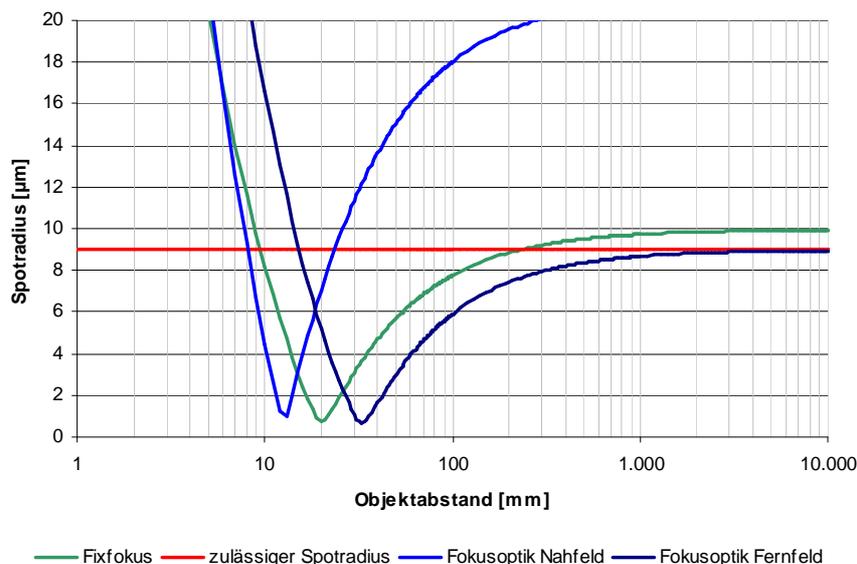


Abb. 3-7 Vergleich des Spotradienverlaufs einer Fixfokusoptik (Durchmesser der Eintrittspupille 0,3 mm) und einer Zweistellungsfokusoptik (Durchmesser der Eintrittspupille 0,424 mm)

In der Abbildung 3-8 ist der Verlauf des Spotradius eines optischen Systems, bei dem der Fokusachromat drei Positionen annehmen kann, dargestellt. Mit Hilfe dieser Optik können die Objekte im Bereich von 3 mm bis Unendlich scharf abgebildet werden. Die Möglichkeit, die Videoköpfe so nah an die zu betrachtenden Objekte zu platzieren, kann unter Umständen ein optisches Zoom ersetzen, wodurch sich sowohl das optische System als auch die zugehörigen mechanischen Komponenten deutlich einfacher gestalten lassen, was besonders bei sehr kleinen Optiken mit einem Durchmesser von 2 mm bis 5 mm von herausragender Bedeutung ist.

Eine Erweiterung des Schärfetiefenbereichs durch den Einsatz weiterer diskreter Positionen wird nicht betrachtet, da man bei höheren Ansprüchen an die Fokussierung der Optik eher eine kontinuierliche Nachfokussierung anwenden würde. Dies ist zum Beispiel dann der Fall, wenn man Objektive mit verstellbarer Brennweite aufbaut.

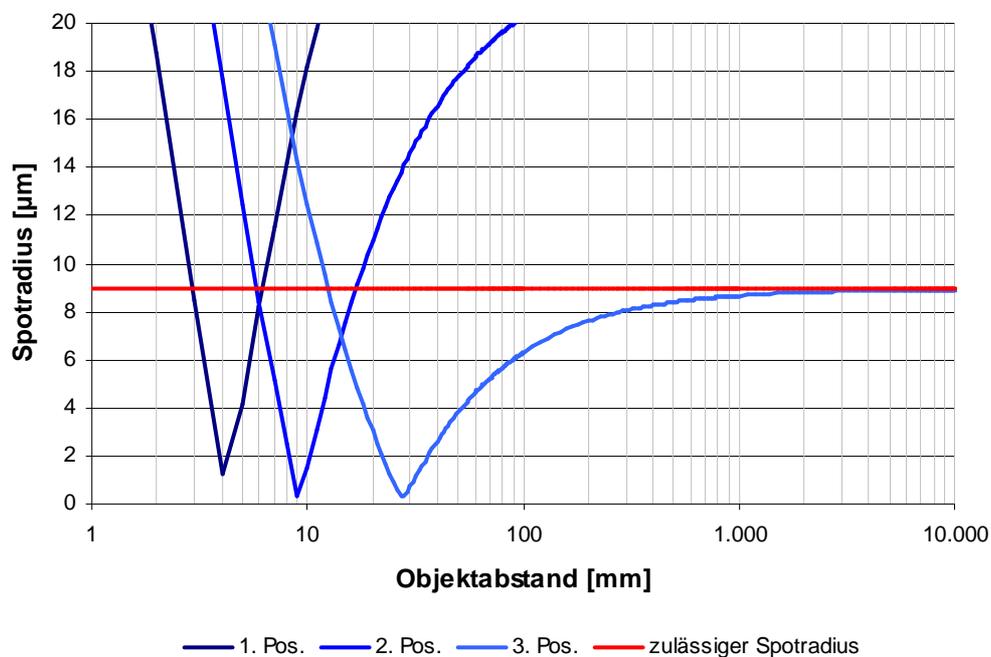


Abb. 3-8 Verlauf der Spotradien eines Dreistellungfokussystems

4 Komponenten elektromagnetischer Systeme

4.1 Spulen

Eines der wichtigsten Bauelemente der elektromagnetischen Systeme ist die Kupferspule. Aufgrund des Platzmangels beim Aufbau elektromagnetischer Aktoren werden selbsttragende Spulen aus Backlackdraht verwendet. Die Backlackdrähte bestehen aus einem Kupferkern, der mit Lack beschichtet ist. Die Lackbeschichtung hat zwei wichtige Aufgaben. Zum ersten werden dadurch die einzelnen Windungen voneinander isoliert, weiterhin werden die Windungen im Ofen miteinander fest verbacken.

In der Abbildung 4-1 ist der Querschnitt einer selbsttragenden Spule aus Backlackdraht dargestellt. Wie man dem Bild entnehmen kann, setzt sich das Volumen einer solchen Spule aus dem Kupfer- und dem Isolatoranteil (Lack und Luft) zusammen.

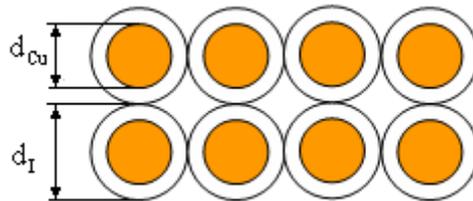


Abb. 4-1 Querschnitt einer selbsttragenden Spule aus Backlackdraht

Ein wichtiger Parameter einer Spule ist der Füllfaktor k_F , der sich aus dem Verhältnis zwischen dem Kupferanteil und dem Gesamtvolumen der Spule ermitteln lässt.

$$k_F = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d_{Cu}}{d_I} \right)^2 \quad (4-1)$$

Wird ein Spulensystem bei einer einfachen einphasigen Ansteuerung mit einem Strom I bestromt, so ergibt sich die Leistung von:

$$P = R \cdot i^2 \quad (4-2)$$

Im Fall eines einphasigen elektromagnetischen Antriebs, bei dem die Position des Läufers, bzw. des Rotors, direkt von der magnetischen Durchflutung, also dem Betrag des elektrischen Stroms abhängt, hängt die aufgebrachte elektrische Leistung quadratisch vom Strom ab. Elektromagnetische Systeme dieses Typs werden anhand neu entwickelter Linearantriebe, im Kapitel 6 detailliert beschrieben.

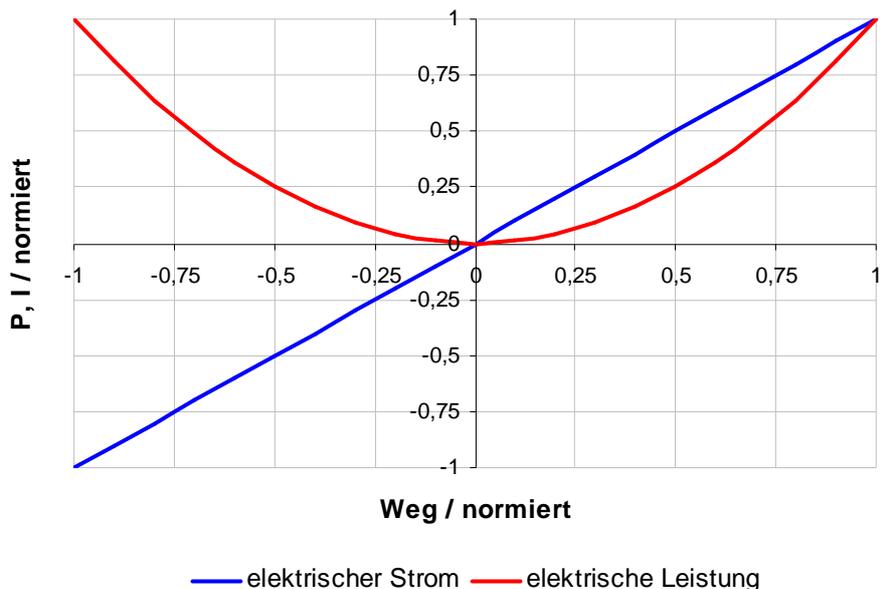


Abb. 4-2 Elektrischer Strom und elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Läuferposition

Betrachtet man Schrittmotoren, bei denen die Spulen nur zeitweise impulsförmig mit der Impulsdauer von t_i und der Pause t_p zwischen den Impulsen angesteuert werden (siehe Abbildung 4-3), so hängt die verbrauchte elektrische Leistung vom Verhältnis der Impulsdauer zur Gesamtdauer einer Periode ab. Die gesamte Leistung kann somit wie folgt berechnet werden:

$$P = n \cdot \left(\frac{t_i}{t_i + t_p} \right)^2 \cdot P_0 \quad (4-3)$$

wobei n die Anzahl der Stromimpulse und der Pausen zwischen den einzelnen Impulsen pro Sekunde und P_0 die pro Impuls verbrauchte Leistung ist. P_0 entspricht dabei der Gleichstromleistung bei der Stromamplitude für die Dauer t_i .

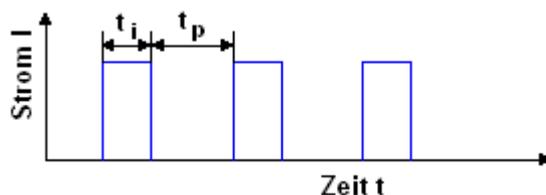


Abb. 4-3 Signalverlauf bei der Ansteuerung von Schrittmotoren

Eine weitere sehr wichtige Eigenschaft der Spulen ist die Induktivität. Stromdurchflossene Spulen werden von einem magnetischen Fluss Φ durchsetzt. Das Produkt aus Windungszahl N und Φ wird als Flussverkettung Ψ bezeichnet.

$$\Psi = N \cdot \Phi \quad (4-4)$$

Strom I und Flussverkettung Ψ sind einander proportional. Die Proportionalitätskonstante L wird Induktivität genannt.

$$\Psi = L \cdot I \quad (4-5)$$

Löst man die Gleichung (4-5) nach der Induktivität L auf und setzt dies in die Gleichung (4-4) ein, so ergibt sich:

$$L = \frac{N\Phi}{i} \quad (4-6)$$

Für den magnetischen Fluss Φ gilt:

$$\Phi = BA \quad (4-7)$$

Die magnetische Flussdichte im Luftspalt eines magnetischen Kreises ist:

$$B = Ni \frac{\mu_0}{\delta} \quad (4-8)$$

Setzt man die Gleichungen (4-7) und (4-8) in die Gleichung (4-6) ein, so ergibt sich:

$$L = N^2 \mu_0 \frac{A}{\delta} \quad (4-9)$$

Der Term $\frac{\delta}{\mu_0 A}$ kann zu R_m zusammengefasst werden und wird als magnetischer Widerstand bezeichnet.

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (4-10)$$

Wie aus der Formel (4-10) folgt, hängt die Induktivität der Spule von der Anzahl der Windungen, die in einem Motor konstant bleibt und vom magnetischen Widerstand ab, der annähernd konstant ist.

Nach dem Induktionsgesetz führt eine zeitliche Änderung der Flussverkettung Ψ zur Induktion einer Spannung zwischen den Spulendenen.

$$u_{\text{ind}} = -\dot{\Psi} = -\frac{d}{dt}(L \cdot i) = -L \frac{di}{dt} - i \frac{dL}{dt} \quad (4-11)$$

Ist die Induktivität konstant, vereinfacht sich dies zu:

$$u_{\text{ind}} = -L \frac{di}{dt} \quad (4-12)$$

Dabei steht u_{ind} für die an der Spule induzierte Spannung. Bei elektrischen Schaltungen betrachtet man dagegen die vom Netzgerät aufzubringende Spannung $u_L = -u_{\text{ind}}$

Beim Einschalten der Spannung an einer realen Spule gilt der Maschensatz

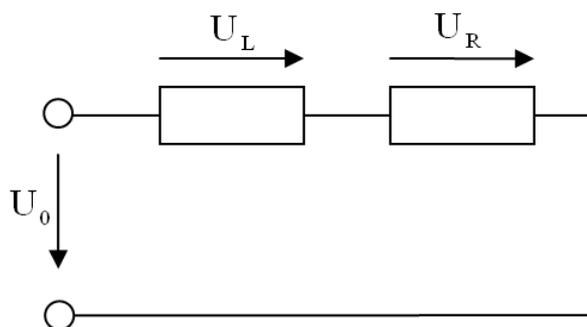


Abb. 4-4 Ersatzschaltbild einer Spule

$$U_0 - u_L - u_R = 0 \quad (4-13)$$

$$U_0 - L \frac{di}{dt} - Ri = 0 \quad (4-14)$$

Mit der Anfangsbedingung $i(t=0) = 0$ ergibt sich folgender Stromverlauf für den Einschaltvorgang:

$$i_{\text{ein}}(t) = \frac{U_0}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (4-15)$$

Für den Ausschaltvorgang gilt der Maschensatz:

$$-u_L - u_R = -L \frac{di}{dt} - Ri = 0 \quad (4-16)$$

Mit der Anfangsbedingung $i(t=0) = \frac{U_0}{R}$ folgt für den Ausschaltvorgang

$$i_{\text{aus}}(t) = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (4-17)$$

Gemäß der Gleichung (4-16) steigt der Strom in der Spule als Funktion der Zeit an. Wird die Spule von dem Feld B eines Permanentmagneten durchsetzt, wirkt die Lorentzkraft $F_L \propto B \cdot I(t)$.

Bei der Ansteuerung von Linearantrieben ist es sehr wichtig zu wissen, wie groß die Zeitverzögerung zwischen dem Einschalten der Spannung ist, bis der elektrische Strom durch die Spule fließt, so dass der Läufer sich aufgrund der Lorentzkraft bewegt.

In der Abbildung 4-5 sind beispielhaft die Stromverläufe in einer Spule beim Einschaltvorgang für unterschiedliche Induktivitäten dargestellt.

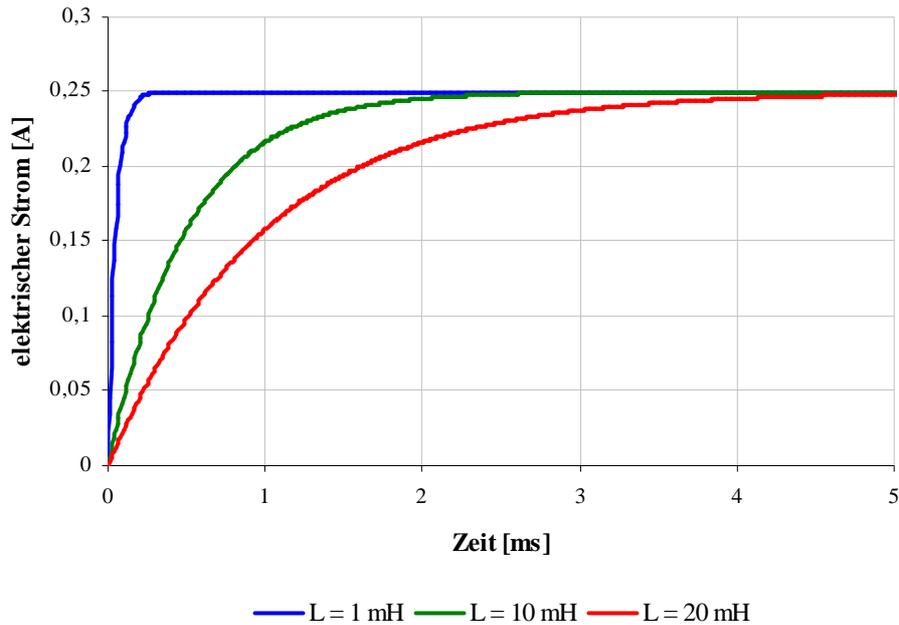


Abb. 4-5 Stromverläufe in einer Spule beim Einschaltvorgang für unterschiedliche Induktivitäten

Wie man der Abbildung 4-4 entnehmen kann, wächst die Verzögerung, bis der Strom durch die Spule $I = \frac{U_0}{R}$ fließt, mit steigender Induktivität. Um die zeitlichen Vorgänge beim Ein- bzw. Ausschalten der Spule zu betrachten, wird die Größe τ eingeführt. Für die Zeitkonstante τ gilt:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (4-18)$$

Der Kehrwert der Zeitkonstanten wird Grenzfrequenz genannt.

$$\omega = \frac{1}{\tau} \quad (4-19)$$

Die Induktivitäten der Spulen, die im Rahmen dieser Arbeit zum Aufbau von elektromagnetischen Antrieben verwendet wurden, betragen ca. 0,1 mH bis 1 mH. Der elektrische Widerstand liegt zwischen 10 Ω und 25 Ω . Hieraus ergeben sich Zeitkonstanten zwischen 4 und 100 μs . Diese Zeitkonstanten sind bei einer späteren Betrachtung (Kapitel 6) mit den mechanischen Zeitkonstanten zu vergleichen.

4.2 Ferromagnetische Werkstoffe

Bei der Konstruktion und dem Aufbau von elektromagnetischen Systemen ist die Auswahl der Werkstoffe von großer Bedeutung. Dieses Kapitel beinhaltet die Beschreibung der gängigen Materialien und ihrer für die Konstruktion relevanten Eigenschaften.

Ferromagnetische Werkstoffe lassen sich in weich- und hartmagnetische Werkstoffe aufteilen.

Weichmagnetische Werkstoffe

Weichmagnetische Werkstoffe werden zur Führung und Konzentration des magnetischen Flusses eingesetzt. Die Tabelle 4-1 gibt eine Übersicht ausgewählter, weichmagnetischer Werkstoffe und ihrer Eigenschaften.

	B_s [T]	H_c [A / cm]	$\mu_{r \max}$	ρ [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]
Reineisen (Fe 99,9)	2,15	0,06	40.000	0,1
Siliziumeisen (FeSi_3)	2,03	0,2	30.000	0,4
Nickeleisen (NiFe)				
mit 72 - 80 % Ni	0,7 - 0,8	0,003 - 0,025	50.000 - 400.000	0,35 - 0,6
mit 54 - 68 % Ni	1,2 - 1,5	0,012 - 0,07	-	0,45 - 0,6
mit 36 - 50 % Ni	1,3 - 1,6	0,04 - 0,1	50.000 - 135.000	0,4 - 0,93
Kobalteisen (FeCo)	2,35	0,8	15.000	0,35
Ferrite	0,32 - 0,53	-	1.000 - 6.500	$10^6 - 10^7$
Stähle mit niedrigem Kohlenstoffgehalt	0,6 - 1,5	3 - 5	-	-

Tabelle 4-1 Kennwerte ausgewählter weichmagnetischer Werkstoffe [Vacu02]

Die Fe-reichen Werkstoffe, wie Reineisen und Siliziumeisen, besitzen eine sehr hohe Sättigungsinduktion im Bereich über zwei Tesla. Ein Nachteil des Reineisens für magnetische Anwendungen liegt in seinem relativ niedrigen elektrischen Widerstand. Dies führt zu höheren Wirbelstromverlusten, so dass der Einsatz für Wechselstromanwendungen deutlich eingeschränkt ist. Durch den Zusatz von Silizium erreicht man einen vierfachen elektrischen Widerstand, allerdings mit der Verminderung der Sättigungsinduktion auf ca. 2,03 Tesla.

Nickeleisen-Legierungen zeichnen sich durch eine große Vielfalt der magnetischen Eigenschaften aus. Je nach Anwendung können Legierungen mit Permeabilitätswerten bis zu 400.000 oder Legierungen mit einer Sättigungsinduktion von 1,6 Tesla eingesetzt werden.

Die Kobaltheisen-Legierungen besitzen die höchste Sättigungsinduktion aller weichmagnetischen Materialien von 2,35 Tesla. Aus diesem Grund und trotz vergleichbar geringerer Permeabilitätswerte und höheren Koerzitivfeldstärken werden FeCo-Legierungen dort eingesetzt, wo die Querschnitte der flussführenden Elementen klein gehalten werden sollen, um Bauraum zu sparen, wie z.B. bei miniaturisierten Systemen oder bei elektrischen Maschinen, deren Gewicht minimiert werden soll, wie z.B. im Bereich der Luft- und Raumfahrttechnik.

Ferrite gehören zu der Gruppe der ferrimagnetischen Werkstoffe. Im Vergleich zu den metallischen Materialien besitzen Ferrite deutlich niedrigere Permeabilitäts- und Induktionsspitzenwerte. Ihr Vorteil liegt bei HF-Anwendungen, da aufgrund des hohen elektrischen Widerstands die Wirbelstromverluste klein sind.

Für die magnetischen Anwendungen können auch einige der allgemeinen Baustähle (wie z.B. S235) oder Automatenstähle (wie z.B. 11SMn30) verwendet werden. Diese zeichnen sich durch besonders gute Verarbeitbarkeit und kostengünstige Fertigung aus.

Hartmagnetische Werkstoffe

Die hartmagnetischen Werkstoffe (auch Permanentmagnete oder Dauermagnete genannt) dienen zur stromlosen Erzeugung des magnetischen Flusses. Die wichtigsten Vertreter dieser Gruppe sind AlNiCo, Hartferrite und Seltenerd-magnete.

AlNiCo

Diese Magnete verfügen über eine hohe magnetische Remanenzinduktion im Bereich von 0,5 bis 1,2 T, allerdings bei sehr geringen Koerzitivfeldstärken von maximal 125 kA / m, was zur hohen Anfälligkeit gegen entmagnetisierende Felder führt. Deshalb ist die richtige Dimensionierung der Magnete von großer Bedeutung. Ein wesentlicher Vorteil der AlNiCo-Magnete liegt im sehr weiten Anwendungstemperaturbereich von - 270°C bis + 550°C.

Hartferrite

Die wesentlichen Bestandteile der Hartferritmagnete sind Eisenoxid sowie Barium-, bzw. Strontiumcarbonat. Hartferrite sind keramische Werkstoffe und weisen entsprechende mechanische Eigenschaften bezüglich Härte und Sprödigkeit auf. Die magnetischen Eigenschaften der Hartferrite sind, verglichen mit anderen permanentmagnetischen Werkstoffen, relativ bescheiden. Die maximal erreichbare Remanenz liegt knapp über 0,4 Tesla. Aufgrund der guten chemischen Beständigkeit und der geringen Kosten ist ihre praktische Anwendung jedoch stark verbreitet.

Seltenerd-magnete

Zu dieser Gruppe der Werkstoffe gehören Samarium-Kobalt und Neodym-Eisen-Bor-Magnete. Sie sind die „jüngsten“ der permanentmagnetischen Werkstoffe und verfügen über die höchsten Energiedichten (SmCo bis 250 kJ / m³ und NdFeB bis 420 kJ / m³), was ihre Bedeutung für miniaturisierte Systeme hervorhebt. Als großer Nachteil dieser Magnete gilt die hohe Korrosionsanfälligkeit und schlechte Beständigkeit gegen Chemikalien, so dass eine Beschichtung der Magnete unverzichtbar ist. Die Werte der maximalen Einsatztemperatur liegen bei 250°C für SmCo₅, bzw. bei 350°C für Sm₂Co₁₇ und zwischen 80°C und 200°C für NdFeB.

Kunststoffgebundene Permanentmagnete

Eine Sonderform der Dauermagnete stellen die kunststoffgebundenen Permanentmagnete dar. Dabei wird Dauermagnetpulver in einem thermoplastischen oder duroplastischen Binder eingebettet. Die magnetischen Eigenschaften sind direkt von dem Volumenverhältnis zwischen dem Magnetpulver und dem Kunststoffanteil abhängig. Als Dauermagnetwerkstoff kommen Hartferrite und Seltenerden zum Einsatz. Eine deutlich geringere Bedeutung hat dabei AlNiCo aufgrund der hohen Entmagnetisierungsanfälligkeit. Als Herstellungsprozesse kommen das Spritzgießen und Formpressen in Frage. Einer der wesentlichen Vorzüge der kunststoffgebundenen Magnete ist die Vielfalt der herstellbaren Formen. Durch das Spritzgießen können in einem Arbeitsgang auch kompliziertere Formen als beim Sintern hergestellt werden. Weitere Vorteile liegen darin, dass durch Spritzgießen hergestellte Seltenerd-magnete im Allgemeinen isotrop sind und damit in beliebige Richtung oder mit beliebiger Polzahl magnetisiert werden können.

4.3 Analytische Betrachtung elektromagnetischer Linearantriebe

Für die analytische Betrachtung rotationssymmetrischer elektromagnetischer Linearantriebe wird ein in der Abbildung 4-6 dargestelltes Modell verwendet. Der Läufer des Linearantriebs besteht aus einem axial magnetisierten ringförmigen Permanentmagneten mit seitlich angebrachten Polschuhen aus weichmagnetischem Werkstoff. Der Stator setzt sich aus zwei selbsttragenden Kupferspulen und einem weichmagnetischen Rückflussjoch zusammen.

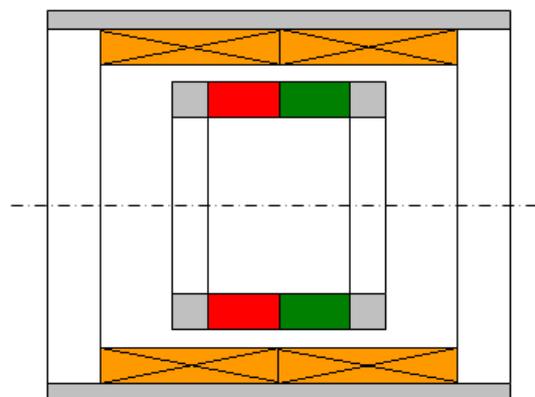


Abb. 4-6 Modell eines rotationssymmetrischen elektromagnetischen Linearantriebs

Bei der analytischen Betrachtung ist es oft notwendig, Vereinfachungen beim Aufstellen des physikalischen Modells vorzunehmen. Einige dieser Vereinfachungen führen zu relativ großen Fehlern, so dass die analytischen Modelle eher einer qualitativen Betrachtung dienen, die zu einem besseren Verständnis des Systems führen und weiterhin bei den FEM - basierten Berechnungen die Optimierung unterstützen.

Da das magnetische Feld in diesem System mit einem Permanentmagneten erzeugt wird, soll zunächst der permanentmagnetische Kreis, so wie er in der Abbildung 4-7 zu sehen ist, betrachtet werden. Bei der analytischen Betrachtung wird angenommen, dass das magnetische Feld vollständig radial an den Polschuhen aus-, bzw. eintritt. Das bedeutet, dass es keine Streueffekte gibt.

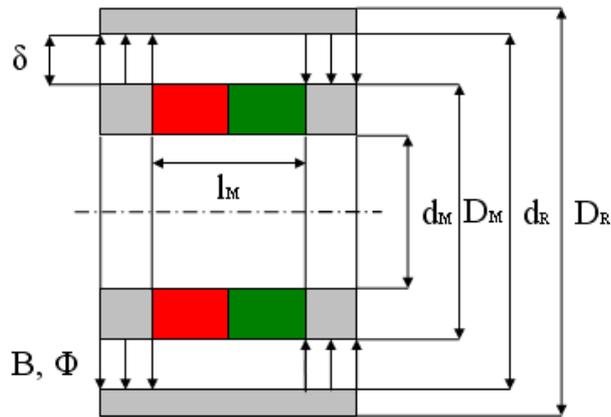


Abb. 4-7 Modell eines permanentmagnetischen Kreises des Linearantriebs

Aus dem Durchflutungssatz folgt:

$$\oint H ds = 0 \quad (4-20)$$

Das Wegintegral führt über die Länge des Permanentmagneten, durch den weichmagnetischen Polschuh, den Luftspalt, über das Rückflussrohr, wieder über den Luftspalt und durch den zweiten Polschuh zurück zu dem Magneten.

$$\int_0^{l_M} H_M dx + \int_0^{l_{Fe}} H_{Fe} dx + 2 \int_{D_M/2}^{d_R/2} H_L(r) dr = 0 \quad (4-21)$$

Dabei vereint das Integral $\int_0^{l_{Fe}} H_{Fe} dx$ den Weg des magnetischen Flusses durch alle weichmagnetischen Teile. Da es sich um einen weichmagnetischen Werkstoff handelt, ist $H_{Fe} \approx 0$.

Das erste Integral beschreibt das magnetische Feld im Inneren des Magneten und lässt sich wie folgt berechnen:

$$\int_0^{l_M} H dx = H_M l_M \quad (4-22)$$

Daraus ergibt sich:

$$2 \int_{D_M/2}^{d_R/2} H_L(r) dr + H_M l_M = 0 \quad (4-23)$$

Die vom magnetischen Fluss durchsetzte Fläche im Spalt ist nicht konstant, so dass die magnetische Feldstärke im Luftspalt H_L auch nicht konstant ist. Für die weiteren Betrachtungen wird vorausgesetzt, dass der Luftspalt klein gehalten wird, so dass die Änderungen von H_L klein und damit vernachlässigbar sind, daraus folgt, dass $H_L(r) = \text{const} = H_L$ ist. Durch diese Annahmen lässt sich die Gleichung (4-20) wie folgt vereinfachen:

$$2H_L \delta + H_M l_M = 0 \quad (4-24)$$

$$H_L = -H_M \frac{l_M}{2\delta} \quad (4-25)$$

bzw.

$$H_M = -H_L \frac{2\delta}{l_M} \quad (4-26)$$

mit $B_L = \mu_0 \mu_r H_L$ folgt aus (4-25):

$$B_L = -\mu_0 H_M \frac{l_M}{2\delta} \quad (4-25)$$

Da der magnetische Fluss im gesamten Kreis konstant ($\Phi = \text{const}$) und $\Phi = BA$ ist, folgt

$$B_M A_M = B_L A_L \quad (4-28)$$

$$B_M = B_L \frac{A_L}{A_M} \quad (4-29)$$

Betrachtet man die Kennlinie eines Permanentmagneten z.B. aus NdFeB, so lautet ihre Gleichung:

$$B_M = B_r + \mu_0 \mu_M H_M \quad (4-30)$$

Setzt man die Gleichungen (4-26) und (4-29) in die Gleichung (4-30) ein, so ergibt sich

$$B_L \frac{A_L}{A_M} = B_r - \mu_0 \mu_M H_L \frac{2\delta}{l_M} \quad (4-31)$$

$$B_L \frac{A_L}{A_M} = B_r - \mu_M B_L \frac{2\delta}{l_M} \quad (4-32)$$

aufgelöst nach B_L :

$$B_L = \frac{B_r}{\frac{A_L}{A_M} + \mu_M \frac{2\delta}{l_M}} \quad (4-33)$$

Betrachtet man die Lorentzkraft, die zum Verschieben des Läufers genutzt wird, so lässt sich diese wie folgt berechnen:

$$F_L = N \cdot i \cdot l \cdot B \quad (4-34)$$

Wobei N die Anzahl der Windungen, die vom magnetischen Fluss durchsetzt werden, i der elektrische Strom, der durch diese Leiter fließt und l die mittlere Leiterlänge im Magnetfeld darstellen.

Bei der Auslegung von Linearantrieben ist man bestrebt, im Luftspalt so viele Spulenwindungen wie möglich unterzubringen, um die antreibende Lorentzkraft zu erhöhen. Allerdings wird dadurch der Luftspalt vergrößert, was zur Reduzierung der magnetischen Flussdichte führt. Ein wirksamer Faktor zur Erhöhung der magnetischen Induktion ist das Volumen des Permanentmagneten, was jedoch der angestrebten Miniaturisierbarkeit widerspricht, da das gesamte System sich nicht nur um das zusätzliche Magnetvolumen, sondern auch um die radiale Dicke des weichmagnetischen Rückschlusses vergrößert, damit der größere magnetische Fluss geleitet werden kann. Aus diesen Gründen muss bei den konkreten Problemstellungen ein Kompromiss für diesen Parameter gefunden und mittels der FEM - Software optimiert werden.

4.4 Numerische Untersuchungen

Wie bereits erwähnt, helfen die analytischen Betrachtungen, die generelle Funktionsweise der elektromagnetischen Antriebe zu verstehen, um Anhaltspunkte für die weitere Optimierung zu liefern. Für eine genaue, auf eine konkrete Problemstellung angepasste Auslegung sind FEM-unterstützte Berechnungen unverzichtbar. In diesem Kapitel werden einige Zusammenhänge und Hilfestellungen für den Aufbau von Linearantrieben vorgestellt. Für die weiteren Betrachtungen wird das aus der Abbildung 4-5 bekannte Modell verwendet. Die geometrischen Abmaße des zu untersuchenden Systems entsprechen dem entwickelten bistabilen Linearantrieb BSLA 3,9 x 0,5 (siehe Kapitel 6-4).

Der Verlauf der magnetischen Flussdichte in einem rotationssymmetrischen, elektromagnetischen Linearantrieb ist in der Abbildung 4-8 dargestellt. Wie man der Abbildung entnehmen kann, entsprechen die in den obigen Vereinfachungen bezüglich des magnetischen Felds im Luftspalt nicht der Realität. Es sind Streufelder quer im Spalt vorhanden, und der Verlauf der magnetischen Induktion radial zu dem weichmagnetischen Polschuh ist nicht konstant.

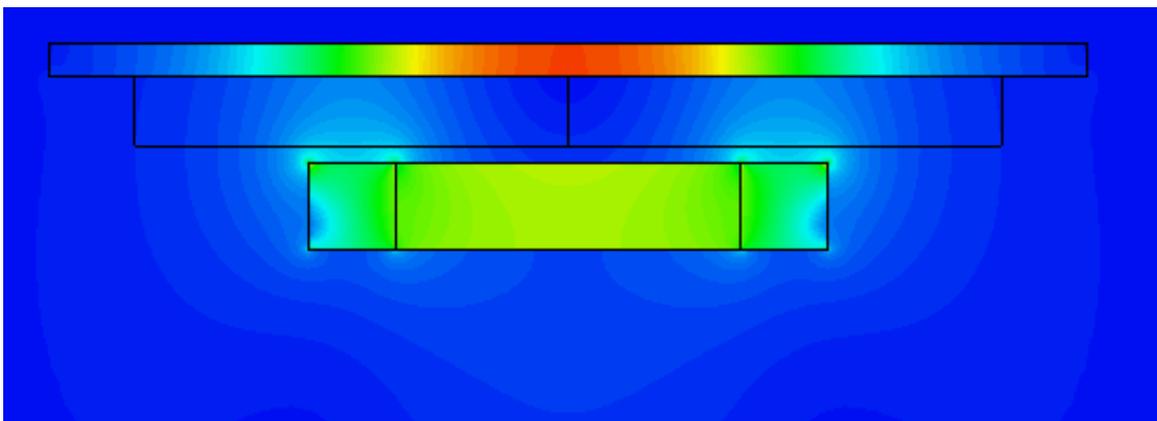


Abb. 4-8 Verlauf der magnetischen Flussdichte in einem Linearantrieb

Die Verläufe der magnetischen Flussdichte im Spalt des permanentmagnetischen Kreises werden anhand von zwei Diagrammen in den nachfolgenden Abbildungen erläutert. In der Abbildung 4-9 ist zunächst der Verlauf der magnetischen Induktion im Spalt, parallel zu der rotationssymmetrischen Achse, in Abhängigkeit von der Spaltlänge dargestellt. Der Nullpunkt der Abszisse entspricht der Mitte des weichmagnetischen Polschuhs. Der wesentliche Verlauf des Felds lässt sich mit Ausnahme sehr kleiner Abstände als Glockenkurve darstellen. Bei größeren Spalten werden die Kurven immer breiter und die maximale Amplitude sinkt. Die größere Breite der Kurven verdeutlicht nochmals die Ausbildung der Streufelder.

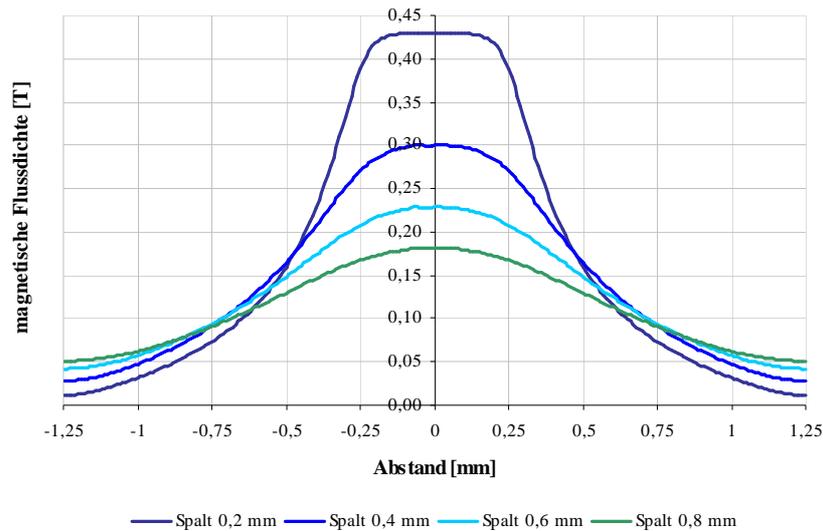


Abb. 4-9 Verlauf der magnetischen Induktion im Spalt parallel zur rotationssymmetrischen Achse in Abhängigkeit von der Spaltlänge

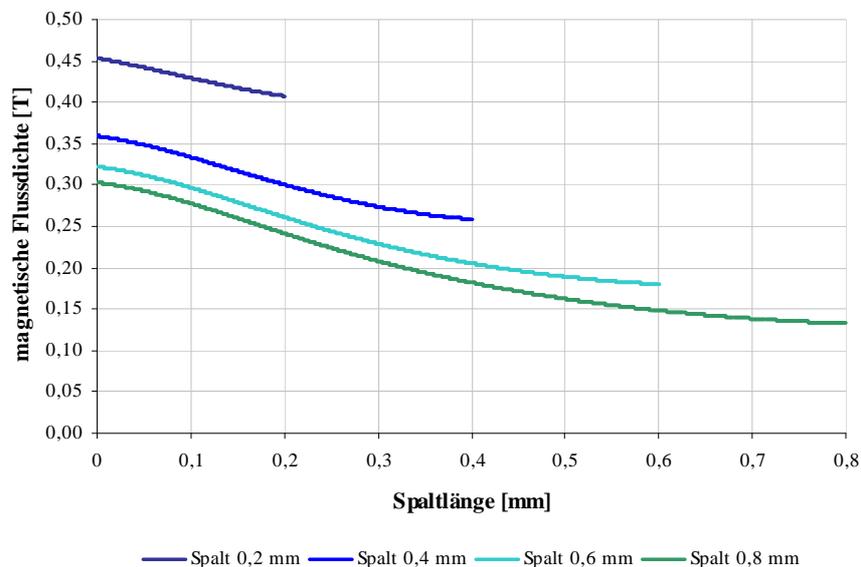


Abb. 4-10 Verlauf der magnetischen Flussdichte senkrecht zum Läuferpolschuh

Die Abbildung 4-10 zeigt den Verlauf der magnetischen Flussdichte bei unterschiedlichen Luftspalten entlang einer Linie, die von der Mitte des Läuferpolschuhs bis zum Rückschluss geht und senkrecht auf den Oberflächen der beiden Teile steht.

Der Abfall der Werte entlang dieser Linie ist durch die größer werdende Fläche, die vom magnetischen Fluss durchsetzt wird, zu begründen. Die Reduzierung der Maxima mit steigenden Spaltmaßen folgt aus unterschiedlichen Arbeitspunkten im permanentmagnetischen Kreis aufgrund größerer Luftspalte.

Der Verlauf der magnetischen Flussdichte im Spalt ist in erster Linie für die Optimierung der Lorentzkraft von Bedeutung. Mit steigender Luftspaltlänge können mehr Spulenwindungen, die vom magnetischen Fluss durchsetzt werden, untergebracht werden. Allerdings reduzieren sich die Werte der magnetischen Induktion, die wiederum linear in die Formel für die Berechnung der Kraft eingeht, siehe Formel (4-32). In der Abbildung 4-11 ist der Verlauf der Lorentzkraft dargestellt, die auf den permanentmagnetischen Läufer bei Bestromung der Statorspulen in Abhängigkeit von der radialen Dicke der Spule einwirkt.

Wie man dem Diagramm 4-11 entnehmen kann, bewirkt die Vergrößerung der Anzahl der Lagen in der Spule bei einer konstanten elektrischen Leistung eine Erhöhung der Kraft, bis ein Maximum erreicht ist. Das Maximum der Kurven liegt für unterschiedliche Längen des Läufermagneten zwischen 0,5 mm und 1 mm. Die typischen Werte, die beim Aufbau von Linearantrieben für die Anwendung in Chip-on-the-Tip-Endoskopen realisiert wurden, liegen aufgrund des beschränkten Bauraums typischerweise bei ca. 0,5 mm. Die dargestellten Verläufe zeigen, dass man, falls es die vorgegebenen Randbedingungen erlauben, die Anzahl der Lagen erhöhen sollte.

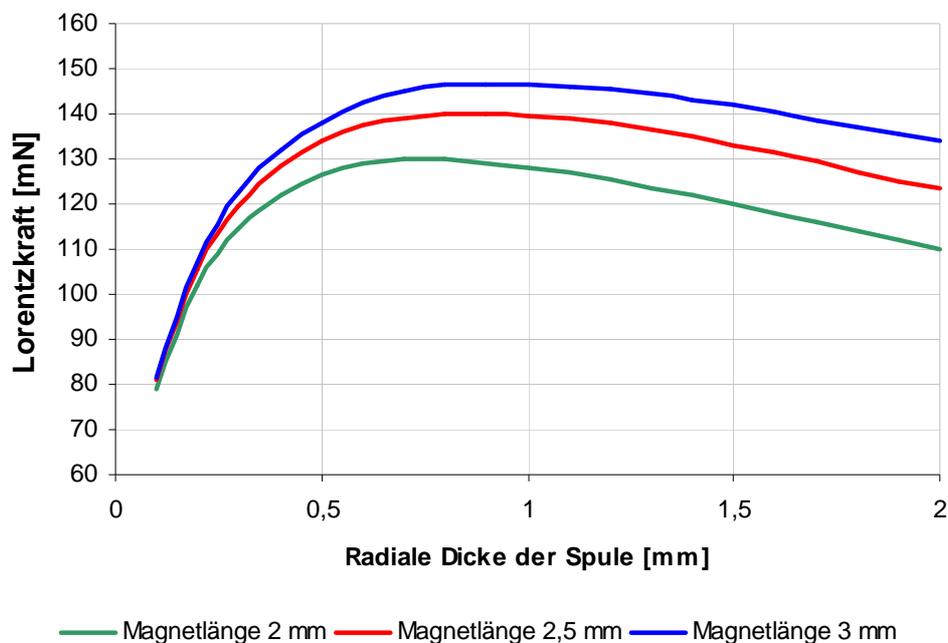


Abb. 4-11 Verlauf der Lorentzkraft in Abhängigkeit von der radialen Dicke der Spule bei gleich bleibender Leistung

Eine deutliche Erhöhung der Lorentzkraft ist durch die Vergrößerung der axialen Länge des Permanentmagneten erreichbar. Allerdings ist auch dieser Alternative eine Grenze gesetzt, da man nur einen sehr kleinen Bauraum hat. Weiterhin führt das größere Magnetvolumen zu einer hohen magnetischen Flussdichte, die durch den weichmagnetischen Rückschluss geleitet werden soll. Schließlich ist zu beachten, dass nicht der komplette Spalt zwischen dem Läufer und dem Rückschluss für die Spule zur Verfügung steht. Ein Teil dieses Raums wird für die Gleithülse verwendet, um welche die Spulen gewickelt werden und in der außerdem der Läufer gelagert ist. Darüber hinaus soll zwischen der äußeren Oberfläche und dem Rückschluss ein Luftspalt vorhanden sein, damit bei der Montage des Linearantriebs die obere Drahtlage nicht beschädigt wird.

Wie bereits erwähnt, wird das magnetische Feld im Spalt aufgespreizt, wodurch es sinnvoll ist, die Spule breiter als den weichmagnetischen Polschuh zu gestalten. Dadurch tragen auch die magnetischen Streufelder zum Aufbau der Lorentzkraft bei. Der Verlauf der Lorentzkraft in Abhängigkeit von der axialen Länge der Spule ist in der Abbildung 4-12 als Funktion verschiedener Magnetlängen dargestellt. Die Betrachtung der Änderung der maximalen magnetischen Durchflutung der Spule wird auch hier auf eine konstante Leistung von einem halben Watt bezogen.

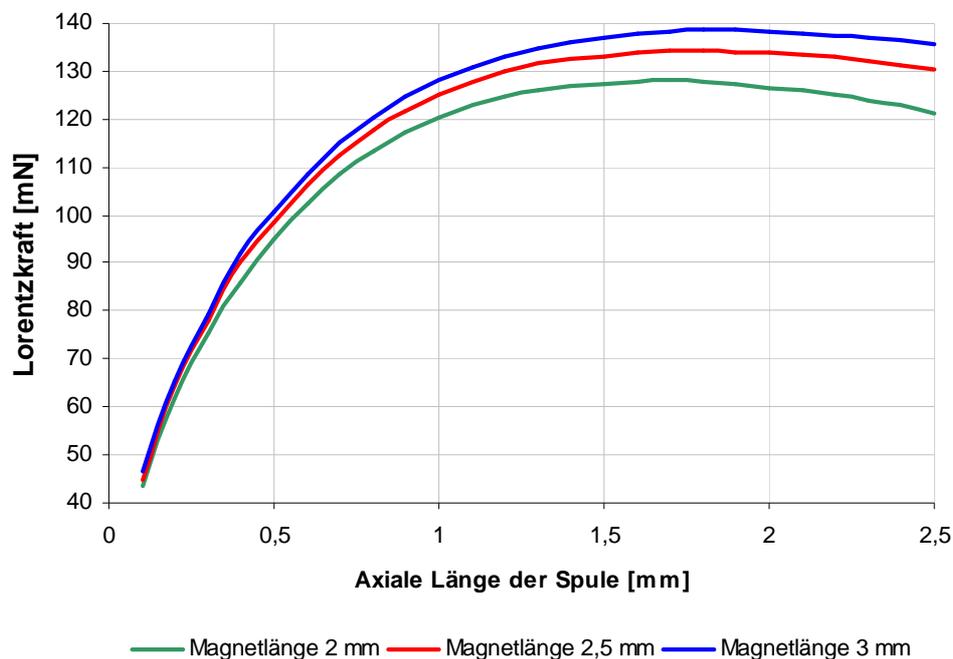


Abb. 4-12 Verlauf der Lorentzkraft bei verschiedenen Magnetlängen in Abhängigkeit der axialen Länge der Spule bei gleich bleibender Leistung

Allerdings erhöht sich mit größerer Anzahl der Windungen der elektrische Widerstand der Spule, so dass bei konstant gehaltener Leistung der maximale elektrische Strom, der durch die Spule fließt vermindert wird. Die Maxima der einzelnen Kurven für eine Polschuhlänge des Weicheisens von 0,5 mm liegen für die unterschiedlichen Magnetlängen zwischen 1,5 mm und 2 mm.

Zu beachten ist, dass die bisherigen Betrachtungen der Kraft nur für eine Position des Läufers gemacht wurden. Da diese entlang der Rotationsachse bewegt werden soll, ist es notwendig, die Modellrechnungen für die beiden Endpunkte der gesamten Verfahrstrecke durchzuführen. In der Abbildung 4-13 sind die beschriebenen Ergebnisse der numerischen Betrachtung qualitativ in einem 3D-Plot zusammengefasst. Wie man dem Plot entnehmen kann, bewirkt die Vergrößerung radialer und axialer Länge der Spule Steigerung der Lorentzkraft bis ein Maximum erreicht ist.

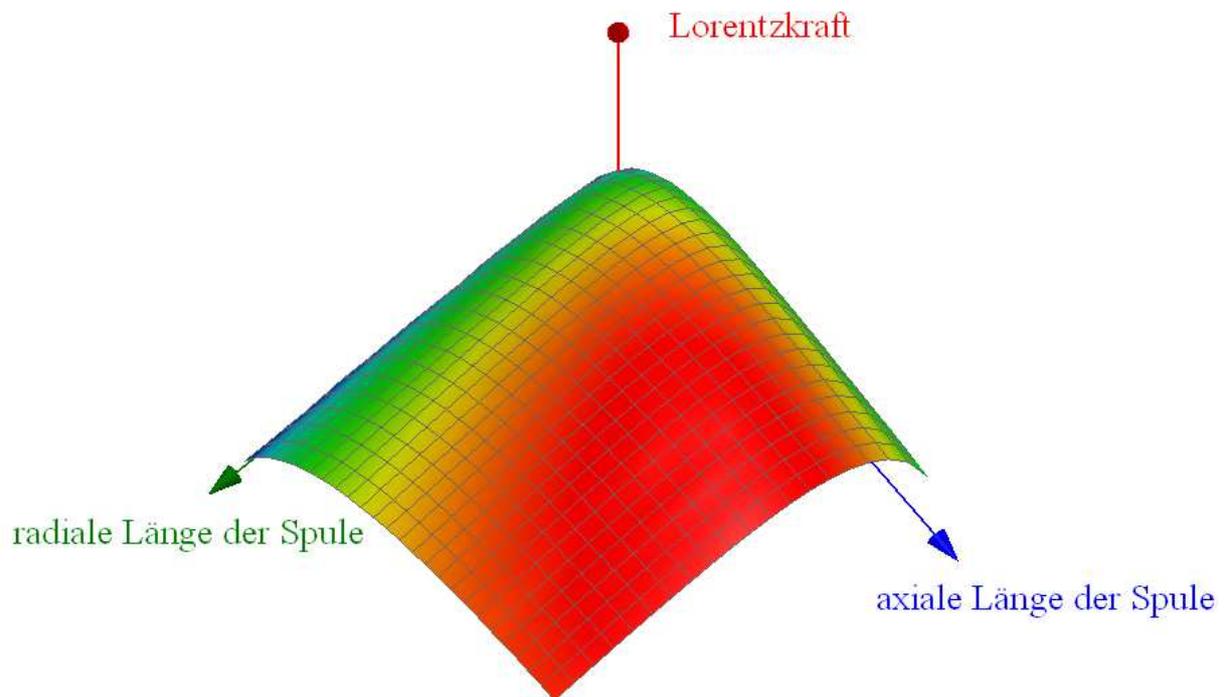


Abb. 4-13 Lorentzkraft in Abhängigkeit von der radialen und axialen Länge der Spule

5 Magnetische Kupplung

Der Einsatz von magnetischen Kupplungen ist im Bereich der medizinischen Endoskopie schon seit Jahren zum Standard geworden. Magnetische Kupplungen erlauben eine berührungslose Drehmomentübertragung vom Bedienteil zur eigentlichen Funktionsbaugruppe.



Abb. 5-1 Magnetischen Kupplungen in medizinischen Geräten [Karl09], [Karl10]

Einige dieser Anwendungen sind dabei die Bewegung der Linsengruppen einer Videokamera durch die von außen angebrachten Drehrädchen oder die Übertragung des Drehmoments zur Rotation des Bildaufnehmers in Chip-on-the-Tip-Endoskopen, um die Ausrichtung des Horizonts zu behalten.

Die berührungslose Drehmomentübertragung mittels magnetischer Kupplungen erlaubt einen abgeschlossenen Aufbau der genannten Geräte, was zusätzliche Maßnahmen zur Abdichtung überflüssig macht. Dies spielt eine besonders große Rolle beim Aufbau von autoklavierbaren Geräten, bei denen die Abdichtung des Innenraums eines der wichtigsten Kriterien darstellt.

5.1 Funktionsweise magnetischer Kupplungen

Für die vergleichende Auslegung magnetischer Kupplungen wird davon ausgegangen, dass diese in Handgeräten verwendet werden, so dass der Außendurchmesser hier auf 30 mm beschränkt wird. Der Innenradius des Ausschnitts in der weichmagnetischen Klauenscheibe, zur Aufnahme der zu bewegenden Elemente, liegt bei 5 mm. Der Spalt zwischen den Permanentmagneten und der Scheibe beträgt 2 mm.

In der Abbildung 5-2 sind die Prinzipskizzen des möglichen Aufbaus magnetischer Kupplungen dargestellt.

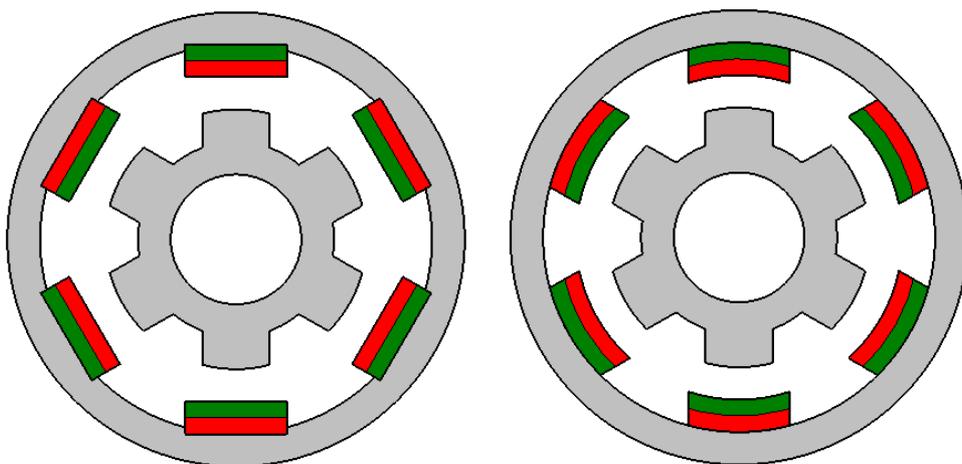


Abb. 5-2 Magnetische Kupplung mit Rechteckmagneten (links) und mit Segmentmagneten (rechts), weichmagnetische Klauenscheibe (innen)

Wie man der Abbildung 5-2 entnehmen kann, besteht eine typische magnetische Kupplung aus einer weichmagnetischen Klauenscheibe, mit einer Bohrung für die Aufnahme der zu bewegenden Teile. Um die Klauenscheibe platziert man einen Rückschluss mit radial magnetisierten Permanentmagneten, die alternierend gepolt sind.

Der Verlauf der magnetischen Induktion und des magnetischen Flusses ist in der Abbildung 5-3 links dargestellt. Wird der magnetische Rückschluss mit den Permanentmagneten gedreht, so verzerrt sich der Verlauf der Feldlinien (siehe Abbildung 5-3 rechts), was zur Ausbildung einer Reluktanzkraft und einem Drehmoment führt. Dies bewirkt, dass die Klauenscheibe der Drehung der Magnete folgt. Nachteilig ist der Schlupf zwischen der Bewegung der Magnete und der Klauenscheibe.

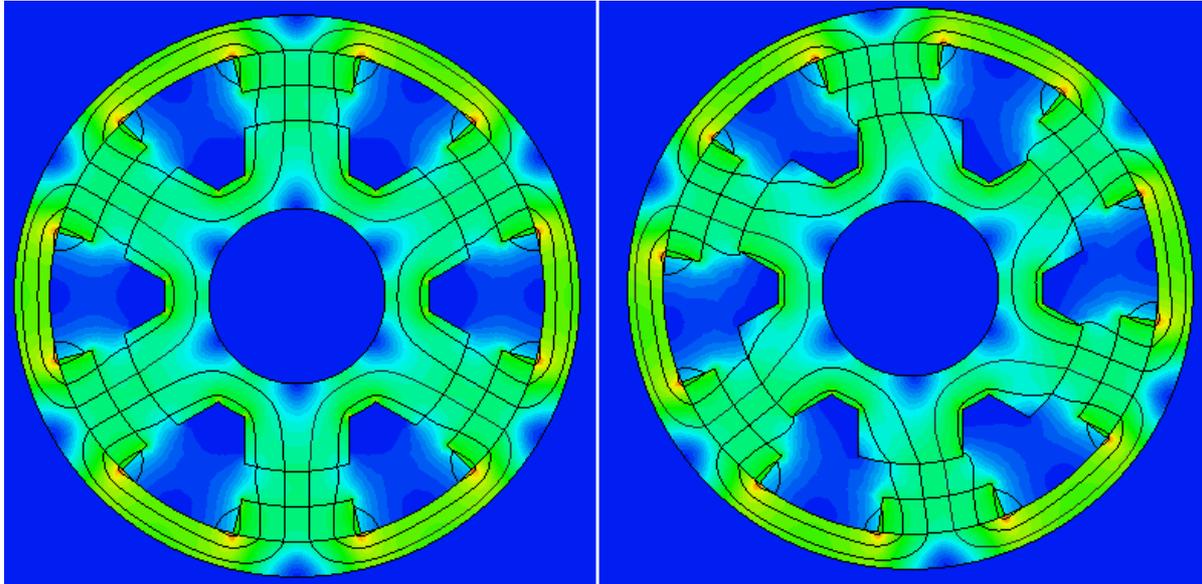


Abb. 5-3 Verlauf der magnetischen Induktion und des magnetischen Flusses in einer stabilen Stellung (links) und in ausgelenkter Stellung (rechts)

5.2 Auslegung und Optimierung

Bei der Auslegung und Optimierung der magnetischen Kupplungen für die genannten Anwendungen ist primär nicht das maximal übertragbare Drehmoment, sondern die Steigung der Drehmoment-Kennlinie beim Nulldurchgang vom Interesse, weil genau dadurch das Umkehrspiel und das präzise Folgen der Klauenscheibe gegenüber den Permanentmagneten beeinflusst werden.

Aus der theoretischen Betrachtung der permanentmagnetischen Kreise geht hervor, dass eine Verringerung des Luftspalts eine Erhöhung der magnetischen Flussdichte bewirkt, was zur Erhöhung der Reluktanzkraft führt. Denselben Effekt erreicht man durch die Vergrößerung der Magnetlänge (vgl. Ausdruck 4.33). Die Verringerung des Luftspalts kann bei der Gestaltung der magnetischen Kupplungen nicht als frei wählbarer Parameter betrachtet werden, da dieser meist durch die konstruktiven Randbedingungen, wie z.B. die Wandstärke des Bauteils, vorgegeben ist. Weil die magnetischen Kupplungen hier in Handgeräten verwendet werden, kann die Magnetlänge nicht beliebig groß gewählt werden, da ansonsten die Ergonomie des Geräts beeinträchtigt wird. Aus diesen Gründen werden diese Parameter bei der Optimierung der magnetischen Kupplungen nicht in Betracht gezogen.

Eine Erhöhung der übertragbaren Drehmomente lässt sich damit nur durch die Form und das Verhältnis der Bauteilabmessungen erreichen. Bei der Auswahl der Magnete stehen meist entweder Rechteckmagnete (siehe Abbildung 5-2 links) oder Segmentmagnete (siehe Abbildung 5-2 rechts) zur Verfügung. Für die Verwendung von Rechteckmagneten spricht vor allem die Wirtschaftlichkeit, da man nur einen Magnettyp braucht, um eine alternierende Polanordnung zu realisieren. Beim Aufbau mit Segmentmagneten müssen zwei Magnettypen verwendet werden, was besonders bei hohen Stückzahlen die Fertigungs-, Montage- und Logistikkosten stark erhöht. Ein anderer wichtiger Parameter bei der Gestaltung von magnetischen Kupplungen mit Rechteckmagneten ist deren Positionierung im weichmagnetischen Rückschluss. Die in der Abbildung 5-2 links dargestellte Ausführungsform enthält Rückschlussausschnitte, in welche die Magnete platziert werden, was wiederum zusätzlichen Fertigungsaufwand bedeutet. Verzichtet man auf die Rückschlussausschnitte, so entsteht ein Luftspalt zwischen dem Magneten und dem Rückschluss, der zur Erhöhung des magnetischen Widerstands führt (siehe Abbildung 5-4).

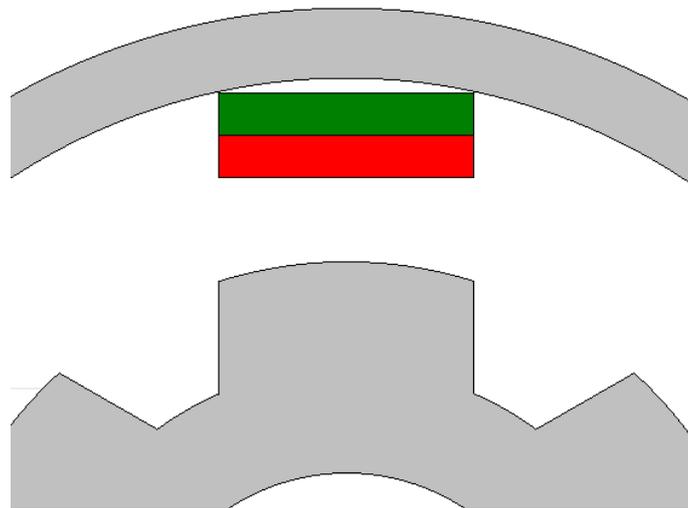


Abb. 5-4 Spalt zwischen dem Rückschluss und dem rechteckigen Permanentmagnet

In der Abbildung 5-5 ist der Verlauf der Drehmomente der magnetischen Kupplungen mit unterschiedlichen Magnetformen dargestellt. Wie man den Kennlinien entnehmen kann, bewirkt eine Änderung der Magnetform von Segment- auf Quadermagnete eine Reduzierung der Steifung um ca. 18 Prozent. Eine weitere Vereinfachung des Kupplungsaufbaus durch den Verzicht auf die Ausschnitte im weichmagnetischen Rückschluss für die Aufnahme der Permanentmagnete (wie es in der Abbildung 5-4 zu sehen ist) bewirkt nur geringfügige Verluste des maximal erreichbaren Drehmoments und nahezu keine Änderung der Steigung der Kennlinie.

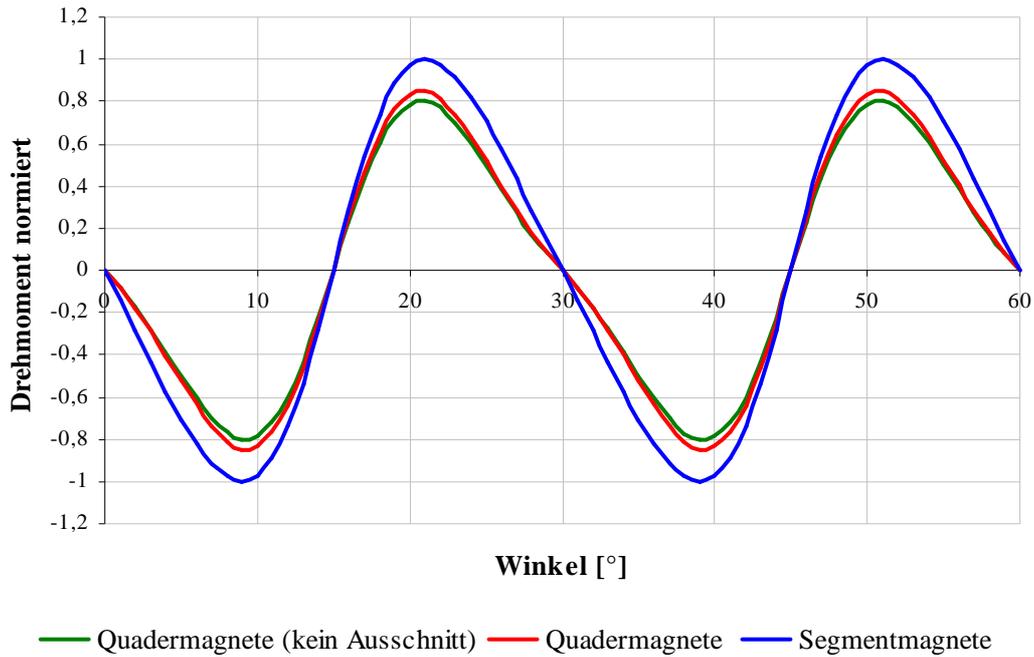


Abb. 5-5 Drehmomente der magnetischen Kupplungen mit unterschiedlichen Magnetformen

Eine effektive Möglichkeit, die Wirkung einer magnetischen Kupplung zu optimieren, besteht in der Erhöhung der Anzahl der Pole, also der Anzahl der Permanentmagnete und der zugehörigen Klauen der weichmagnetischen Scheibe. Die Verläufe der Drehmomentkennlinien der magnetischen Kupplungen für eine unterschiedliche Anzahl von Polen sind in der Abbildung 5-6 dargestellt.

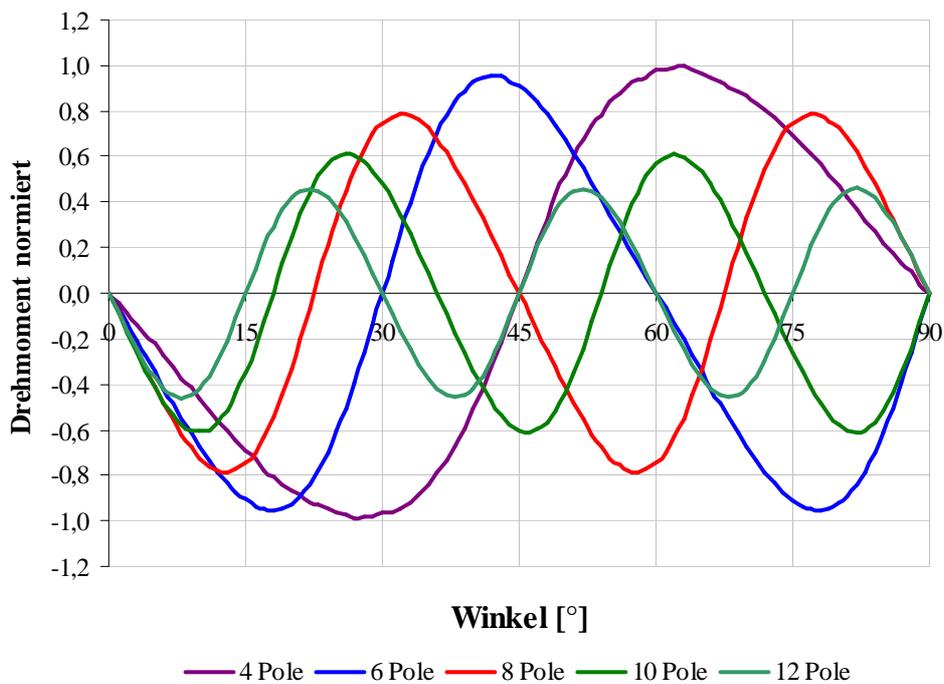


Abb. 5-6 Drehmomente der magnetischen Kupplungen mit unterschiedlicher Anzahl von Polen

Wie man dem Diagramm entnehmen kann, bewirkt eine Erhöhung der Anzahl der Pole eine Minderung des maximalen Drehmoments, aber eine Erhöhung der Steigung der Kennlinie um den Nulldurchgang, was auch bei der Auslegung das Ziel ist. Eine besonders starke Verbesserung der Eigenschaften der magnetischen Kupplung ist bei der Erhöhung der Anzahl der Pole von vier auf sechs zu verzeichnen, bei einer weiteren Erhöhung der Polzahl sind die Verbesserungen deutlich kleiner.

Beim Übergang von acht auf zehn Pole sind nahezu keine Änderungen der Kennliniensteigung zu verzeichnen. Das liegt vor allem daran, dass die Verkleinerung der Pole zu größeren Streufeldern einzelner Magnete führt, die sich im Luftspalt überlappen. Diese Auswirkung ist anhand der magnetischen Felder der Kupplungen mit sechs und zwölf Polen in der Abbildung 5-7 dargestellt.

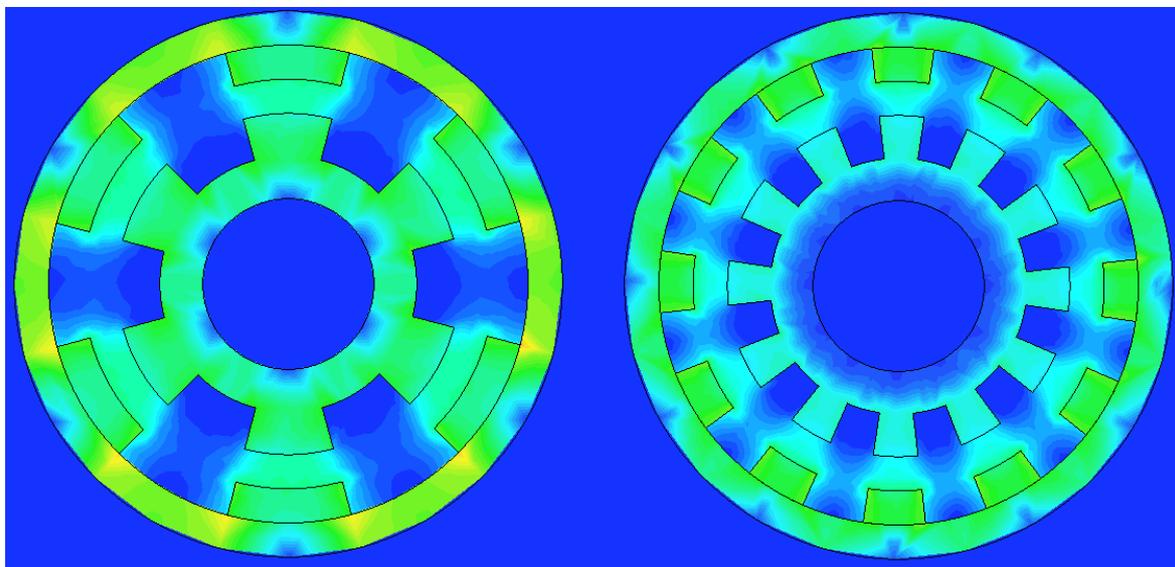


Abb. 5-7 Magnetische Felder der Kupplungen mit sechs und zwölf Polen

Resümierend kann man sagen, dass bei diesen Abmaßen der magnetischen Kupplung (für die Verwendung in Handbediengeräten) die optimale Anzahl der Pole bei sechs liegt. Eine weitere Erhöhung der Polzahl erfordert einen größeren Fertigungs- und Montageaufwand, der nur einen sehr geringen Nutzen mit sich bringt.

Die Drehmoment-Kennlinie magnetischer Kupplungen hängt weiterhin sehr stark von dem Verhältnis der Magnetbreite zur Breite der weichmagnetischen Klaue ab. In der Abbildung 5-8 sind die Ergebnisse der FEM-Untersuchungen als 3D-Plot dargestellt.

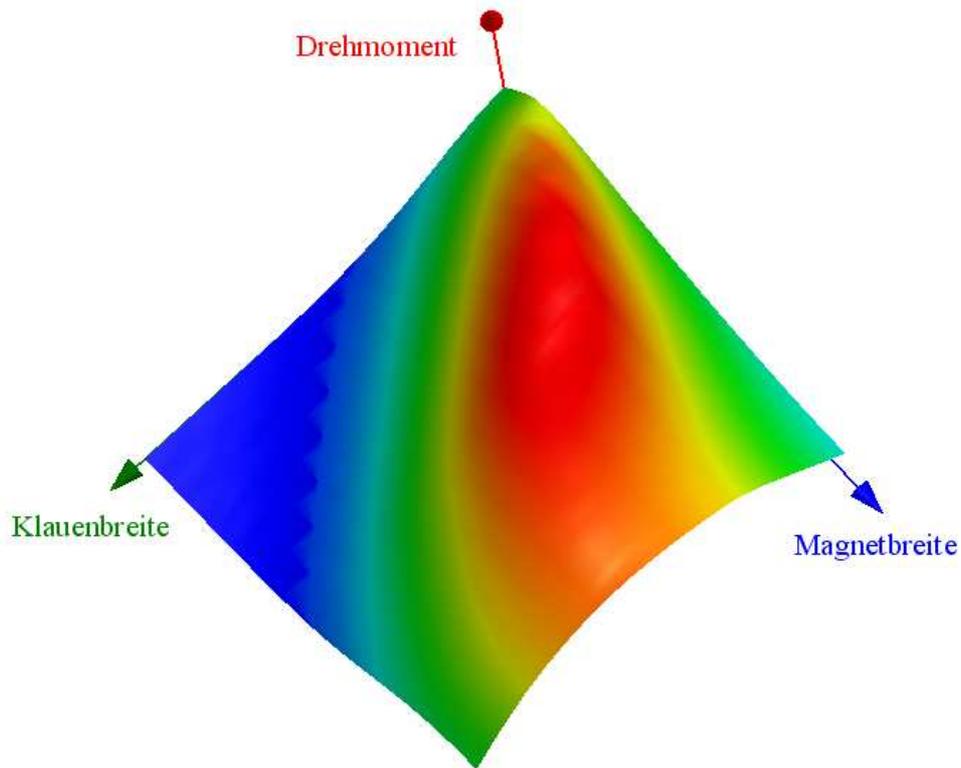


Abb. 5-8 Qualitative Abhängigkeit des Drehmoments von der Magnet- und Klauenbreite als 3D-Plot

Eine Vergrößerung der Magnetbreite bewirkt eine Erhöhung des übertragbaren Drehmoments. Bei einer konstanten Breite des Permanentmagneten führt eine Verkleinerung der Klauenbreite zu demselben Ergebnis. Das absolute Maximum des Drehmoments ist dann erreicht, wenn die weichmagnetische Klauenscheibe in Sättigung gerät. Nach dem Erreichen der Sättigung des weichmagnetischen Materials der Klauenscheibe verringert sich das Drehmoment. Das abrupte Enden der Plotfläche für größere Werte der Magnetbreite ist damit zu erklären, dass die maximale Breite der Permanentmagnete erreicht wurde und diese aufeinander stoßen.

Eine weitere Optimierung der Drehmomentübertragung magnetischer Kupplungen lässt sich durch die Verwendung von Permanentmagneten anstatt weichmagnetischer Klauen erreichen. Diese Anordnung ist in der Abbildung 5-9 dargestellt.

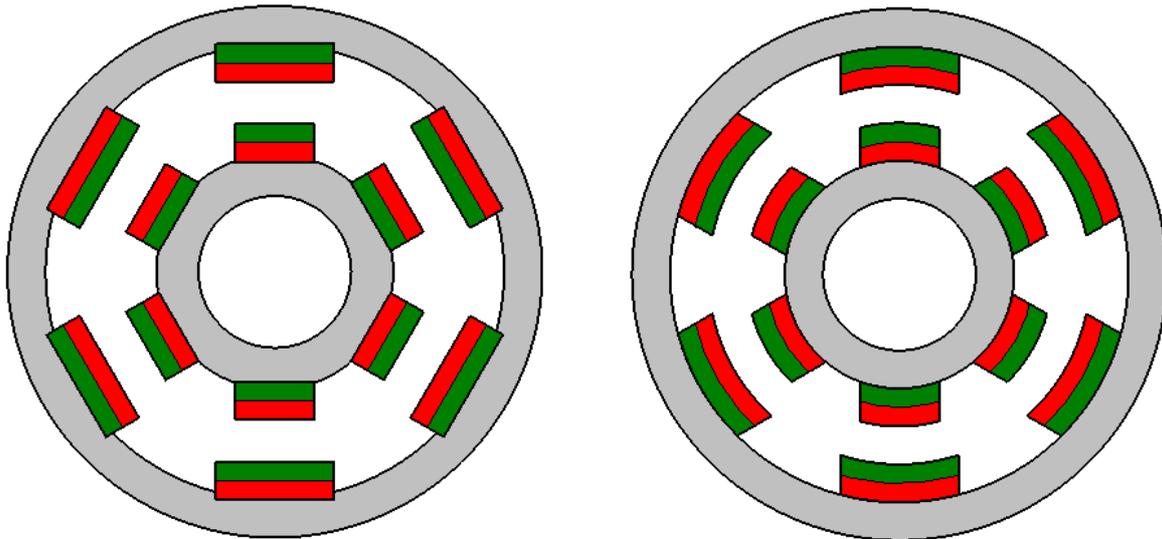


Abb. 5-9 Aufbau einer magnetischen Kupplung mit beidseitig angeordneten Permanentmagneten mit Rechteckmagneten (links) und Segmentmagneten (rechts)

In der Abbildung 5-10 ist die Drehmomentkennlinie der magnetischen Kupplung mit beidseitig eingesetzten Magneten im Vergleich zu dem bereits diskutierten Kupplungstyp (siehe Abbildung 5-1) dargestellt. Bei der Berechnung der Drehmomentkennlinie wurde davon ausgegangen, dass die inneren Permanentmagnete vom Volumen her gleich den Klauen der weichmagnetischen Scheibe sind, so dass dies keine Auswirkung auf die Baugröße des Systems ergibt.

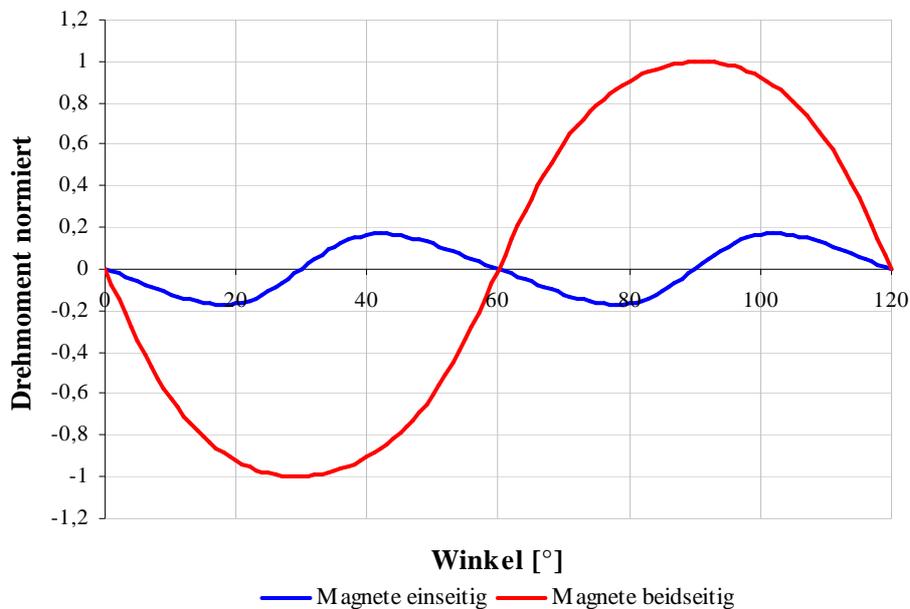


Abb. 5-10 Drehmomentkennlinie magnetischer Kupplungen mit einseitig und beidseitig eingesetzten Permanentmagneten

Wie man dem Diagramm entnehmen kann, bewirkt der beidseitige Einsatz der Permanentmagnete eine deutliche Erhöhung sowohl des maximalen Drehmoments als auch der Steigung der Kennlinie um den Nullpunkt. Diese Verbesserung wird einerseits durch die Vergrößerung des Magnetvolumens erreicht, wodurch höhere Werte der magnetischen Flussdichte erreicht werden. Außerdem wird das magnetische Feld im Spalt deutlich konzentrierter und die Streuung verringert sich. Diese Effekte sind in der Abbildung 5-11 anschaulich dargestellt.

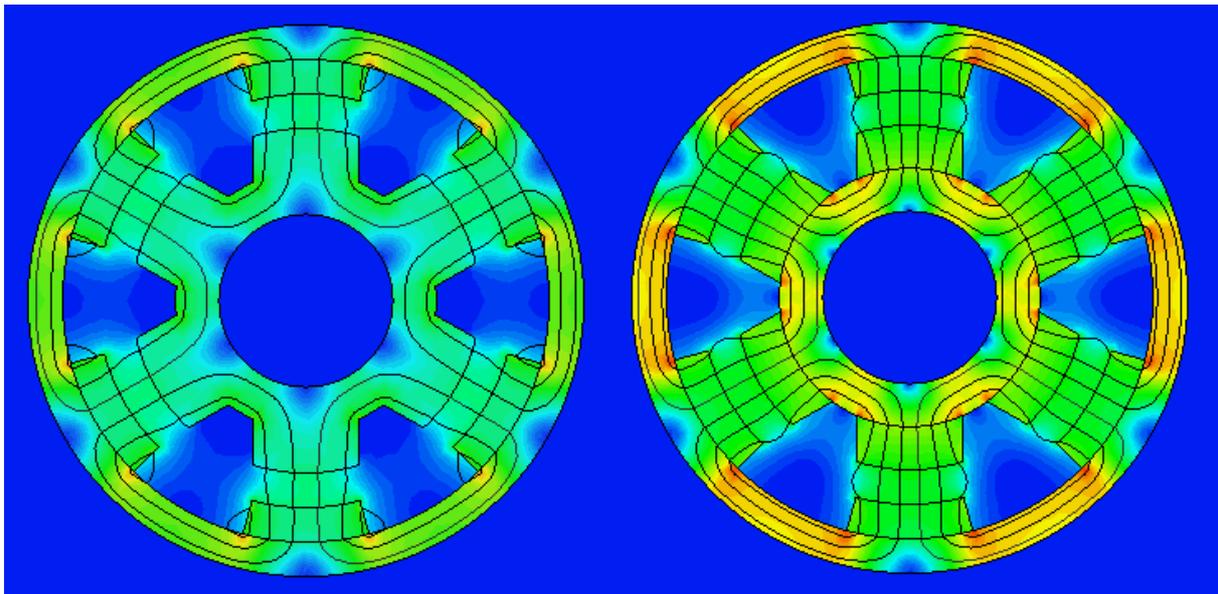


Abb. 5-11 Magnetische Flussdichte und Verlauf der magnetischen Feldlinien der magnetischen Kupplungen mit einseitig (links) und beidseitig (rechts) eingesetzten Permanentmagneten

5.3 Gegenseitige Beeinflussung der magnetischen Kupplungen

Beim Einsatz von zwei magnetischen Kupplungen nebeneinander, wie es z.B. bei einer Endoskopkamera mit beweglichen Zoom- und Fokuslinsengruppen der Fall ist, muss die gegenseitige Beeinflussung der Permanentmagnete der beiden Kupplungen berücksichtigt werden. Ist diese Beeinflussung zu stark, so kann bei der Betätigung einer Kupplung die andere ungewollt mitverstellt werden.

Für die Betrachtung, in wiefern sich zwei nebeneinander stehende magnetische Kupplungen beeinflussen, wurden vergleichende Berechnungen am Beispiel einer sechspoligen Kupplung mit Segmentmagneten durchgeführt.

Wird eine der magnetischen Kupplungen gedreht, so kann dies zu zwei ungewünschten Verschiebungen im System der anderen Kupplung führen: erstens die Bewegung des Drehknopfs, bestehend aus den Permanentmagneten und dem weichmagnetischen Rückschluss und zweitens die Bewegung der weichmagnetischen Klauenscheibe im Inneren der Kamera.

In der Abbildung 5-12 ist der Verlauf des auf die benachbarte magnetische Kupplung wirkenden Drehmoments in Abhängigkeit von der Position der ersten Kupplung dargestellt.

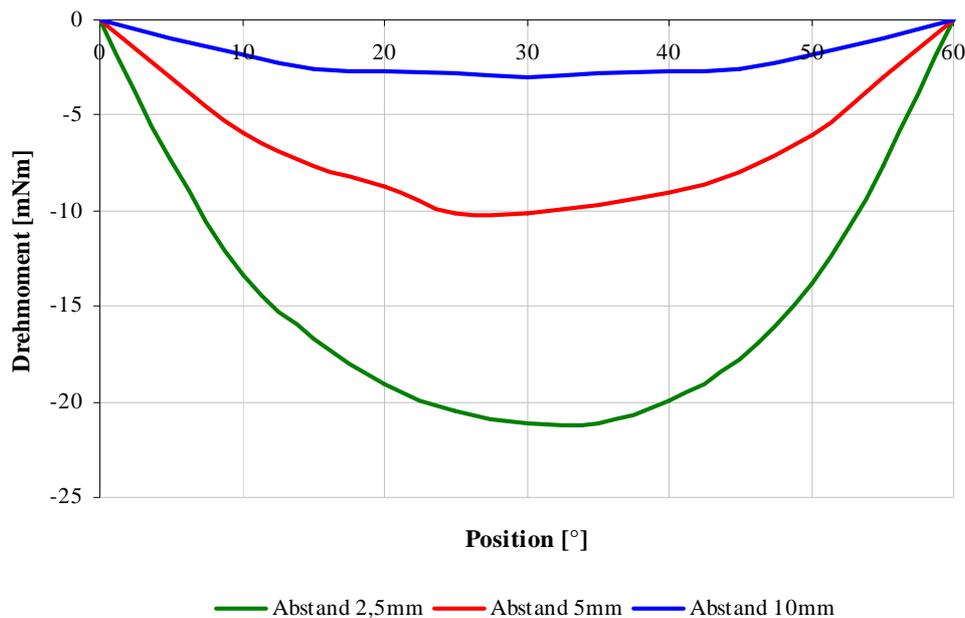


Abb. 5-12 Verlauf des auf die benachbarte magnetische Kupplung wirkenden Drehmoments in Abhängigkeit von der Drehposition der anderen Kupplung

Wie man dem Diagramm entnehmen kann, erfährt die feststehende magnetische Kupplung bei einem Abstand von 2,5 mm ein Drehmoment von 21 mNm. Bei der Konstruktion von solchen Systemen muss diese Auswirkung berücksichtigt und durch konstruktive Maßnahmen kompensiert werden.

Bei der Verwendung von magnetischen Kupplungen in Geräten mit manueller Betätigung werden die Drehknöpfe mit speziellen reibungserhöhenden Elementen ausgestattet. Diese Elemente sind zur Vermeidung einer ungewollten Verstellung der Drehknöpfe notwendig.

Sollen die magnetischen Kupplungen mittels Elektromotoren mit Getrieben (siehe Kapitel 8), betätigt werden, so wird bei der Auslegung des Getriebes seine Selbsthemmung ausgenutzt. Bei der Erhöhung des Abstands zwischen den Kupplungen auf 10 mm, beträgt das unerwünschte Drehmoment nur noch 3 mNm.

In der Abbildung 5-13 ist der Verlauf des auf die weichmagnetische Scheibe wirkenden Drehmoments dargestellt. Bei einem Abstand von 2,5 mm beträgt das auf die feststehende Klauenscheibe wirkende Drehmoment 1,2 mNm. Ob dies zu einer unerwünschten Verschiebung der optischen Elemente führt, hängt von der Lagerung dieses Bauteils ab. Eine Erhöhung des Abstands auf 10 mm hat eine Verringerung des Drehmoments auf 0,5 mNm zur Folge.

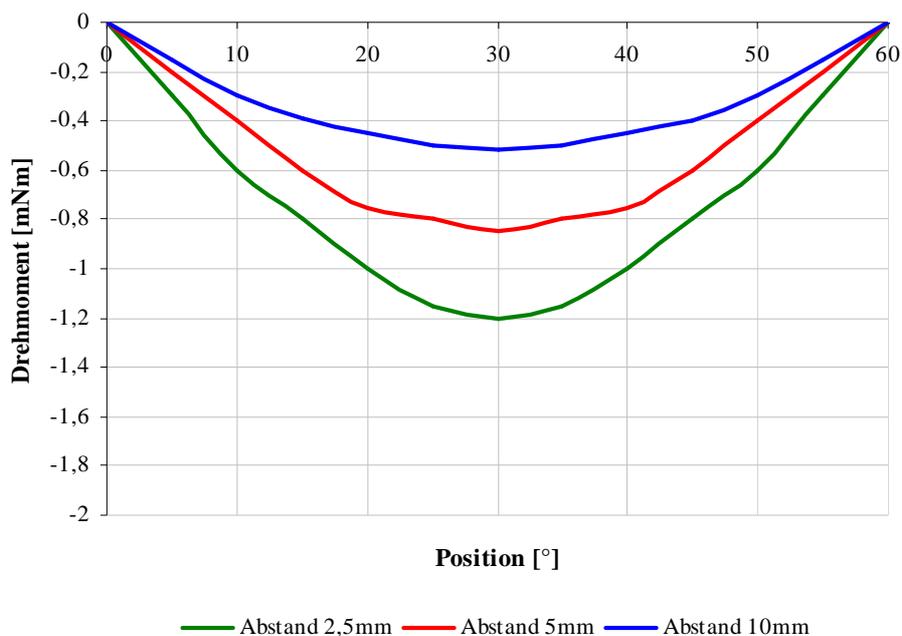


Abb. 5-13 Verlauf des auf die weichmagnetische Klauenscheibe wirkenden Drehmoments in Abhängigkeit von der Position der anderen Kupplung

6 Elektromagnetische Linearantriebe

Zur Erzeugung linearer Bewegungen werden neben rotatorischen Motoren mit nachgeschalteter Mechanik zur Umformung der Rotation in Translation heutzutage vielfach Linearantriebe verwendet. Die linearen Direktantriebe sind vor allem im Bezug auf die hohe Dynamik rotatorischen Antrieben deutlich überlegen.

Sie sind hier hohlzylindrisch gestaltet und liefern durch das Wegfallen der Umformungsmechanik einen platzsparenden Aufbau, was besonders bei sehr kleinen optischen Systemen, wie bei Chip-on-the-Tip-Endoskopen, besonders vorteilhaft ist.

Die folgenden Kapitel beschäftigen sich zunächst mit grundlegenden Betrachtungen zur optimalen Auslegung einfacher Linearantriebe, die bei Chip-on-the-Tip-Optiken verwendbar sind. Dann schließt sich die Erörterung verschiedener Bauformen an, da der Einsatzbereich (Fokus- oder Zoomantrieb) oder auch die jeweilige Auslegung des optischen Systems spezielle Anforderungen an die Parameter der Antriebe stellen.

6.1 Linearmotor mit permanentmagnetischer Selbsthaltung

Ein schematischer Aufbau eines Linearmotors mit permanentmagnetischer Selbsthaltung ist in der Abbildung 6-1 dargestellt. Wie man der Abbildung entnehmen kann, besteht der Linearantrieb aus zwei ringförmigen, axial magnetisierten Permanentmagneten und zwei Spulen.

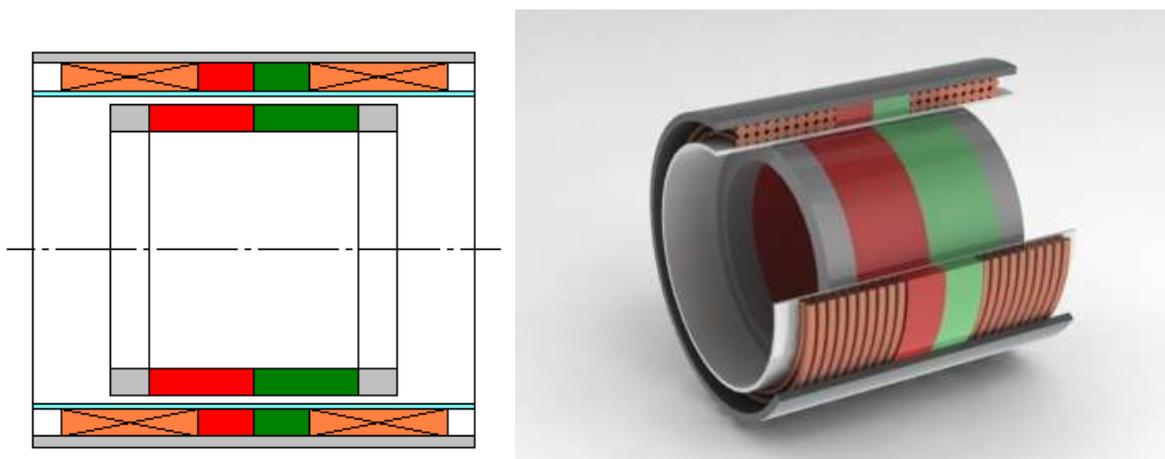


Abb. 6-1 Linearmotor mit permanentmagnetischer Selbsthaltung, schematischer Aufbau (links) und ein 3D-Modell im Schnitt (rechts)

Die Pole der Läufer- und Statorpermanentmagnete sind so angeordnet, dass zwischen ihnen bei Auslenkung eine abstoßende Kraft entsteht, so dass sich ein stabiler Gleichgewichtspunkt (Punkt P_0 in der Abbildung 6-2) für den Läufer in der Mitte des Stators einstellt.

Werden die Statorspulen bestromt, so wird der Läufer durch die entstehende Lorentzkraft aus der Mittelposition ausgelenkt, und es ergeben sich in Abhängigkeit von dem Betrag und der Richtung des elektrischen Stroms weitere stabile Punkte (Punkte P_1 und P_2 in der Abbildung 6-2) entlang der Achse. Damit ist die eindeutige Zuordnung der Position des Läufers in Abhängigkeit von dem elektrischen Strom möglich.

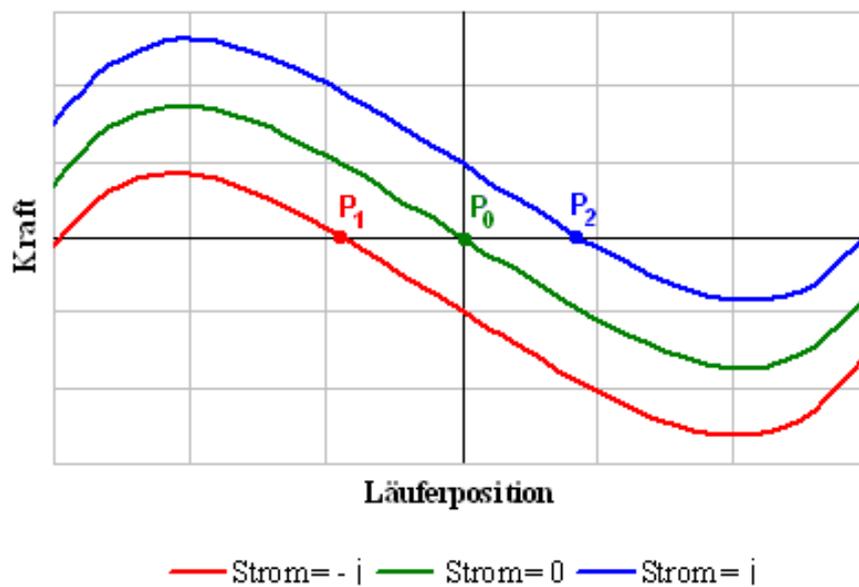


Abb. 6-2 Qualitativer Verlauf der Kraft-Weg-Kennlinie eines Linearmotors mit permanentmagnetischer Selbsthaltung

Die wichtigsten Parameter des Linearantriebs sind die Verfahrstrecke, die maximale Kraft und die Steifigkeit. Diese Werte hängen je nach Typ des Motors überwiegend von dem Längenverhältnis des Stator- und Läufermagneten ab. In der Abbildung 6-3 sind die Kraft-Weg-Kennlinien in Abhängigkeit der Magnetlängen dargestellt.

Wie man dem Diagramm entnehmen kann, bewirkt eine größere Länge des Läufermagneten eine Vergrößerung der maximalen Reluktanzkraft, da ein größeres Volumen magnetischer Energie zur Verfügung steht. Auch der Verfahrweg wird dadurch erhöht. Allerdings ist dieser Verbesserung, aufgrund der deutlichen Reduzierung der Steifigkeit im Bereich um den Nullpunkt, eine Grenze gesetzt. Die Absenkung der Steifigkeit würde in diesem Fall eine Verschlechterung der Positioniergenauigkeit um diesen Punkt zur Folge haben.

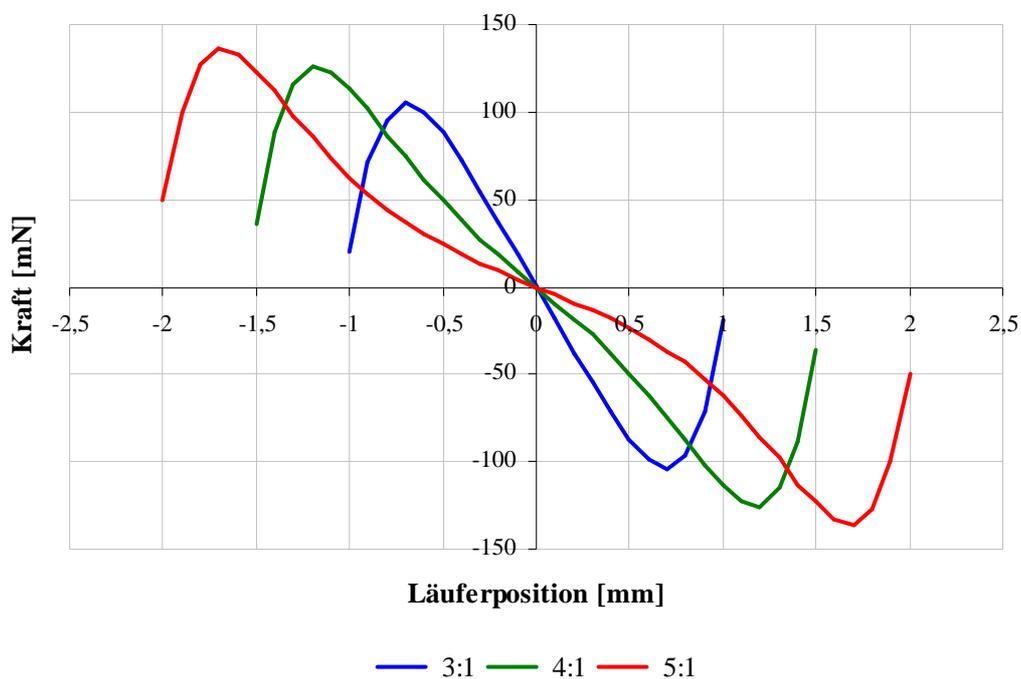


Abb. 6-3 Verhältnis der Länge des Läufermagneten zur Länge des Statormagneten

Die Betrachtung des Längenverhältnisses der Läufer- und Statormagneten hat gezeigt, dass dies sehr stark sowohl die entstehenden Kräfte als auch den maximalen Hub beeinflusst. Eine andere Möglichkeit die Kräfte zu ändern, besteht in der Balancierung der radialen Längen der beiden Permanentmagnete.

Dabei ist zu beachten, dass es günstiger ist, die radiale Dicke des Läufermagneten zu vergrößern. Bei der Vergrößerung des Statormagneten steigen die entsprechenden Reluktanzkräfte, allerdings wird dadurch mehr Leistung für die Spulen benötigt, um den Läufer über den gesamten Verfahrweg zu bewegen. Bei der Erhöhung der Dicke des Läufermagneten erhöht sich wie gefordert die Reluktanzkraft, aber auch die magnetische Flussdichte, die eine Steigerung der Lorentzkraft bewirkt.

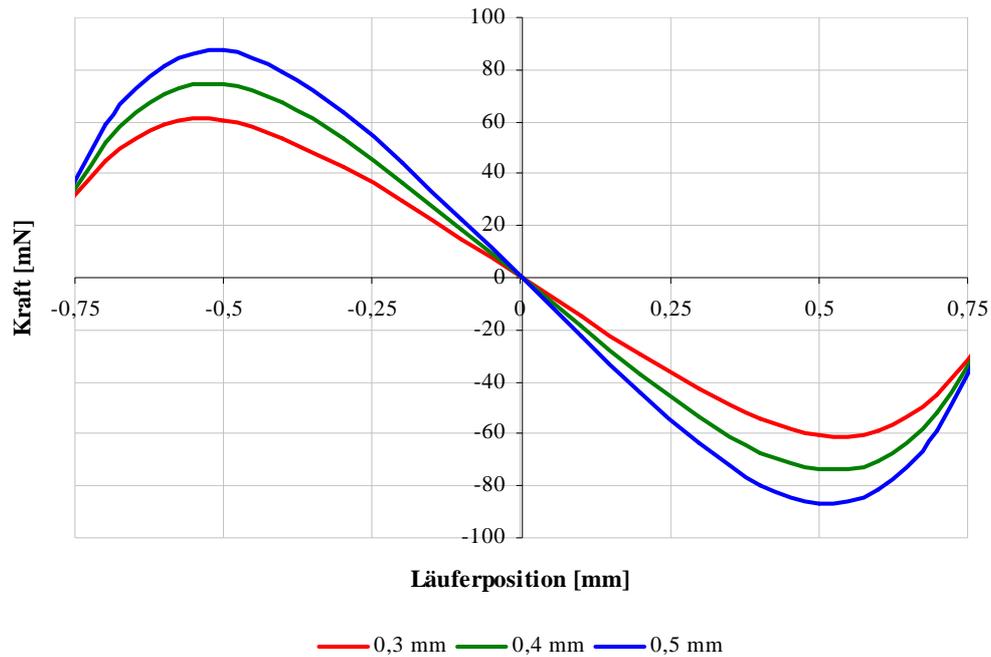


Abb. 6-4 Kraft-Weg-Verläufe für unterschiedliche radiale Längen des Läufermagneten

In der Abbildung 6-4 sind die Kraft-Weg-Verläufe für unterschiedliche radiale Längen des Läufermagneten dargestellt.

Wie man dem Funktionsprinzip des Linearmotors entnehmen kann, schließen sich beide permanentmagnetischen Kreise (magnetischer Kreis des Stator- und des Läufermagneten) über den weichmagnetischen Rückschluss. Dies führt zu einer hohen magnetischen Flussdichte in der Mitte des Rückschlusses, was zu einer Sättigung des weichmagnetischen Materials an dieser Stelle führen kann.

Um die Sättigung an dieser Stelle zu vermeiden, kann die radiale Dicke des Rückschlusses vergrößert werden. In der Abbildung 6-5 ist der Verlauf der Kraft-Weg-Kennlinie des Motors in Abhängigkeit von der Rückschlussdicke am Beispiel eines entwickelten Prototypen LMPS 3,5 x 1,0 dargestellt. In diesem Fall besteht der Rückschluss aus dem Automatenstahl mit einer Sättigung von ca. 1,6 Tesla (siehe Kapitel 4).

Wie man der Abbildung 6-5 entnehmen kann, führt eine Vergrößerung der Rückschlussdicke von 0,2 mm auf 0,3 mm zu einer Erhöhung der Reluktanzkraft von 46 mN auf 84 mN und zu einer Vergrößerung des Verfahrwegs von 0,85 mm auf 1,0 mm.

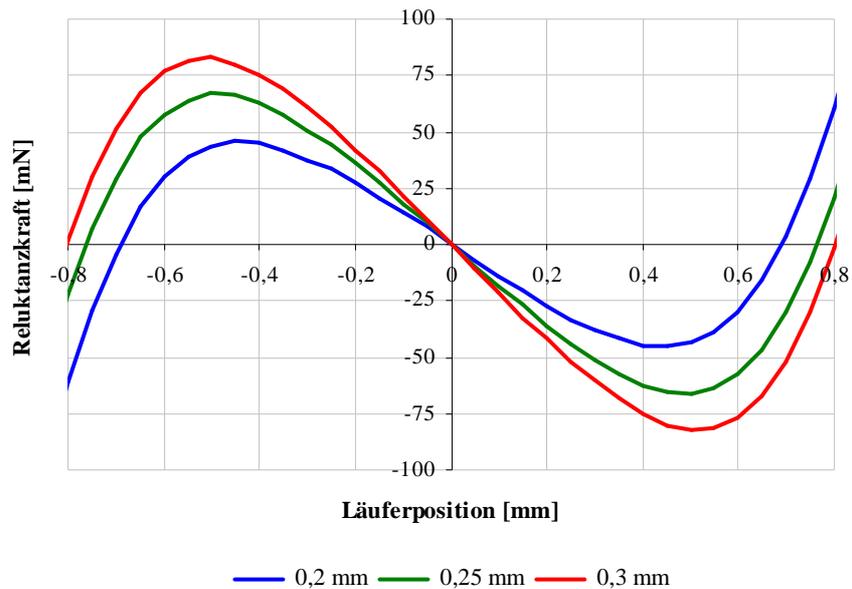


Abb. 6-5 Verlauf der Reluktanzkraft in Abhängigkeit von der Rückschlussdicke am Beispiel des Prototypen LMPS 3,5x1,0

Die Erhöhung der Rückschlussdicke steht allerdings in einem Widerspruch zu der angestrebten Miniaturisierung der Videomodule, die an der Endoskopspitze verbaut werden sollen. Eine Alternative die Sättigung zu vermeiden, bietet sich dadurch die Verwendung von hochsättigenden weichmagnetischen Werkstoffen, wie Silizium- oder Kobalteisen.

In der Abbildung 6-6 ist die Kraft-Weg-Kennlinie des Linearmotors in Abhängigkeit vom verwendeten Rückschlusswerkstoff dargestellt.

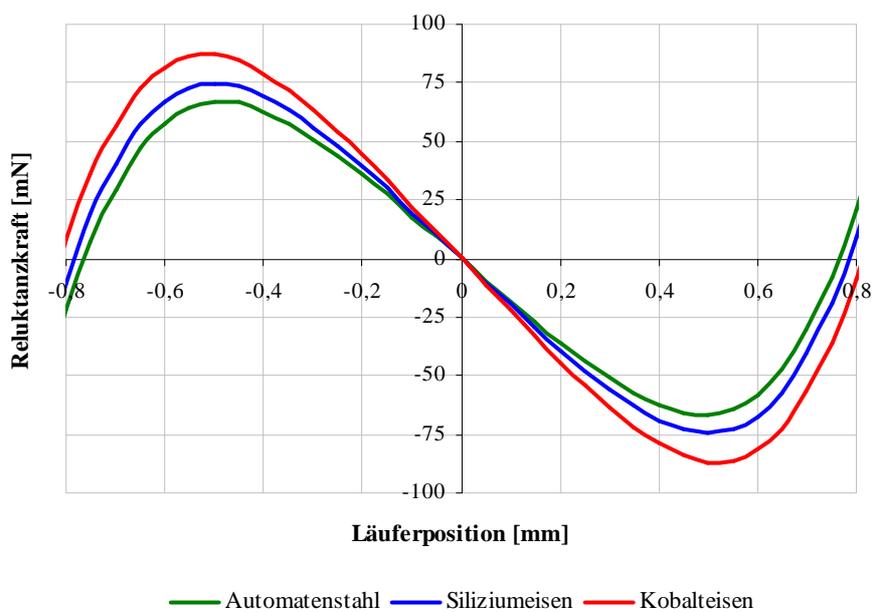


Abb. 6-6 Verlauf der Reluktanzkraft in Abhängigkeit von dem Rückschlusswerkstoff am Beispiel vom LMPS 3,5 x 1,0

Entwickelte Prototypen

Um die Funktionsfähigkeit dieses Linearantriebs zu untersuchen, wurden unterschiedliche Prototypen entwickelt. Im Weiteren werden diese detailliert beschrieben und die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen vorgestellt.

LMPS 7,6 x 3,2

Dieser Linearantrieb wurde für einen Einsatz in der proximalseitigen Kamera entwickelt, so dass seine geometrischen Abmaße größer sind als die bisherigen. Dieser Fakt führt zu einer deutlich höheren Trägheit als bei den anderen Motoren. Die Auswirkungen der erhöhten Trägheit auf das dynamische Verhalten wird im Weiteren anhand einiger Messungen gezeigt. Die wichtigsten Kennwerte dieses Linearantriebs sind nachfolgend tabellarisch zusammengefasst.

Stellweg Δx	Steifigkeit c	maximale Reluktanzkraft
3,4 mm	191,81 mN / mm	291,20 mN

geometrische Kennwerte

Innendurchmesser d_i	Außendurchmesser d_a	Länge des Linearantriebs
7,6 mm	13 mm	14,0 mm

elektrische Kennwerte

maximale Leistung P	Durchflutung je Spule θ	Füllfaktor der Spule
1,31 W	60 Ampère-Windungen	0,62

Tabelle 6-1 Kennwerte des Linearantriebs LMPS 7,6 x 3,2

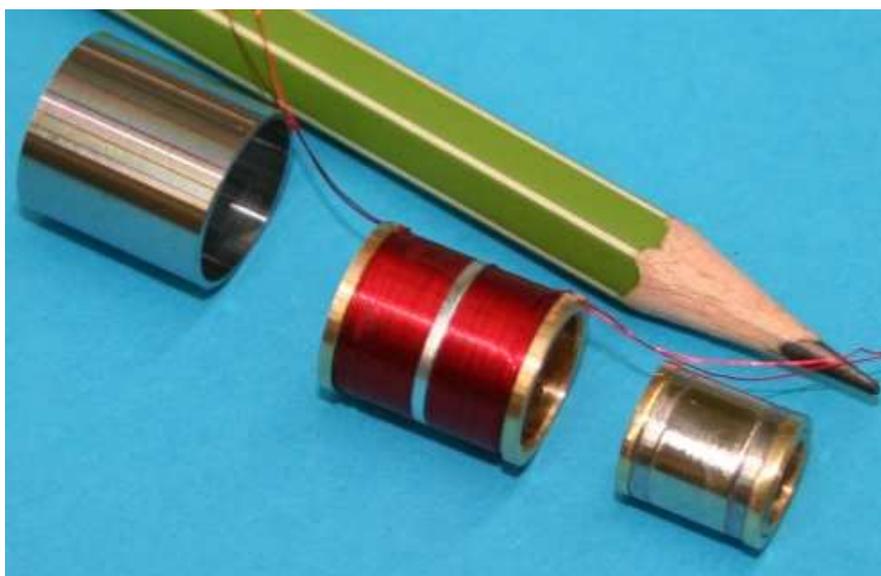


Abb. 6-7 Bauteile des Prototyps LMPS 7,6 x 3,2 vor der Endmontage

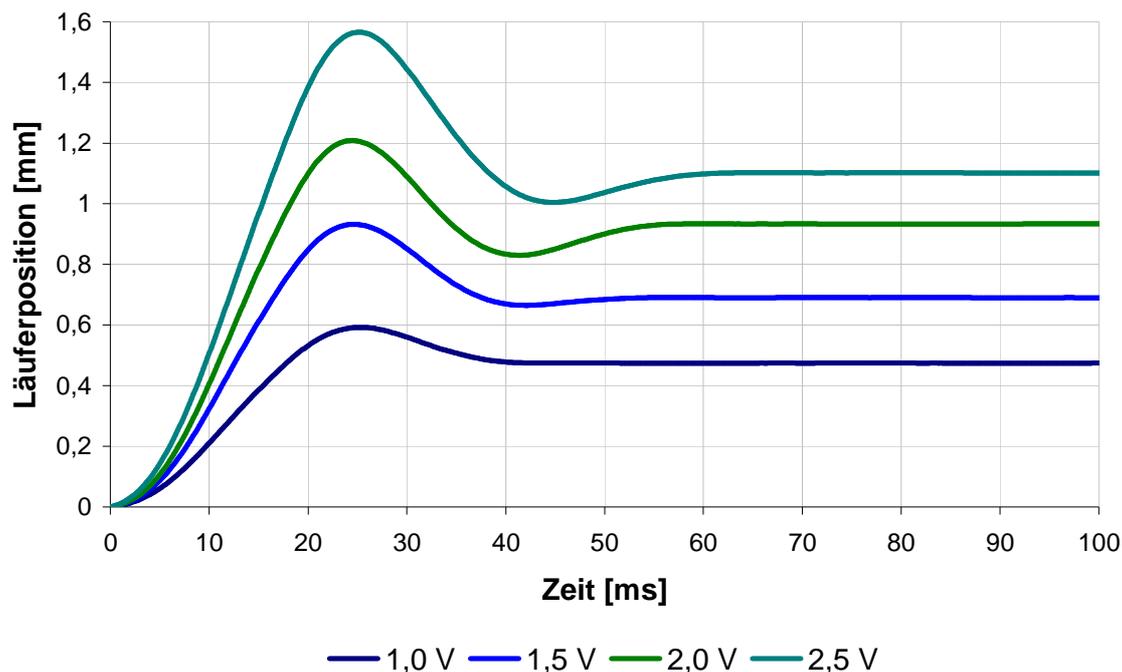


Abb. 6-8 Sprungantwort des Linearantriebs LMPS 7,6x3,2 für unterschiedliche Steuerspannungen

Für die Untersuchung des dynamischen Verhaltens des Linearantriebs wurden die Statorspulen mit unterschiedlichen Spannungen (von 1,0 V bis 2,5 V) beaufschlagt und die Sprungantwort des Läufers mittels eines Triangulationssensors aufgenommen. Die Ergebnisse der Messungen sind in der Abbildung 6-8 dargestellt.

Die Messungen zeigen, dass der Läufer das Verhalten eines schwingungsfähigen PT_2 -Glieds aufweist und eine Zeit zwischen 40 ms und 60 ms braucht, um die gewünschte Position zu erreichen. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Überschwingen des Läufers beim Anfahren einer Position stark von der Ansteuerungsspannung abhängig ist. Bei einer Spannung von 2,5 V und einer Sollposition von 1,1 mm liegt das Maximum der Amplitude bei fast 1,6 mm, was etwa einer Überschwingung von ca. 45 Prozent entspricht. Bei diesen Versuchen weist die Ansteuerungsspannung die Form einer Stufenfunktion auf. Möchte man das unerwünschte Überschwingverhalten beseitigen, so ließe sich dies durch die Verwendung einer rampenförmigen Spannung erreichen.

Die Versuche wurden an einem beidseitig offenen Stator durchgeführt, wodurch die Luft aus beiden Seiten der Gleithülse entweichen konnte und somit keine dämpfende Wirkung ausübte. Wird die Statorhülse von beiden Seite abgeschlossen, so kann die Luft während der Läuferbewegung nicht entweichen.

In der Abbildung 6-9 ist die Sprungantwort des Läufers im offenen und im geschlossenen Zustand dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Luftdämpfung günstig auswirkt. In diesem Fall erreicht der Läufer seine Position sogar schneller als im ungedämpften Zustand.

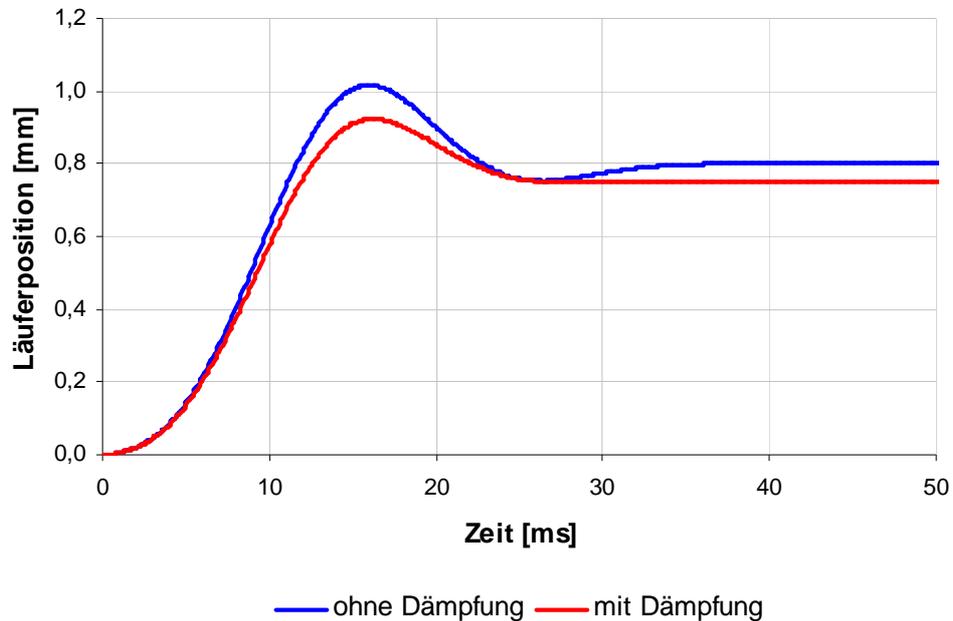


Abb. 6-9 Sprungantwort des Linearantriebs LMPS 7,6 x 3,2 ohne und mit Dämpfung

Einer ausführlichen Charakterisierung des dynamischen Verhaltens des Linearmotors dient der Amplitudenfrequenzgang. In der Abbildung 6-10 ist daher das Bode-Diagramm des aufgebauten Prototypen dargestellt.

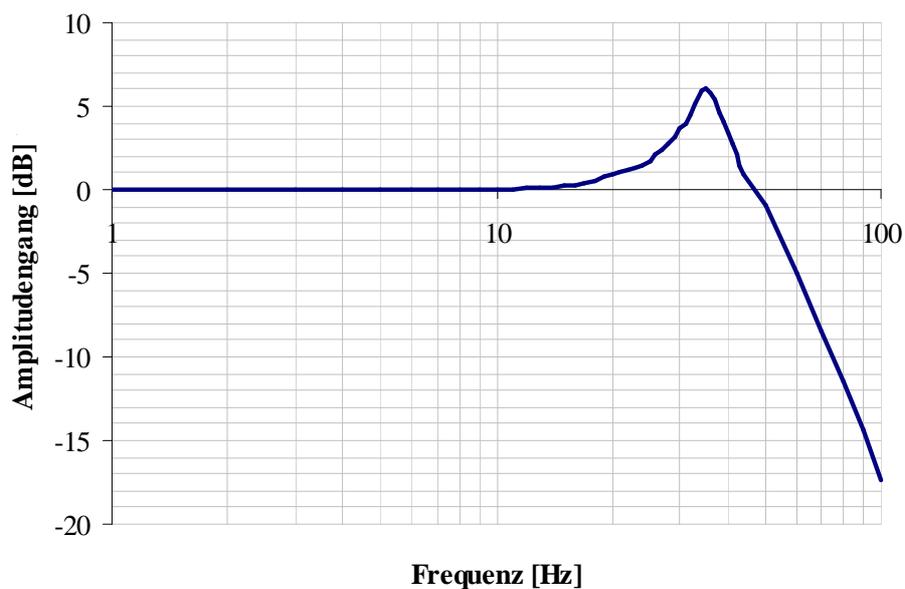


Abb. 6-10 Amplitudenfrequenzgang des Prototypen LMPS 7,6 x 3,2

Für die Aufnahme der Amplitudengang wurden die Spulen mit einer sinusförmigen Spannung variabler Frequenz beaufschlagt. Bis zu einer Frequenz von 12 Hz folgt der Läufer dem Ansteuerungssignal. Die Resonanzfrequenz ist bei ca. 34 Hz zu verzeichnen. Oberhalb der Resonanzfrequenz nimmt die Amplitude mit etwa 60 dB / Dekade ab. Die Grenzfrequenz liegt im Bereich von ca. 54 Hz.

In der Abbildung 6-11 (oben) ist die Wegkennlinie des Linearantriebs in Abhängigkeit von der Ansteuerungsspannung dargestellt. Dabei wird der Läufer durch die Änderung der Ansteuerungsspannung zwischen $\pm 3,5$ V über den gesamten Weg von $\pm 1,6$ mm verfahren. Wie man dem Diagramm entnehmen kann, hat die Kennlinie die Form einer Hysterese, die aufgrund der Reibungsverluste zwischen den Gleitringen des Läufers und der Gleithülse des Stators entsteht. Die Breite der Hysterese um den Nullpunkt beträgt ca. $65 \mu\text{m}$.

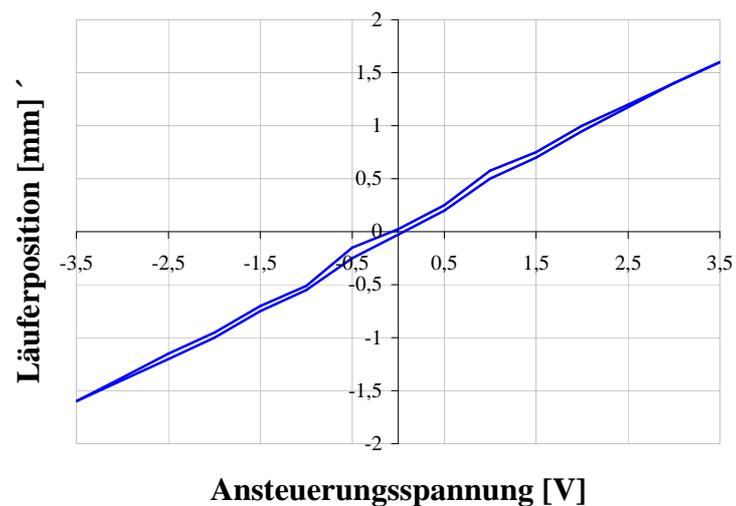
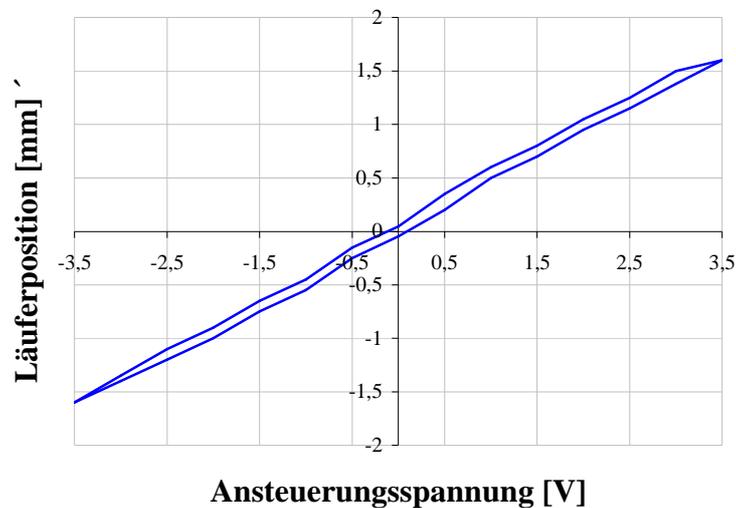


Abb. 6-11 Wegkennlinie des Linearantriebs in Abhängigkeit von der Ansteuerungsspannung ohne (oben) und mit überlagerter hochfrequenter Schwingung (unten)

Durch Verwendung von speziellen Beschichtungen, wie z.B. DLC, lassen sich die Reibungsverluste reduzieren, wodurch die Positioniergenauigkeit erhöht wird.

Eine weitere Möglichkeit, das Hystereseverhalten zu reduzieren, besteht in der Überlagerung des Ansteuerungssignals mit einer hochfrequenter Schwingung kleiner Amplitude. Durch diese Schwingung wird die Haftreibung zwischen dem Läufer und der Gleithülse gebrochen. In der Abbildung 6-11 (unten) ist die Spannung-Weg-Kennlinie des Linearantriebs mit einer zusätzlichen sinusförmigen Schwingung mit der Frequenz von 100 Hz und einer Amplitude von 0,5 V überlagert. Es ist zu erkennen, dass dadurch die Hysterese schmaler wird, die Streuungswerte um den Nullpunkt betragen dabei nur 25 μm .

LMPS 3,5 x 1,0

Dieser Prototyp wurde für den Einsatz in Videoobjektiven an der Endoskopspitze aufgebaut und weist für diese Art von optischen Systemen einen typischen Verfahrensweg von 1,0 mm auf. Wie man der Kraft-Weg-Kennlinie aus der Abbildung 6-12 entnehmen kann, besitzt er eine Maximalkraft von 86,3 mN und eine sehr hohe Steifigkeit von 172,6 mN / mm bei einer relativ geringen Gesamtleistung von nur 0,61 W (0,305 W pro Spule).

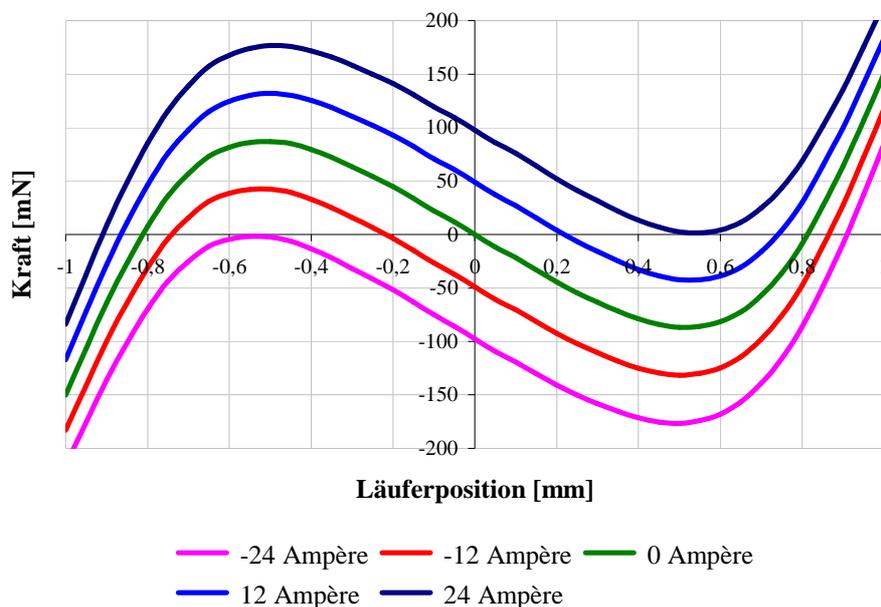


Abb. 6-12 Kraft-Weg-Kennlinie des Linearantriebs LMPS 3.5x1.0

Die wichtigsten Kennwerte des Linearantriebs LMPS 3,5 x 1,0 sind nachfolgend tabellarisch zusammengefasst.

Stellweg Δx	Steifigkeit c	maximale Reluktanzkraft
1,0 mm	172,6 mN / mm	86,3 mN

geometrische Kennwerte

Innendurchmesser d_i	Außendurchmesser d_a	Länge des Linearantriebs
3,5 mm	6,5 mm	7,4 mm

elektrische Kennwerte

maximale Leistung P	Durchflutung je Spule θ	Füllfaktor der Spule
0,61 W	24 Ampère-Windungen	0,49

Tabelle 6-2 Kennwerte des Linearantriebs LMPS 3,5 x 1,0

LMPS 3,5 x 2,0

Dieser Prototyp wurde auf der Basis des vorherigen aufgebaut, wobei durch die Vergrößerung der Länge des Läufermagneten eine Verdopplung der Verfahrstrecke erreicht wurde. Allerdings wird dadurch die Steifigkeit des Linearantriebs von 172,6 mN / mm auf 89,4 mN / mm verkleinert.

Die wichtigsten Kennwerte des Linearantriebs LMPS 3,5 x 2,0 sind nachfolgend tabellarisch zusammengefasst.

Stellweg Δx	Steifigkeit c	maximale Reluktanzkraft
2,0 mm	89,4 mN / mm	89,4 mN

geometrische Kennwerte

Innendurchmesser d_i	Außendurchmesser d_a	Länge des Linearantriebs
3,5 mm	6,4 mm	9,6 mm

elektrische Kennwerte

Maximale Leistung P	Durchflutung je Spule θ	Füllfaktor der Spule
0,84 W	32 Ampère-Windungen	0,50

Tabelle 6-3 Kennwerte des Linearantriebs LMPS 3,5 x 2,0

Die gemessene Sprungantwort (siehe Abbildung 6-13) des Linearantriebs zeigt, dass aufgrund der kleineren Masse des Läufers im Vergleich zum größeren LMPS 7,6x3,2 die Positionierung schneller (34 ms im ungedämpften und 22 ms im gedämpften Zustand) erfolgt.

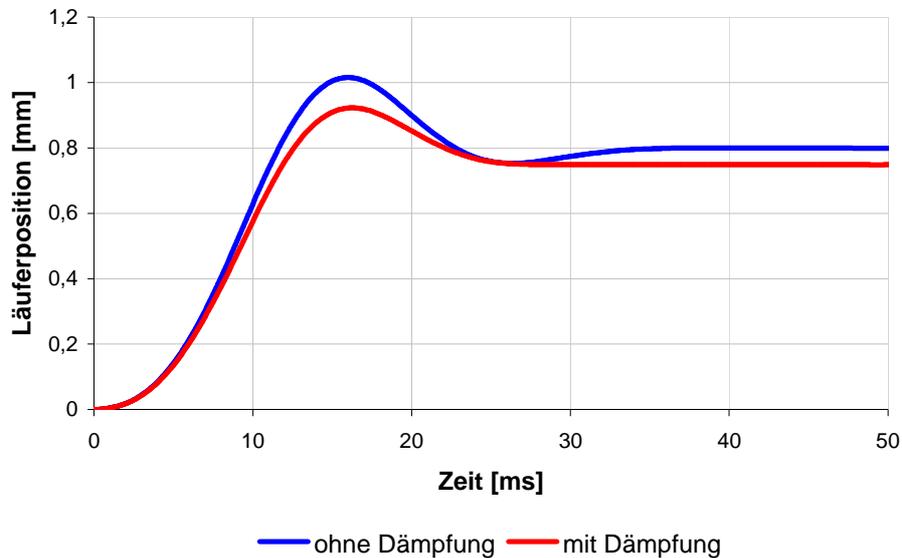


Abb. 6-13 Sprungantwort des Linearantriebs ohne und mit Dämpfung LMPS 3, 5 x 2,0

Die Auswirkung der kleineren Masse ist auch bei der Betrachtung des Amplitudengangs (siehe Abbildung 6-14) zu sehen. Die Grenzfrequenz liegt bei ca. 70 Hz, gegenüber den 54 Hz des größeren LMPS 7,6 x 3,2. Die Amplitude nimmt oberhalb der Resonanzfrequenz von ca. 45 Hz mit etwa 40dB/Dekade ab.

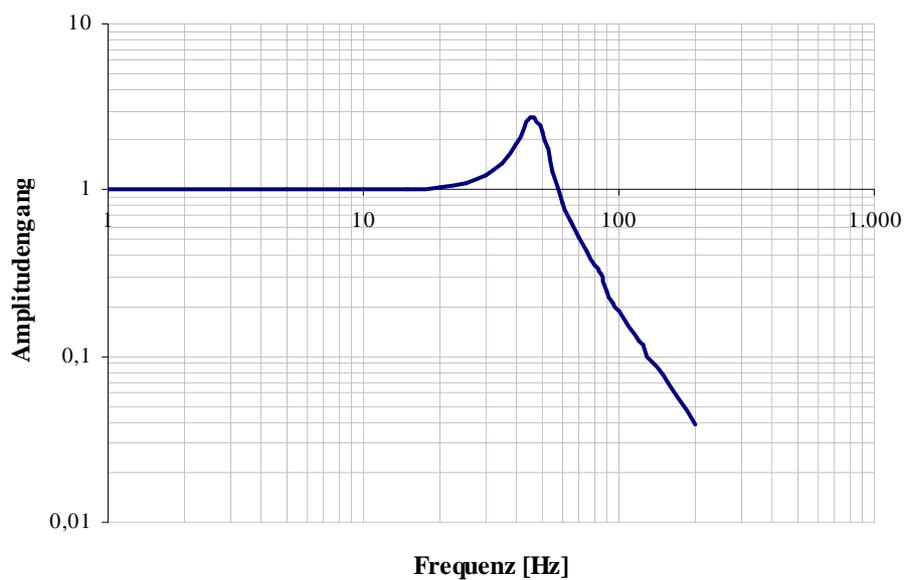


Abb. 6-14 Amplitudenfrequenzgang des Prototyps LMPS 3,5 x 2,0

Um die Produktreife dieses Linearantriebs zu demonstrieren, wurde er einem Langzeitversuch unterzogen. Nach insgesamt 1.000.000 Zyklen, die der Läufer zurücklegte, wurde keine Beeinträchtigung der Funktionsweise des Linearantriebs festgestellt.

6.2 Reluktanz- und Lorentzkraft- betriebener Linearantrieb

Die Funktionsweise des folgenden Linearantriebs basiert auf der Überlagerung von Reluktanz- und Lorentzkraft. Der grundsätzliche Aufbau des Aktors ist in der Abbildung 6-15 schematisch dargestellt.

Der Läufer des Linearmotors besteht aus einem weichmagnetischen Polschuh, zwischen zwei entgegen gesetzt axial magnetisierten Permanentmagneten. Der Läufer ist in einer Gleithülse aus nichtferromagnetischem Material gelagert. Der Rückschluss des Motors und der Läufer sind von gleicher axialer Länge, so dass sich der permanentmagnetische Läufer aufgrund der Reluktanzkräfte im Rückschluss automatisch zentriert. Durch die Bestromung der Statorspule, die vom magnetischen Fluss durchsetzt wird, entsteht die Lorentzkraft, so dass sich dieser entlang der Mittelachse kontinuierlich verschieben lässt.

Kennzeichnend für diesen Linearantrieb ist der besonders einfache Aufbau, wodurch er sich für den Einsatz in den kleinen Chip-on-the-Tip-Modulen hervorragend miniaturisieren lässt.

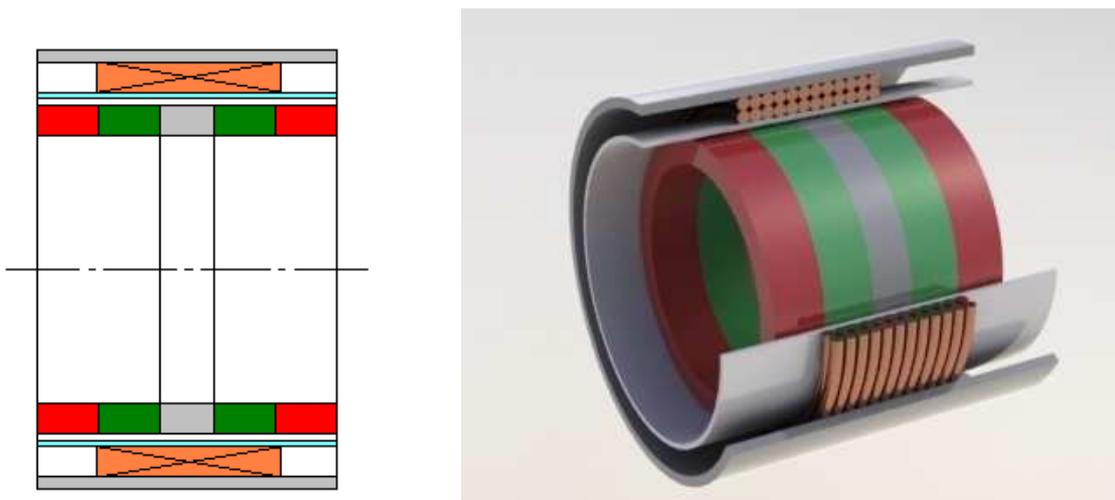


Abb. 6-15 Reluktanz- und Lorentzkraft- betriebener Linearantrieb, schematischer Aufbau (links) und ein 3D-Modell im Schnitt (rechts)

In der Beschreibung der Funktionsweise des Linearantriebs wurde vorausgesetzt, dass der Läufer und der weichmagnetische Rückschluss gleich lang sein sollen. Eine Verlängerung des Rückschlusses führt allerdings nicht zwangsläufig zum Versagen des Motorprinzips. Eine geringfügige Vergrößerung des Rückschlusses bewirkt sogar eine Verbesserung der Antriebskennwerte.

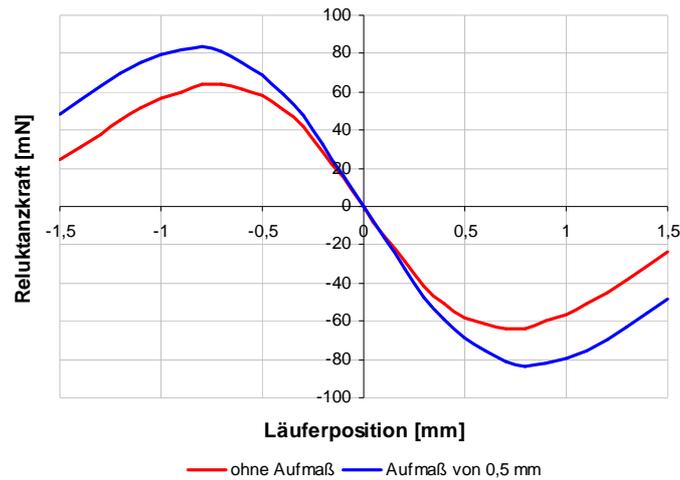


Abb. 6-16 Kraft-Weg-Kennlinie des Linearantriebs RLLA 3,5 x 1,0 mit und ohne Rückschlussaufmaß

In der Abbildung 6-16 ist die Reluktanzkraft am Beispiel des entwickelten Linearantriebs RLLA 3,5 x 1,0 ohne- und mit einem Rückschlussaufmaß von 0,5 mm dargestellt. Durch ein Aufmaß von 0,5 mm erreicht man eine Vergrößerung der Reluktanzkraft von 64 mN auf 83 mN, sowie eine höhere Steilheit. Außerdem ist eine Hubvergrößerung von 0,7 mm auf 0,8 mm zu verzeichnen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die Verlängerung des Rückschlusses der magnetische Widerstand des permanentmagnetischen Kreises sinkt. Die Abbildung 6-17 zeigt die magnetische Induktion und den magnetischen Fluss des Linearantriebs mit und ohne Rückschlussaufmaß. Wie man der Abbildung entnehmen kann, verringern sich durch die Verlängerung des weichmagnetischen Rückschlusses die Streufelder, und die Flusslinien der Permanentmagnete verlaufen gebündelt durch den Luftspalt.

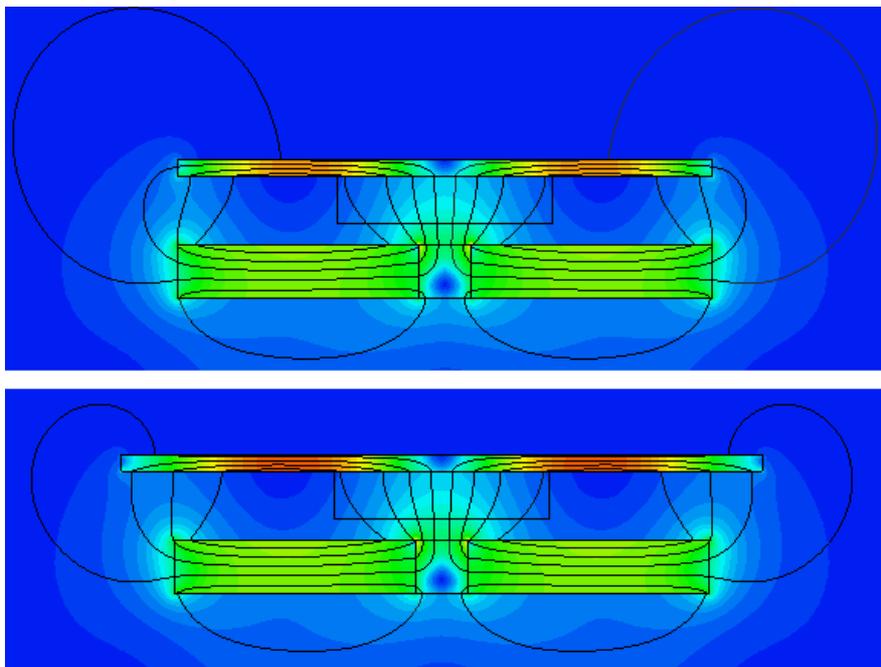


Abb. 6-17 Magnetische Induktion und magnetischer Fluss des Linearantriebs RLLA 3,5 x 1,0 mit und ohne Rückschlussaufmaß

Eine weitere Verbesserung des Kraft-Weg-Verhaltens ist nicht möglich, da eine weitere Rückschlussverlängerung die Steigung der Kennlinie um den Nullpunkt vermindert (siehe Abbildung 6-18), was die Positionierung des Läufers in mittlerer Stellung erschwert.

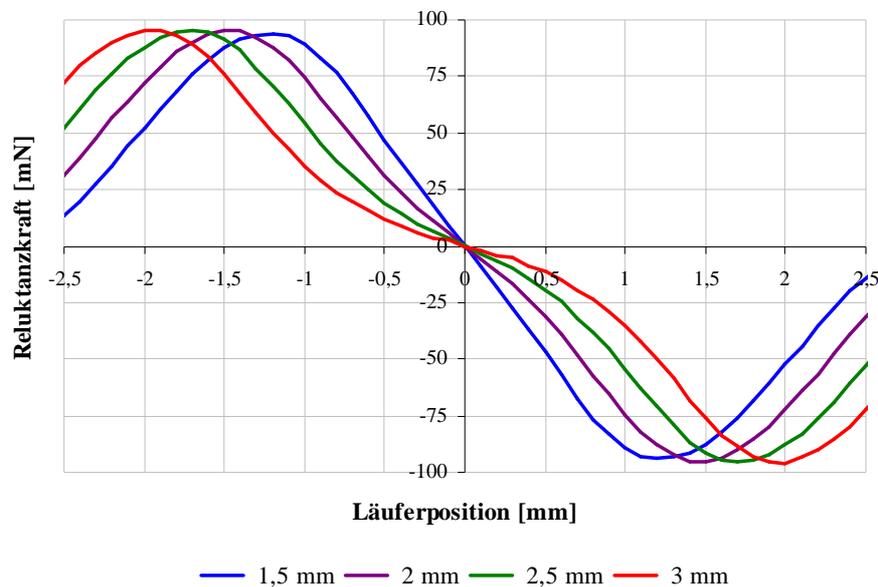


Abb. 6-18 Auswirkungen der Verlängerung des Rückschlusses auf die Kraft-Weg-Kennlinie am Beispiel des Prototypen RLLA 3,5 x 2,2

Wie bereits bei der theoretischen Betrachtung der Linearantriebe erwähnt, ist einer der wichtigen Parameter bei der Auslegung dieser Art der Aktoren der Luftspalt zwischen dem weichmagnetischen Läuferpolschuh und dem Rückschluss. Bei dem Reluktanz- und Lorentzkraftbetriebenen Linearantrieb ist der Spalt im permanentmagnetischen Kreis für die kontinuierliche Verschiebung des Läufers von großer Bedeutung, da dadurch die Reluktanzkraft eingestellt wird. In der Abbildung 6-19 sind die Kraft-Weg-Verläufe für unterschiedliche Spaltgrößen dargestellt.

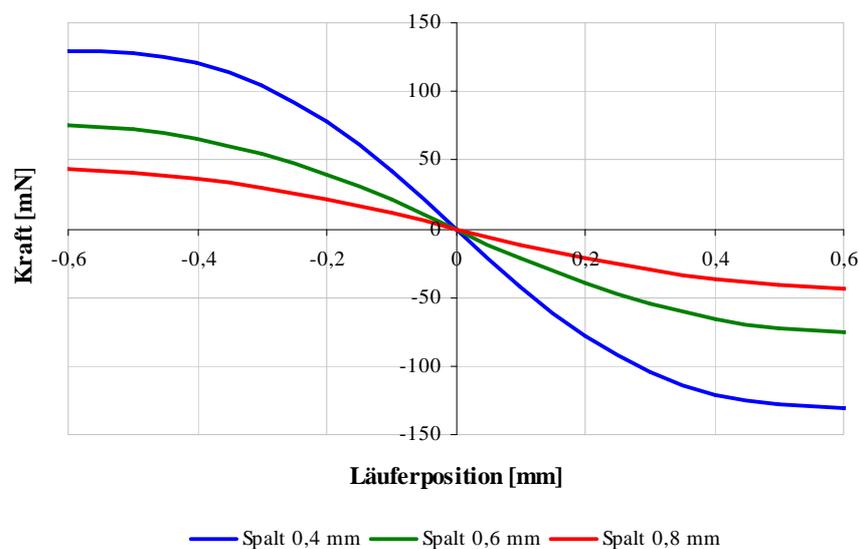


Abb. 6-19 Kraft-Weg-Verläufe für unterschiedliche Spaltgrößen

Entwickelte Prototypen

Aufgrund des sehr einfachen Aufbaus eignet sich der vorgestellte Linearantrieb besonders gut für miniaturisierte Optiken mit einem distal angeordneten Bildaufnehmer. Aus diesem Grund wurden zwei Prototypen des Aktors für diese Anwendungen entwickelt. Die beiden Prototypen unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Länge der eingesetzten Permanentmagnete und folglich durch den realisierbaren Hub. Nachfolgend sind die wichtigsten Eckdaten der beiden Motoren aufgelistet (siehe Tabelle 6-4 und 6-5).

RLLA 3,5 x 1,0

Dieser Prototyp des Linearantriebs wurde für die Anwendung in einem 10 mm-Chip-on-the-Tip-Endoskop entwickelt. Er verfügt über einen axialen Hub von einem Millimeter und einer hohen Steifigkeit von ca. 180 mN / mm. Die berechneten Kraft-Weg-Kennlinien sind in der Abbildung 6-20 dargestellt.

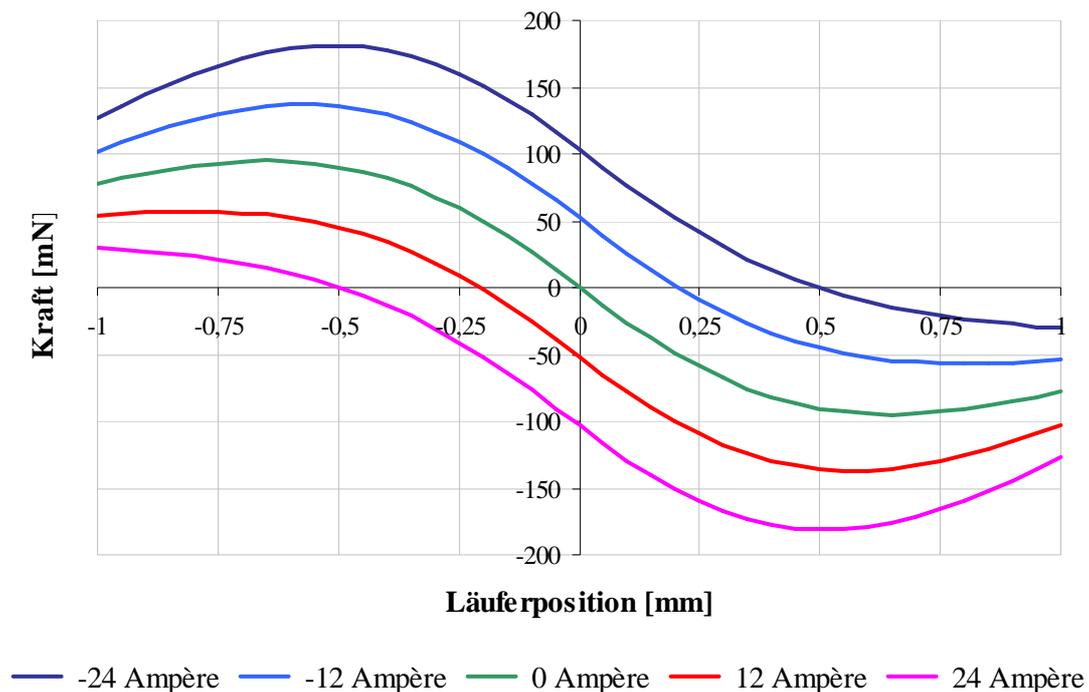


Abb. 6-20 Kraft-Weg-Kennlinie des Linearantriebs RLLA 3,5 x 1,0

Stellweg Δx	Steifigkeit c	maximale Reluktanzkraft
1,0 mm	180,28 mN / mm	92 mN

geometrische Kennwerte

Innendurchmesser d_i	Außendurchmesser d_a	Länge des Linearantriebs
3,5 mm	6,1 mm	5,0 mm

elektrische Kennwerte

maximale Leistung P	Durchflutung der Spule θ	Füllfaktor der Spule
0,43 W	34 Ampère-Windungen	0,49

Tabelle 6-4 Kennwerte des entwickelten Linearantriebs RLLA 3,5 x 1,0

RLLA 3,5 x 2,2

Bei diesem Prototyp handelt sich um eine Weiterentwicklung des vorherigen Linearantriebs. Durch die Verlängerung des weichmagnetischen Rückschlusses wurde der Stellweg auf 2,2 mm erhöht. Allerdings wurde damit die Steifigkeit der Kraft-Weg-Kennlinie halbiert, was zu einer Verminderung der Positioniergenauigkeit führt.

Stellweg Δx	Steifigkeit c	maximale Reluktanzkraft
2,2 mm	89,27 mN / mm	93,67 mN

geometrische Kennwerte

Innendurchmesser d_i	Außendurchmesser d_a	Länge des Linearantriebs
3,5 mm	6,5 mm	7,0 mm

elektrische Kennwerte

maximale Leistung P	Durchflutung der Spule θ	Füllfaktor der Spule
0,85 W	48 Ampère-Windungen	0,50

Tabelle 6-5 Kennwerte des Linearantriebs RLLA 3,5 x 2,2

6.3 Linearantrieb mit zweiphasiger Spulenbestromung

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt wurde, basiert der maximal erreichbare Verfahrweg auf dem Verhältnis zwischen der Läuferlänge und der Länge des weichmagnetischen Rückschlusses. Durch die Erhöhung des Rückschlussmaßes lässt sich der Hub des Aktors vergrößern, allerdings wird dadurch die Motorsteifigkeit vermindert. Das bedeutet, dass diese zwei wesentlichen Parameter nicht unabhängig voneinander variiert werden können. Dieses Problem kann durch die Verwendung einer zweiphasigen Spulenansteuerung gelöst werden.

Die Statorspule wird dazu in der Mitte in zwei Teile geteilt (siehe Abbildung 6-21). Eine zusätzliche Erweiterung des Aufbaus betrifft die seitlich angebrachten weichmagnetischen Läuferpolschuhe.

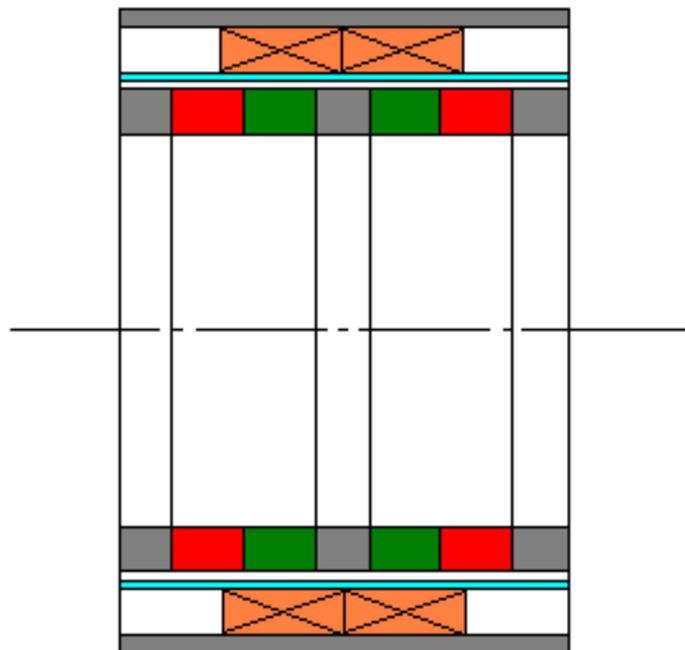


Abb. 6-21 Aufbau eines Reluktanz- und Lorentzkraft- betriebenen Linearantriebs mit zweiphasiger Spulenansteuerung

In der mittlerer Stellung des Läufers werden die beiden Spulen entgegengesetzt bestromt, so dass der Läufer zusätzlich zur Reluktanzkraft entgegengesetzte Lorentzkräfte erfährt, die ihn in die Mitte treiben und damit die zentrierende Reluktanzkraft unterstützen, dadurch steigt die Motorsteifigkeit um den Nullpunkt.

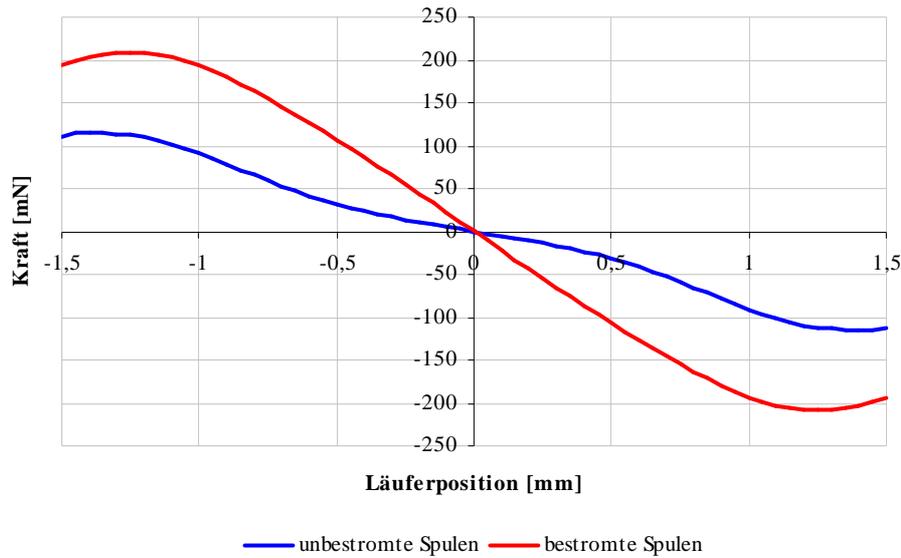


Abb. 6-22 Kraft-Weg-Kennlinien des Linearantriebs mit unbestromten und bestromten Spulen

In der Abbildung 6-22 sind die Kraft-Weg-Kennlinien des Linearantriebs ohne Bestromung der Spulen, resultierend nur aus der Reluktanzkraft und mit den bestromten Spulen dargestellt.

Mittels der zweiphasigen Ansteuerung ist es möglich, nicht nur die Kraft-Weg-Kennlinie um den Nullpunkt zu beeinflussen, sondern auch das Verhalten des Linearantriebs auf der gesamten Verfahrstrecke zu verbessern. Um den Läufer entlang der Achse zu verschieben, wird je nach Richtung der Bewegung eine der Spulenspannungen kontinuierlich bis auf Null verringert und dann wieder mit umgekehrtem Vorzeichen erhöht.

Der Stromverlauf einer zweiphasigen Spulenansteuerung in Abhängigkeit von der Läuferposition ist in der Abbildung 6-23 dargestellt.

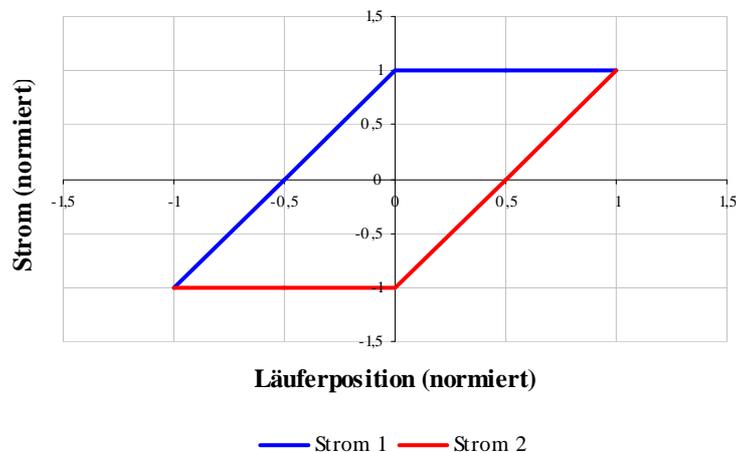


Abb. 6-23 Signalverlauf einer zweiphasigen Spulenansteuerung

In der Abbildung 6-24 sind die Kraft-Weg-Kennlinien des Linearantriebs bei einer zweiphasigen Spulenbestromung dargestellt. Blaue Kurven stellen die Kraft-Weg-Verläufe bei konstantem Strom der ersten Spule dar, die roten bei konstantem Strom der zweiten Spule. Wie man dem Diagramm entnehmen kann, bewirkt diese Art der Ansteuerung eine deutliche Vergrößerung des Verfahrwegs (vgl. RLLA 3,5 x 1,0) bei gleichzeitiger Beibehaltung der Motorsteifigkeit für eine präzise Positionierung.

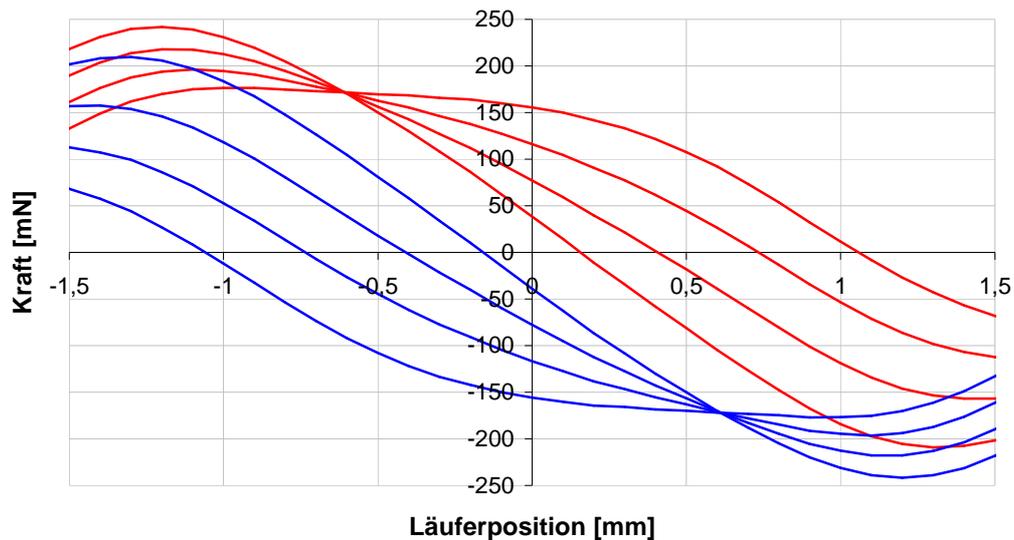


Abb. 6-24 Kraft-Weg-Kennlinien des Linearantriebs bei einer zweiphasigen Spulenbestromung

Die zweiphasige Ansteuerung verbessert die Funktionsweise des Linearantriebs, allerdings wird dadurch der Aufbau komplizierter. Aus diesem Grund ist der Einsatz dieser Ansteuerung nur dann vorteilhaft, wenn größere Verfahrwege für die Verschiebung der optischen Komponenten notwendig sind, wie es mit der einphasigen Ansteuerung nicht möglich ist.

6.4 Bistabile Linearantriebe

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Linearantrieben, bei denen der Läufer über den gesamten Verfahrweg kontinuierlich positioniert werden kann, verfügen die bistabilen Linearantriebe nur über zwei diskrete Positionen des Läufers. Ein großer Vorteil dieser Linearantriebe besteht jedoch in der Selbsthaltung des Läufers in den stabilen Positionen, auch im stromlosen Zustand, wodurch die Verlustleistung und die damit entstehende Wärme beträchtlich reduziert wird. In der Abbildung 6-25 sind Prinzipskizzen der bistabilen Motoren dargestellt.

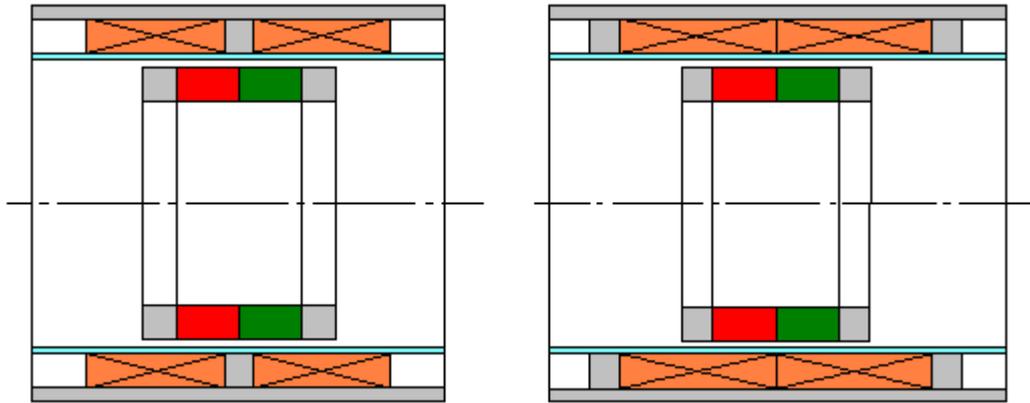


Abb. 6-25 Bistabiler Linearantrieb mit einem Statorpolschuh (links) und zwei Statorpolschuhen (rechts)

6.4.1 Bistabiler Linearantrieb mit einem Statorpolschuh

Diese Variante des Linearantriebs enthält einen Polschuh, der zwischen den Statorspulen platziert wird. Die Flusslinien des Permanentmagneten durchlaufen die beiden Polschuhe, die seitlich am Magneten befestigt sind und schließen sich über das Rückschlussrohr. Ein Teil der Flusslinien verläuft auch über den Polschuh zwischen den Spulen. Steht der Läufer genau in der Mittelstellung, so befindet er sich im labilen Gleichgewicht.

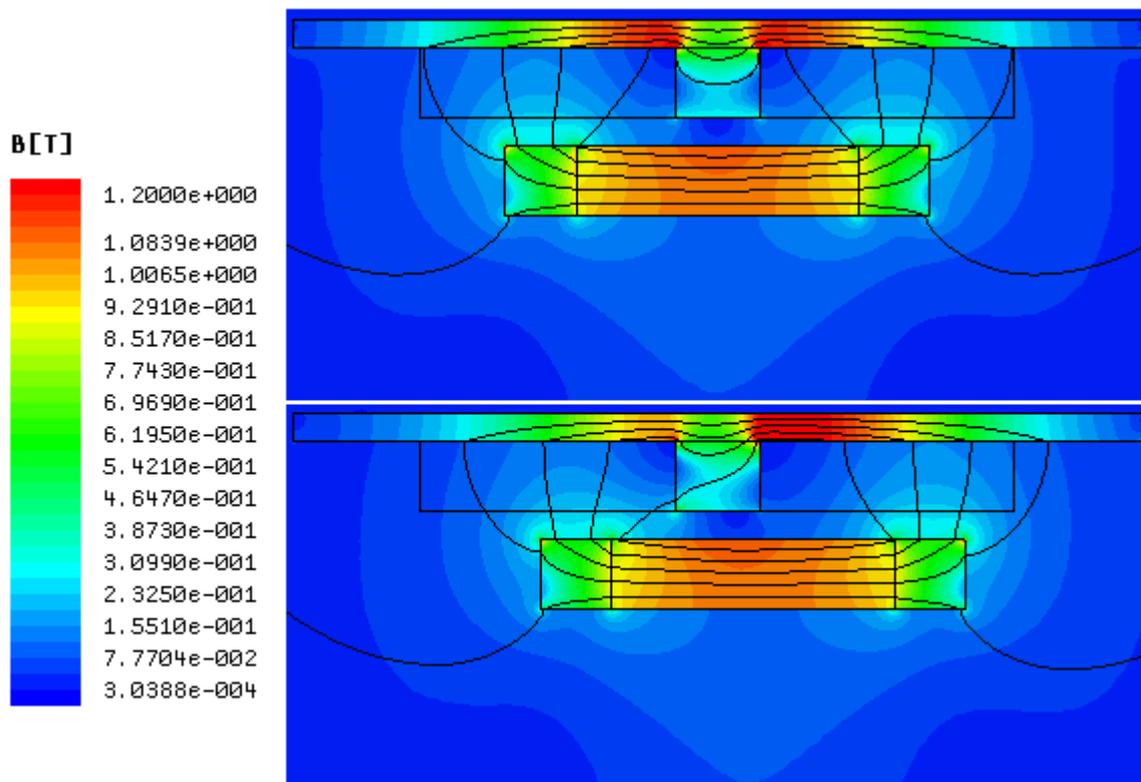


Abb. 6-26 Magnetische Induktion und Feldlinienverlauf bei mittlerer (oben) und ausgelenkter Stellung des Läufers (unten)

Eine kleine longitudinale Auslenkung aus dieser Stellung führt dazu, dass der Läufer eine Reluktanzkraft erfährt, die eine weitere Bewegung in diese Richtung zur Folge hat, bis der linke Polschuh des Läufers genau unter dem Statorpolschuh steht. Diese Stellung soll der Läufer aber nicht erreichen, da seine Bewegung durch die jeweils links und rechts angebrachten Anschläge begrenzt wird. Damit wird die Anforderung einer Haltekraft in beiden Positionen realisiert.

Befindet sich der Läufer in der linken Position, so kann er durch das kurzzeitige Einschalten der beiden gegensinnig gepolten Spulen in die rechte Position ausgelenkt werden. Die Ursache der Auslenkung des Läufers durch das Einschalten der Spulen liegt in der Lorentzkraft. Der Permanentmagnet im Läufer erzeugt ein Magnetfeld, welches die Polschuhe des Läufers durchtritt und radial nach außen (senkrecht zu den Spulen) verläuft. Damit erfährt der Läufer eine Kraft, die betragsmäßig der Lorentzkraft gleich ist, aber dieser entgegengesetzt gerichtet ist.

Aufbau von Prototypen

BSLA 3,5 x 0,5

Dieser Linearantrieb wurde für die Verwendung in einem Zweistellungsfokussystem mit einem 1/6-Zoll-CCD-Chip entwickelt. Wie man dem Diagramm 6-27 entnehmen kann, beträgt der Hub des Läufers 0,5 mm. Er wird in den stabilen Positionen mit einer Kraft von 57,8 mN gehalten. Die berechnete Lorentz- und die Gesamtkraft beziehen sich auf eine magnetische Durchflutung von 25 Ampere Windungen.

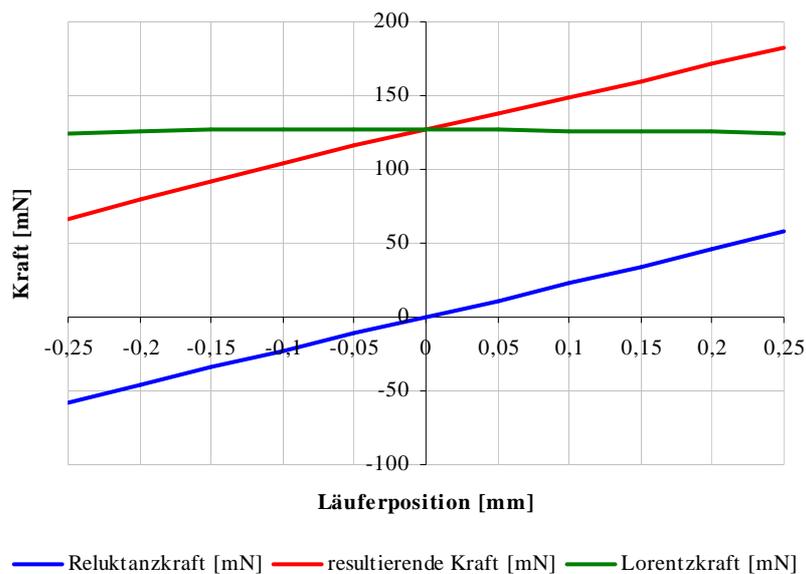


Abb. 6-27 Kraft-Weg-Kennlinie des Linearantriebs BSLA 3,5 x 0,5

Stellweg Δx	Antriebskraft F_a	Haltekraft F_h
0,5 mm	66,85 mN	57,8 mN
geometrische Kennwerte		
Innendurchmesser d_i	Außendurchmesser d_a	Länge des Linearantriebs
3,5 mm	6,4 mm	6,0 mm
elektrische Kennwerte		
maximale Leistung P	Durchflutung je Spule θ	Füllfaktor der Spule
0,98 W	25 Ampère-Windungen	0,49

Tabelle 6-6 Kennwerte des Linearantriebs BSLA 3,5 x 0,5

Zu beachten ist, dass sich die angegebene maximale elektrische Leistung von 0,98 W (bei 25 Ampère-Windungen) auf eine kontinuierliche Bestromung der beiden Aktorspulen bezieht. Da aber eine Impulsbestromung verwendet wird, muss die Leistung entsprechend der eingestellten Impulsdauer skaliert werden, so dass man bereits bei gleicher Impuls- und Pausendauer nur die Hälfte der Leistung verwenden würde.

Die Abbildung 6-28 zeigt den Stator (ohne Rückschlussrohr) und den Läufer des Prototypen im Größenvergleich mit einer Ein-Cent-Münze.



Abb. 6-28 Stator des bistabilen Linearantriebs (links) und dessen Läufer (rechts) BSLA 3,5 x 0,5

BSLA 3,9 x 0,5

Für die Anwendung in einem optischen System mit einem größeren 1/4“-CCD-Chip wurde ein bistabiler Linearantrieb mit einer größeren Öffnung für eine Linsenaufnahme von 3,9 mm entwickelt. Die Funktion des Antriebs und der Hub entsprechen dem vorherigen Motor. Die wesentlichen Änderungen betreffen vor allem die elektrische Leistung, die durch die FEM-gestützte Optimierung der Motorparameter auf 0,58 W gesenkt wurde. Die Kraft-Weg-Kennlinien dieses Linearantriebs sind in der Abbildung 6-29 dargestellt.

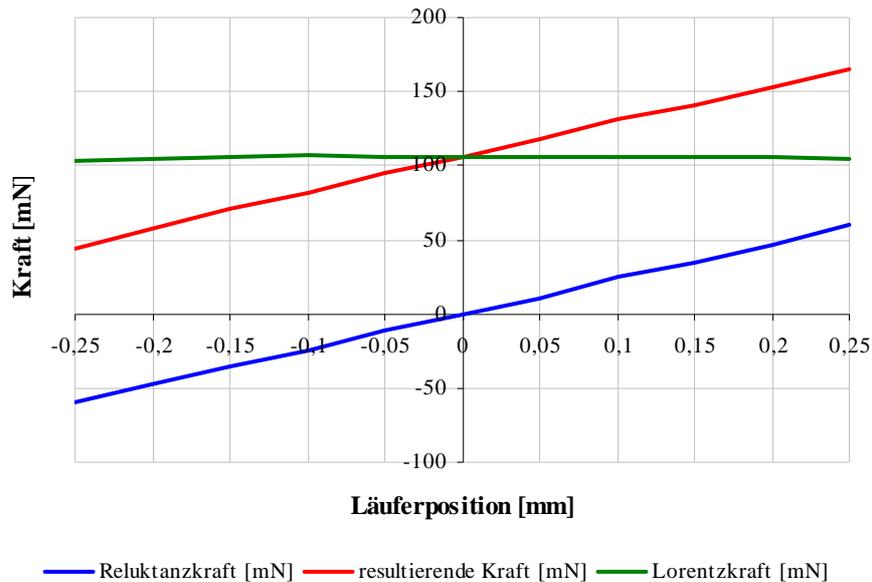


Abb. 6-29 Kraft-Weg-Kennlinie des Linearantriebs BSLA 3,9 x 0,5

Stellweg Δx	Antriebskraft F_a	Haltekraft F_h
0,5 mm	43,8 mN	60 mN

geometrische Kennwerte

Innendurchmesser d_i	Außendurchmesser d_a	Länge des Linearantriebs
3,9 mm	6,9 mm	8,0 mm

elektrische Kennwerte

maximale Leistung P	Durchflutung je Spule θ	Füllfaktor der Spule
0,58 W	20 Ampère-Windungen	0,49

Tabelle 6-7 Kennwerte des Linearantriebs BSLA 3,9 x 0,5

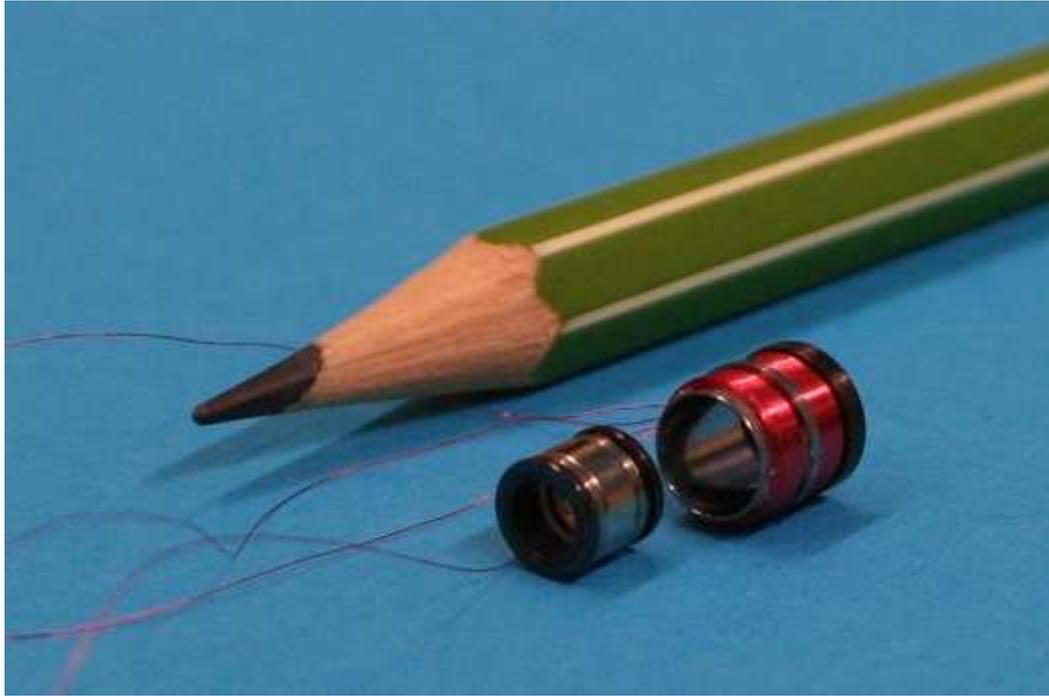


Abb. 6-30 Stator und Läufer des aufgebauten bistabilen Linearantriebs BSLA 3,9 x 0,5

In der Abbildung 6-30 sind der Läufer und der Stator ohne Rückschluss dargestellt. Da dieser Linearantrieb in einem späteren Prototyp eines Chip-on-the-Tip-Endoskops mit Zweistellungsfokus (siehe Kapitel 7) verbaut wird, kann auf eine detaillierte messtechnische Untersuchung des Prototypen nicht verzichtet werden.

In der Abbildung 6-31 ist die Sprungantwort des Motors für unterschiedliche Spulenspannungen dargestellt. Der Läufer folgt nicht direkt dem vorgegebenen Spannungsimpuls, sondern es ist am Anfang eine Totzeit festzustellen. Je nach Erregungsspannung liegt diese Zeit zwischen ca. 0,5 und 1 ms. Diese Verzögerung ist mit der Induktivität der Spulen zu begründen. Wird an die Spule eine impulsförmige Spannung angelegt, so bildet sich eine Induktionsspannung, die ihrer Ursache entgegengerichtet ist, so dass es zu einer zeitlichen Verzögerung des elektrischen Stroms kommt. Mit steigender Erregerspannung lässt sich diese Verzögerungszeit vermindern.

Bei einer Erregerspannung von drei Volt braucht der Läufer ca. 7,5 ms, bis er die gesamte Verfahrstrecke von 0,5 mm zurückgelegt hat. Bei Erhöhung der Spannung auf 9 V liegt diese Zeit bei nur ca. 2,5 ms. Die höhere Spannung erzeugt einen steileren Stromanstieg (vgl. mit

dem Ausdruck $I(t) = \frac{U_0}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$)

Im Gegensatz zu den entwickelten kontinuierlichen Linearantrieben kommt es zu keiner Überschwingung, da der Läufer direkt gegen einen mechanischen Anschlag fährt. In diesem Fall ist eigentlich mit einem Prellverhalten zu rechnen, was allerdings nicht gemessen wurde. Aus diesem Grund ist zu vermuten, dass das Prellen im Bereich des Rauschens liegt.

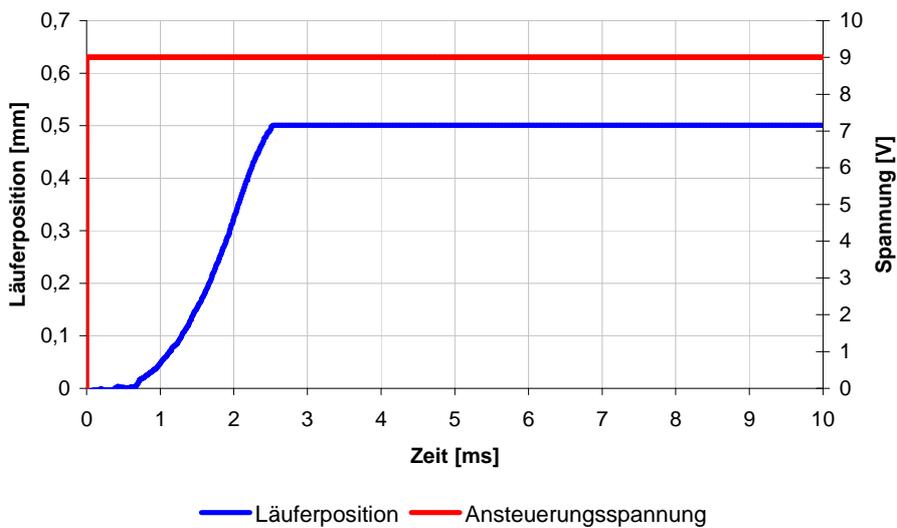
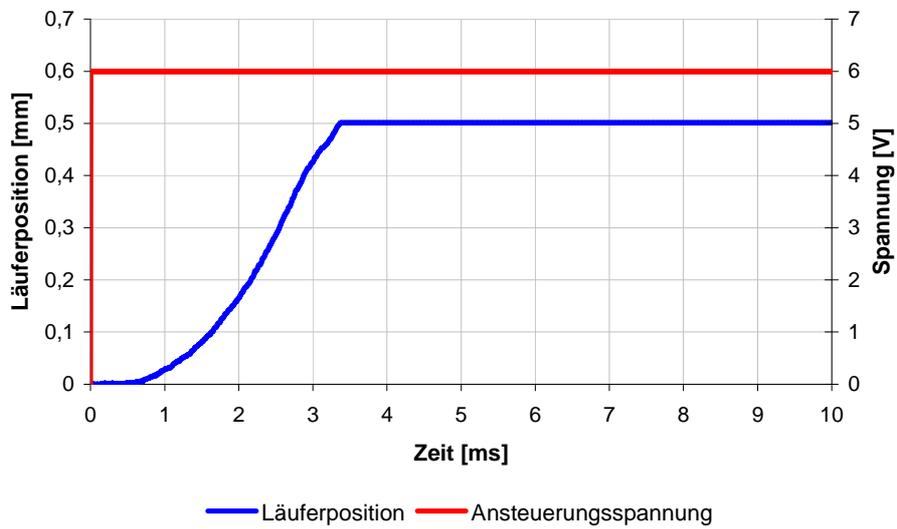
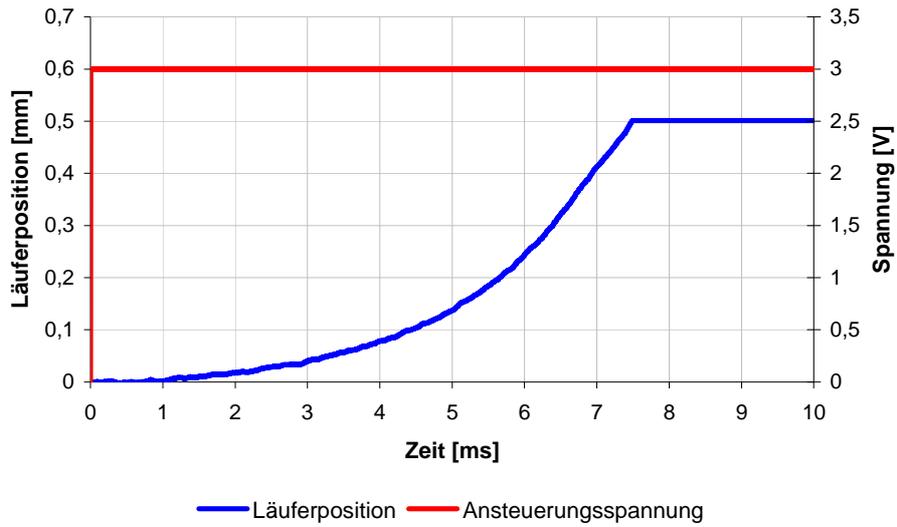


Abb. 6-31 Sprungantwort des bistabilen Linearmotors BSLA 3,9 x 0,5 für verschiedene Spannungen

Um möglichst wenig Wärme zu erzeugen, ist es von Interesse, wie sich der Läufer bei kürzeren Erregersimpulsen verhält.

In der Abbildung 6-32 ist die Sprungantwort für einen Spannungsimpuls von nur 2 ms dargestellt. Wie man der Abbildung entnehmen kann, startet der Läufer die Bewegung nach einer Verzögerungszeit von ca. 0,7 ms. Nach 2 ms wird die Erregerspannung abgeschaltet. Zu diesem Zeitpunkt hat der Läufer ca. 0,12 mm zurückgelegt. Aufgrund der Impulserhaltung bewegt sich der Läufer weiter, bis er über der Mitte der Verfahrstrecke angekommen ist. Ab diesem Punkt erfährt er die Reluktanzkraft und legt dadurch die gesamte Strecke zurück.

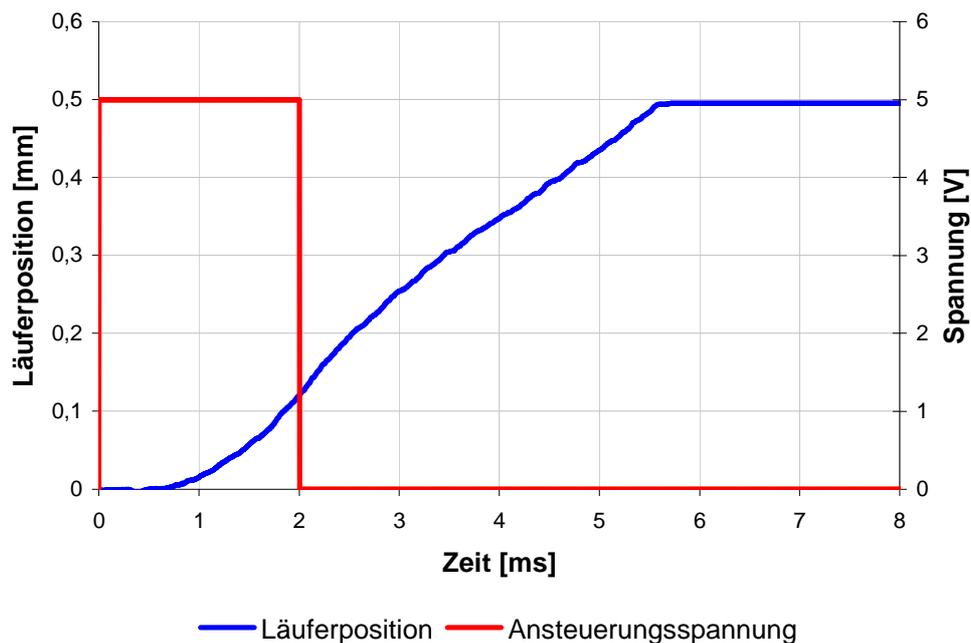


Abb. 6-32 Sprungantwort für einen kurzen Impuls von 2 ms mit der Spannung von 5 V

Das beschriebene dynamische Verhalten trifft dann zu, wenn durch die Erregerspannung der Läufer einen Impuls erhält, der groß genug ist, um die halbe Strecke zu überwinden. Falls die Spannung zu klein ist, z.B. nur 4 V, wie es in der Abbildung 6-33 dargestellt ist, so verharrt der Läufer auf der ersten Hälfte des Wegs und erfährt dann eine rücktreibende Reluktanzkraft, die ihn wieder in die Ausgangsposition zurück bringt.

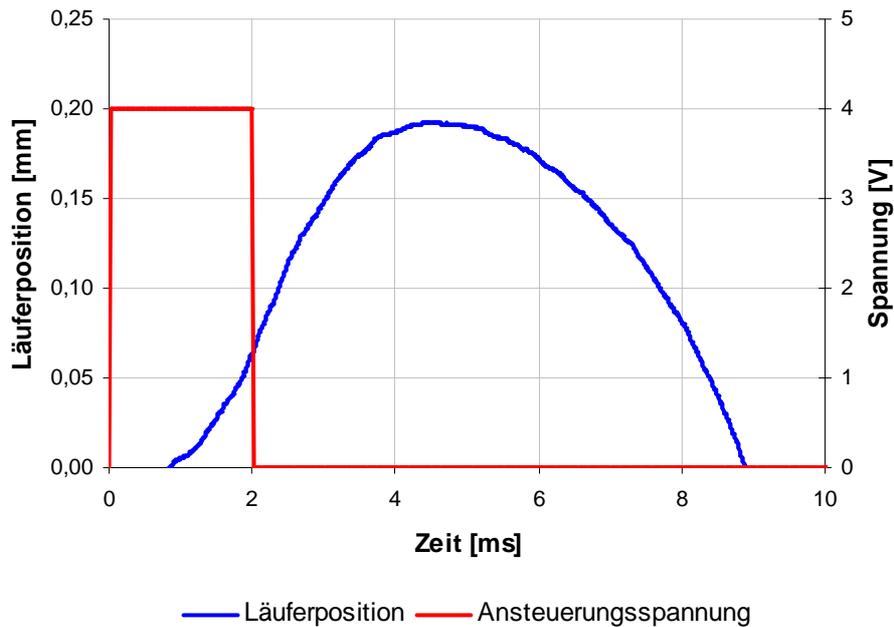


Abb. 6-33 Sprungantwort für einen kurzen Impuls von 2 ms mit der Spannung von 4 V

Die entwickelten bistabilen Linearantriebe zeichnen sich durch einen sehr einfachen Aufbau aus, wodurch ihre Verwendung in miniaturisierten Optiken für Chip-on-the-Tip-Endoskope begünstigt wird. Die hohe Zuverlässigkeit dieser Linearantriebe erleichtert auch deren Zulassung für den Einbau in einem medizinischen Gerät. Wie im Kapitel 3 gezeigt wurde, erweitern bereits zwei Fokuspositionen den Tiefenschärfebereich erheblich.

Die impulsförmige Ansteuerung erlaubt eine Minimierung der elektrischen Verlustleistung. Auch ein Autofokussystem kann damit deutlich leichter aufgebaut werden. Durch die Bildauswertung werden die Kontrastwerte ständig überwacht. Werden aufgrund der Änderung des Objektabstands die eingestellten Werte unterschritten, so wird die Position des Läufers geändert.

Bei der Verwendung im manuellen Betrieb ist die Benutzbarkeit der Nachfokussierung intuitiv ersichtlich. Nähert man sich dem zu betrachtenden Objekt, so schaltet man in den Nahfeldmodus, bei größerer Entfernung in den Fernfeldmodus. Aus den erwähnten Gründen wurde entschieden, genau diesen Motortyp beim Aufbau eines Videomoduls für ein Chip-on-the-Tip-Endoskop zu verwenden.

6.4.2 Linearantrieb mit zwei Statorpolschuhen

Die Funktionsweise dieses Antriebs gleicht der des vorherigen. Mit dem Unterschied, dass der magnetische Fluss über zwei am Stator angebrachte Polschuhe geschlossen wird. Der Antrieb hat ebenfalls zwei stabile Positionen, in denen er mittels Reluktanzkraft gehalten wird. Durch die Lorentzkraft bewegt er sich zwischen den beiden stabilen Positionen.

Der maximale Verfahrweg des bistabilen Linearantriebs mit einem Statorpolschuh ist direkt von der Länge des Läufermagneten abhängig. Um die Funktion des Motors zu gewährleisten, muss sich der Statorpolschuh immer zwischen den Enden des Permanentmagneten befinden.

Damit ergibt sich der maximale Hub des bistabilen Linearantriebs mit einem Statorpolschuh zu:

$$s_{\max} < l_m - l_p \quad (6-1)$$

wobei s_{\max} der maximale Verfahrweg, l_m die Länge des Läufers und l_p die Länge des Statorpolschuhs ist.

Zu beachten ist, dass wenn $s = l_m - l_p$ gilt, der Läufer keine Haltekräfte in beiden stabilen Positionen erfährt.

Liegt die Notwendigkeit vor, einen Linearantrieb zu bauen, bei dem der Hub größer als die Länge des Läufers ist, so lässt sich dies mit zwei Statorpolschuhen realisieren (siehe Abbildung 6-34).

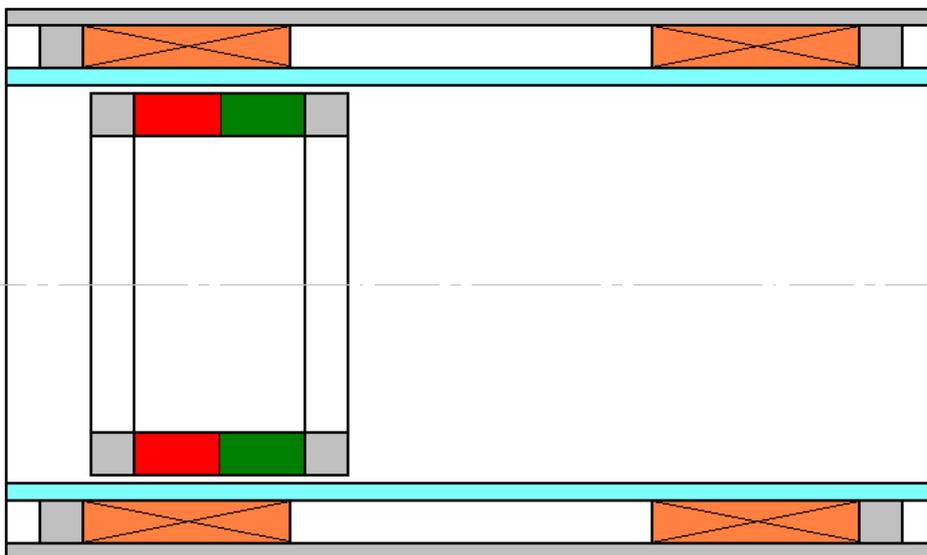


Abb. 6-34 Bistabiler Linearantrieb mit zwei Statorpolschuhen und großem Hub

Der Verlauf der Kräfte als Funktion des Wegs ist für diesen Linearantrieb in der Abbildung 6-35 dargestellt. Das Verhalten der Reluktanzkraft (blaue Kurve) ähnelt dem der anderen bistabilen Linearantriebe. Mit der Reluktanzkraft ergeben sich die Haltekräfte in den beiden stabilen Positionen. Die rote Kurve zeigt den Verlauf der Kraft, wenn die linke Spule bestromt

wird. Am Anfang der Bewegung befindet sich der Läufer unterhalb dieser bestromten Spule, so dass auf ihn die Lorentzkraft wirkt. Fährt der Läufer aus dem Bereich unter der Spule in die mittlere Position (Nullpunkt im Diagramm), so erfährt er trotzdem noch eine Kraft. In diesem Fall wirkt nicht die Lorentzkraft, sondern die durch die Wechselwirkung der Magnetfelder des Permanentmagneten und der bestromten Spule erzeugte Reluktanzkraft. Werden beide Statorspulen bestromt, so verdoppelt sich die resultierende Kraft auf den Läufer in der mittleren Stellung (grüne Kennlinie).

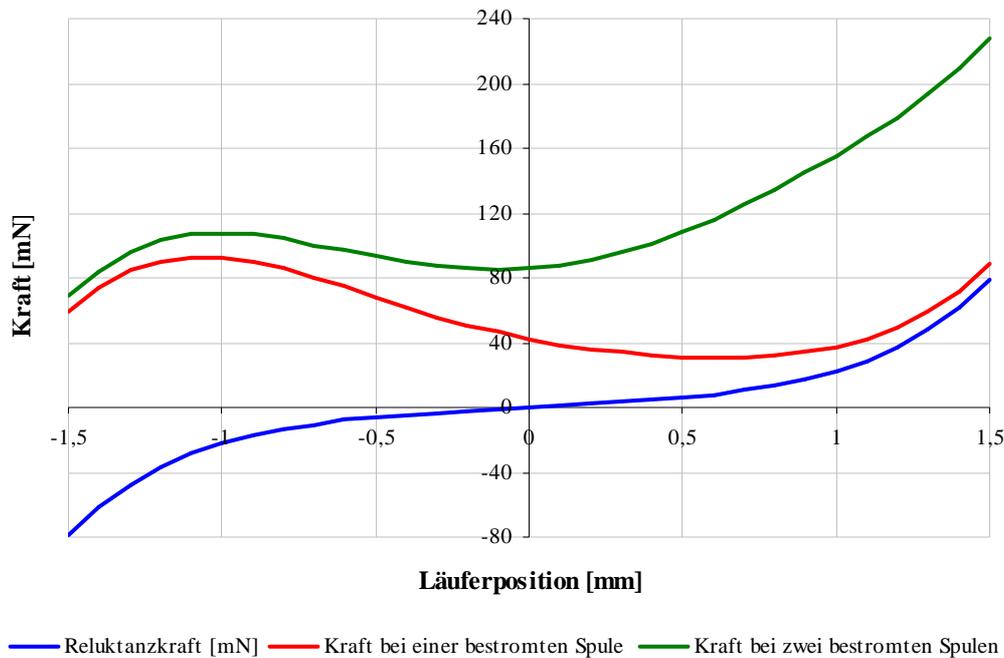


Abb. 6-35 Kräfteverlauf des bistabilen Linearantriebs mit zwei Statorpolschuen

Auf der Basis der oben beschriebenen Vorgänge ist es somit möglich, einen bistabilen Linearantrieb aufzubauen, bei dem der Verfahrweg größer als die Läuferlänge ist. Dies könnte z.B. dann erforderlich sein, wenn ein kleiner Bauraum in axialer Richtung zur Verfügung steht.

6.5 Abschätzung der weiteren Miniaturisierbarkeit

Es zeigt sich, dass der Einsatz von Lineardirektantrieben für den Aufbau von miniaturisierten Optiken, wie z.B. bei starren oder flexiblen Chip-on-the-Tip-Endoskopen deren Funktionsvielfalt erheblich erweitert und damit dem Arzt die Möglichkeit bietet, kranke Bereiche im Körper sehr genau zu untersuchen. Bei der Entwicklung dieser Endoskope ist man bestrebt, ihre Abmaße so gering wie möglich zu halten, wodurch hohe Anforderungen an die Miniaturisierbarkeit solcher Antriebe gestellt werden. Aus diesem Grund ist es vom Interesse, die Grenzen der weiteren Miniaturisierbarkeit dieser Aktoren zu betrachten.

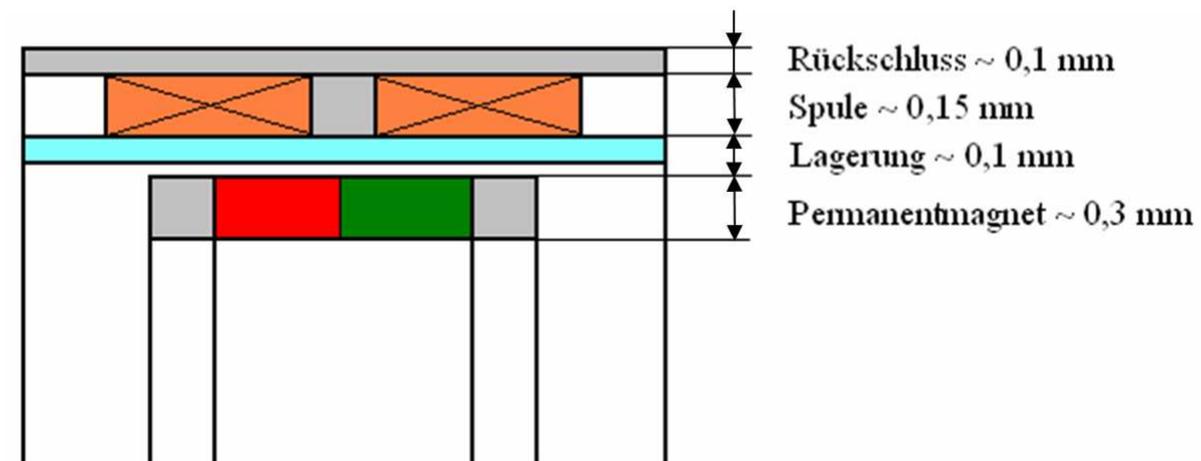


Abb. 6-36 Querschnitt des bistabilen Linearantriebs mit Angaben der Minimaldicken der Einzelbauteile

In der Abbildung 6-36 ist der Querschnitt des bistabilen Linearantriebs mit den Angaben der Mindestdicken der einzelnen Bauteile dargestellt.

Die Miniaturisierbarkeit von Linearantrieben dieser Art wird vor allem durch die mechanische Stabilität der Einzelbauteile beschränkt. Erfahrungsgemäß kann man sagen, dass die radiale Dicke des weichmagnetischen Rückschlusses und der Lagerung um jeweils 0,1 mm reduziert werden kann. Aufgrund der hohen Sprödigkeit der Seltenerdmetalle sollten diese mindestens eine Wandstärke von 0,3 mm aufweisen. Eine weitere Verkleinerung wäre durch die Verwendung von kunststoffgebundenen Magneten möglich. In diesem Fall wäre es möglich, die Linsenfassung direkt mit dem Material zu umspritzen. Allerdings sind Magnete dieser Art deutlich schwächer (ca. ein Drittel der Remanenz), wodurch die Antriebskräfte reduziert werden.

Bei der Wicklung von selbsttragenden Kupferspulen wurden versuchsweise Prototypen mit Wandstärken von 0,15 mm mit ausreichender mechanischer Stabilität hergestellt. Nachteilig ist jedoch die Reduzierung der Anzahl der Windungen, so dass es nur schwer gelingt, eine ausreichend hohe magnetische Durchflutung zu erzielen. Die weitere Miniaturisierung wäre durch den Einsatz von Planarspulen in Form von lithografisch hergestellten flexiblen Platinen möglich. Der Füllfaktor solcher Planarspulen ist allerdings deutlich geringer, was wiederum die Gesamtkräfte des Antriebs reduzieren würde.

Diese Betrachtungen führen zum Resultat, dass der minimale radiale Bauraum solcher Linearaktoren bei ca. 0,65 mm liegt.

Resümierend kann man sagen, dass es möglich ist Linearaktoren mit einem Außendurchmesser von ca. 3mm herzustellen, die eine Öffnung für die Linsenaufnahme mit einem Durchmesser von 1,3 mm aufweisen. Solche Aktoren können dann in einem 1/10“ Bildaufnehmer verbaut und in einem 5 mm Endoskop verwendet werden.

6.6 Toleranzanalyse

Für den Einsatz der neu entwickelten Linearantriebe in zukünftigen Produkten und für deren Serienproduktion ist eine ausgiebige Toleranzanalyse in Bezug auf die Fertigung der Einzelbauteile und deren Montage zu einer Baugruppe von hoher Bedeutung.

Die Toleranzempfindlichkeit des elektromagnetischen Kleinantriebs wird im Rahmen dieser Arbeit am Beispiel der vorne vorgestellten Prototypen BSLA 3,9 x 0,5 und RLLA 3,5 x 1,0 untersucht.

6.6.1 Toleranzanalyse eines Schrittmotors

Bei der Toleranzanalyse wird zunächst untersucht, welche Parameter der Komponenten die größten Auswirkungen auf die Funktionsweise des Linearantriebs haben. Betrachtet man den Rückschluss des bistabilen Motors, so ist seine Länge in den meisten Fällen deutlich größer als es für den magnetischen Kreis notwendig ist. Auch der Außendurchmesser des Rückschlusses unterliegt nur bedingt hohen Genauigkeiten. Der weichmagnetische Rückschluss hat die Aufgabe, den magnetischen Fluss zu leiten. So lange keine Sättigung erreicht ist und der Querschnitt groß genug ist, um den gesamten Fluss zu leiten, ist es nicht notwendig, dieses Bauteil hochpräzise zu fertigen. Bei den bistabilen Linearantrieben war die zur Führung des magnetischen Flusses notwendige radiale Dicke des Rückschlusses immer kleiner, als es für die mechanische Stabilität erforderlich war. Von großer Bedeutung sind die Fertigungsgenauigkeiten der Stator- und der Läuferpolschuhe, da sie eine direkte Auswirkung auf die erzielbaren Kräfte und Verfahwege haben. In der Abbildung 6-37 sind die Ergebnisse einer FEM-gestützten Toleranzanalyse der weichmagnetischen Teile mit Toleranzen von $\pm 20 \mu\text{m}$ dargestellt.

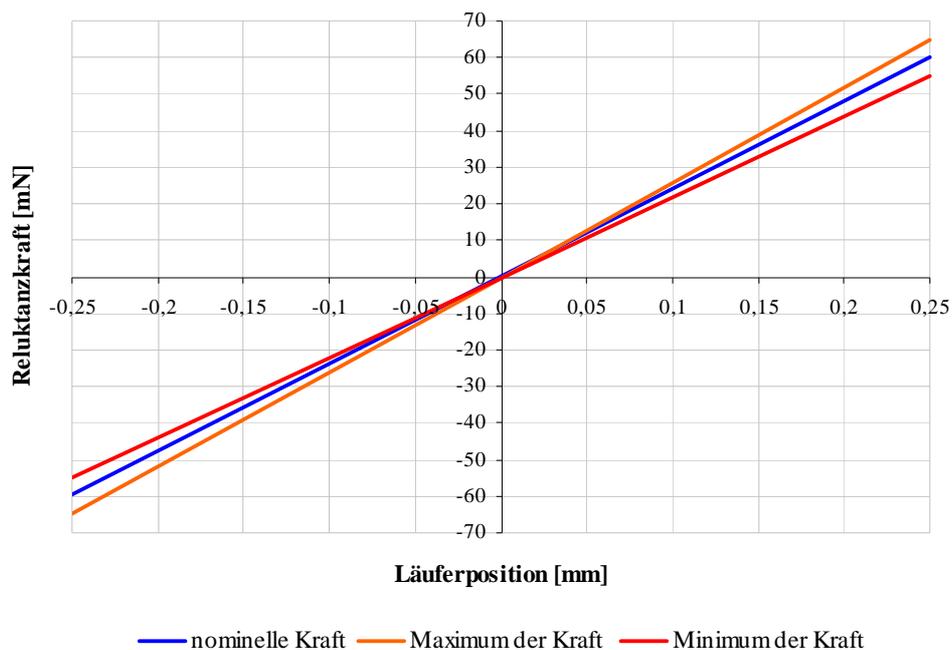


Abb. 6-37 Auswirkung der Fertigungstoleranzen der weichmagnetischen Teile auf die Reluktanzkraft

Beim Durchführen der Toleranzanalyse wurden Fertigungsungenauigkeiten von $\pm 20 \mu\text{m}$ vorausgesetzt, was eigentlich übertrieben ist, da moderne CNC-Maschinen standardmäßig Genauigkeiten von einigen Mikrometern bieten. Aber auch diese hohen Toleranzen beeinflussen kaum die Funktionsfähigkeit des Motors. Der Betrag der Reluktanzkraft schwankt dabei um ca. $\pm 5 \text{ mN}$. Dies ist mit dem nominellen Wert von 60 mN zu vergleichen.

Die Fertigungsungenauigkeiten des Permanentmagneten von $\pm 20 \mu\text{m}$ zeigen ähnliche Auswirkungen auf die Reluktanzkraft. Die Änderung der Lorentzkraft fällt noch geringer aus, da die magnetische Flussdichte in die Reluktanzkraft quadratisch und in die Lorentzkraft nur linear eingeht.

6.6.2 Toleranzanalyse eines kontinuierlich verstellbaren Linearantriebs

Im Gegensatz zu den Schrittmotoren, bei denen die Fertigungsfehler eine Änderung der Halte- oder Antriebskraft, aber keine Beeinflussung der Positioniergenauigkeit bewirken, hängt bei den kontinuierlich betriebenen Linearantrieben die Positioniergenauigkeit von der Wechselwirkung der Kräfte ab. Wird durch die Fertigungstoleranzen der Betrag der Reluktanzkraft verändert, so verschiebt sich die stabile Position des Läufers.

Analog zu der Toleranzanalyse des bistabilen Linearantriebs werden alle weich- und hartmagnetischen Bauteile des RLLA $3,5 \times 1,0$ mit Toleranzen von $\pm 20 \mu\text{m}$ beaufschlagt und die Auswirkungen auf die Kraft-Weg-Kennlinie betrachtet. Bei diesem Motor muss auch die Rückschlusslänge berücksichtigt werden, da die rücktreibende Reluktanzkraft durch die Rückschlusslänge, bezogen auf die Läuferlänge, erzeugt wird. In der Abbildung 6-38 sind die berechneten Kraft-Weg-Kennlinien des Linearantriebs für die angegebenen Toleranzwerte dargestellt.

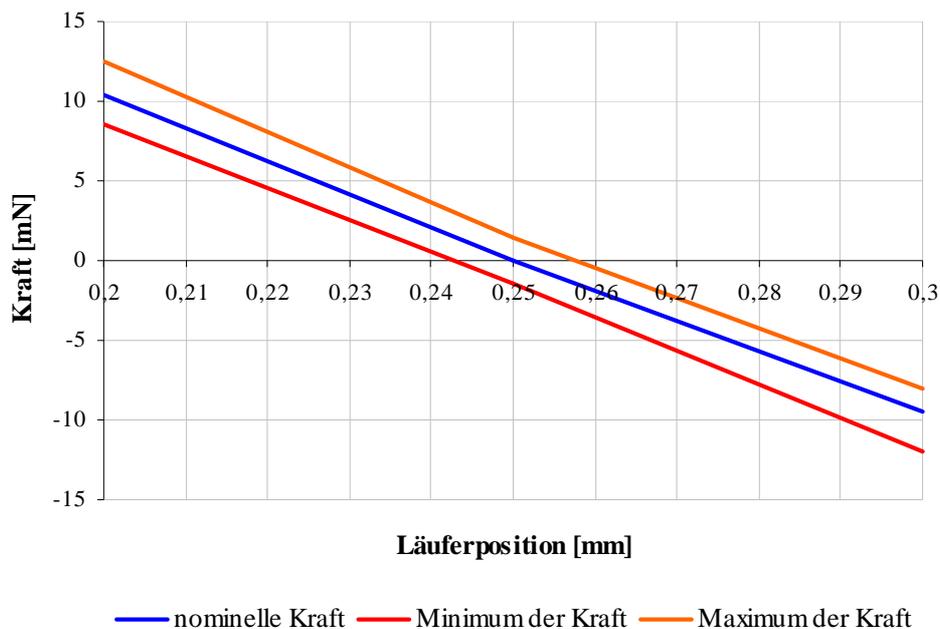


Abb. 6-38 Kraft-Weg-Kennlinie des Linearantriebs RLLA $3,5 \times 1,0$ in Abhängigkeit von den Toleranzen

Erzeugt die Spule des Linearmotors eine magnetische Durchflutung von 14 Ampère-Windungen, so ergibt sich durch die Überlagerung der Reluktanz- und Lorentzkraft eine stabile Position des Läufers bei 0,25 mm (blaue Kennlinie im Diagramm). Durch die Toleranzen der Einzelbauteile von $\pm 20 \mu\text{m}$ ergibt sich eine Änderung der Kraft-Weg-Kennlinie, was zur Verschiebung der stabilen Position um ca. $\pm 8 \mu\text{m}$ führt. Diese geringfügige Änderung der stabilen Position hat nahezu keine Auswirkungen beim Einsatz des Linearmotors zur Verschiebung optischer Komponenten.

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Positioniergenauigkeit eher von der Reibung zwischen dem Läufer und der Gleithülse beeinflusst wird. Außerdem ist zu erwähnen, dass die für die Berechnung vorausgesetzten Fertigungstoleranzen von $\pm 20 \mu\text{m}$ eher zu hoch sind. Für die Montage des Motors müssen jedoch kleinere Fertigungstoleranzen vorgegeben werden, damit die Einzelteile zueinander passen.

6.6.3 Weitere Aspekte beim Aufbau von Linearaktoren

In den vorherigen Kapiteln wurde eine Toleranzanalyse am Beispiel von zwei Linearantrieben durchgeführt. Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit weiteren möglichen Fehlerquellen bei der Fertigung, bzw. beim Aufbau.

Die Funktionsfähigkeit der Linearantriebe wird stark von den Eigenschaften sowie den Abmaßen der eingesetzten Permanentmagnete bestimmt. Aus diesem Grund müssen einige grundsätzliche Regeln bei der Auslegung solcher Systeme beachtet werden.

Da die verwendeten Seltenerd-magnete sehr stark korrosionsanfällig sind, werden diese nach dem Sintern beschichtet. Typische Beschichtungen und ihre Schichtdicken sind in der Tabelle 6-8 aufgelistet.

Beschichtung	Schichtdicke [μm]
Nickel	10 - 20
Kupfer	10 - 20
Nickel-Kupfer	10 - 20
Zinn	15 - 20
Zink	8 - 20
Gold	10 - 20
Epoxide	15 - 25

Tabelle 6-8 Beschichtungen für Seltenerd-magnete

Lässt man die Permanentmagnete bei einem Magnethersteller fertigen, so sind immer die äußeren Abmaße des Teils inklusive der Beschichtung beim Sintern und Nachschleifen von Bedeutung. Da die Beschichtung aus keinem hartmagnetischen Werkstoff besteht, ist Betrachtung der Dicke der Beschichtung notwendig, da diese besonders bei sehr kleinen Magneten einen relativ großen Volumenanteil einnimmt.

Betrachtet man einen ringförmigen Permanentmagneten mit einem Außenradius R , einem Innenradius r und der Höhe h (siehe Abbildung 6-39), so ergibt sich sein Volumen V zu:

$$V = \pi \cdot h \cdot (R^2 - r^2) \quad (6-2)$$

Wird bei der Betrachtung des Magnetvolumens die Beschichtungsdicke s berücksichtigt, so beträgt der wirkliche Außenradius $R' = R - s$, der Innenradius $r' = r + s$ und die Höhe $h' = h - 2s$. Damit ergibt sich das wirkliche Magnetvolumen V' zu:

$$V' = \pi \cdot h' \cdot (R'^2 - r'^2) \quad (6-3)$$

$$V' = \pi \cdot (h - 2s) \cdot [(R - s)^2 - (r + s)^2] \quad (6-4)$$

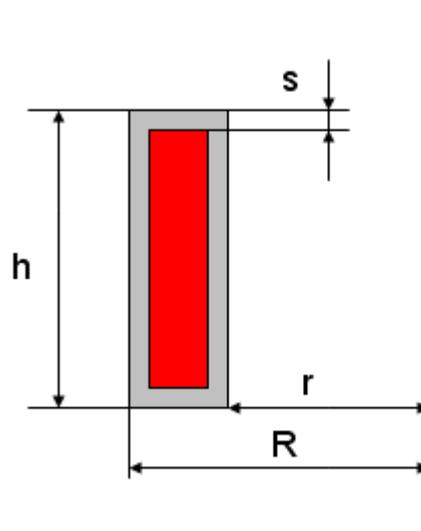


Abb. 6-39 Schematischer Aufbau eines beschichteten Permanentmagneten

Dementsprechend reduziert sich bei einem Magneten mit einem Innenradius von 1,0 mm, einer Wandstärke von 0,3 mm, der Höhe 1,5 mm und einer Epoxidbeschichtung mit einer Dicke von 25 μm das wahre Magnetvolumen um ca. 20 Prozent. Eine solche Volumenänderung darf auf gar keinen Fall vernachlässigt werden und ist bei der FEM-gestützten Auslegung des Linearantriebs von Anfang an zu berücksichtigen. Bei den größeren Permanentmagneten ist der Volumenanteil der Schutzschicht nicht so dramatisch, allerdings kann auch hier diese Betrachtung nicht unberücksichtigt bleiben.

Die Seltenerd-magnete sind keramische Werkstoffe, die durch Sintern hergestellt werden. Aufgrund der hohen Bruchgefahr und der angewendeten Fertigungsverfahren sind die Kanten dieser Permanentmagnete stark verrundet. Die Volumenverluste durch die Kantenverrundungen fallen bei sehr kleinen Permanentmagneten besonders stark ins Gewicht, so dass der dadurch entstehende Energieverlust bei der Auslegung mitberücksichtigt werden muss.

Aufgrund der hohen Sprödigkeit der keramischen Werkstoffe ist es äußerst schwierig, diese mit sehr kleinen Wandstärken von 0,3 bis 0,4 mm durch Sintern herzustellen. Deshalb werden solche dünnwandigen Magnete beim Aufbau von Kleinantrieben mittels des Drahterodierverfahrens nachbearbeitet.

Ein großer Nachteil der funkenerosiven Bearbeitung ist die Schädigung der Oberfläche. In der Abbildung 6-40 ist die erodierte Oberfläche eines NdFeB-Magneten dargestellt. Es ist deutlich eine Art Kraterlandschaft zu erkennen, die sich durch die einzelnen Funkenentladungen und das Verdampfen der Partikel ausbildet. Außerdem weist die Oberfläche aufgrund der Abschreckung durch das Dielektrikum Mikrorisse auf. Um die Auswirkung dieser Erscheinungen auf die magnetischen Eigenschaften des Permanentmagneten zu untersuchen, wurden die magnetischen Kennwerte bearbeiteter Magnete vermessen.

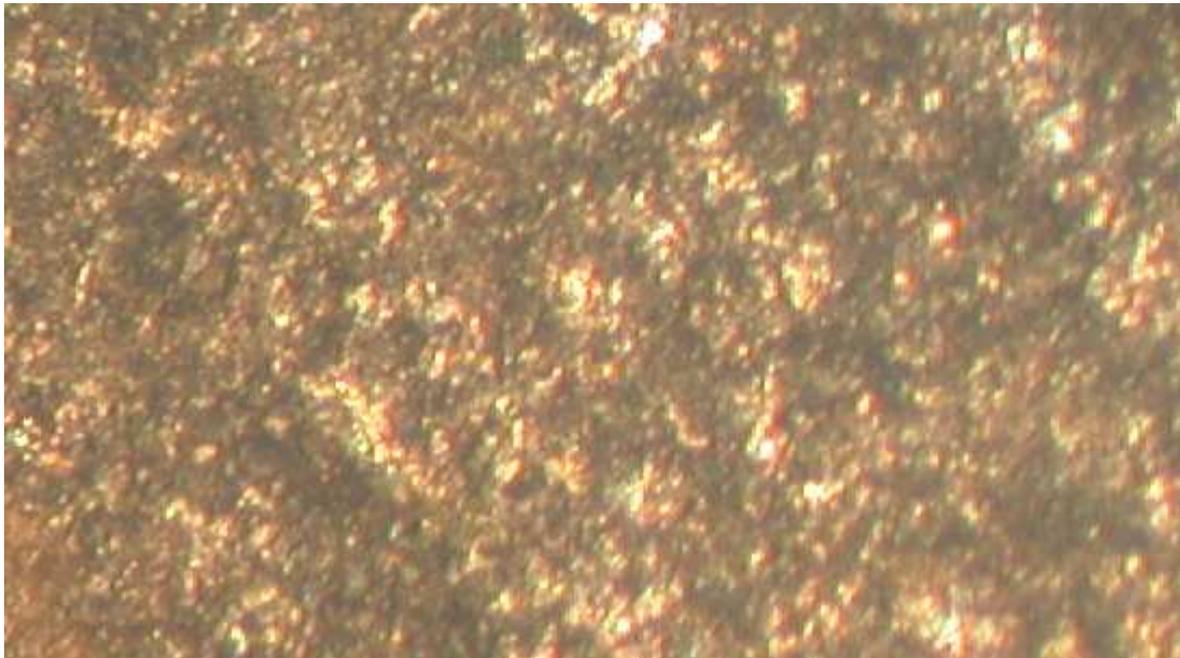


Abb. 6-40 Erosierte Oberfläche eines NdFeB-Magneten

In der Abbildung 6-41 sind Kennlinien funkenerosiv bearbeiteter und unbearbeiteter Permanentmagnete dargestellt. Die Kennlinie des unbearbeiteten Magneten (blau im Diagramm) liegt deutlich über der des bearbeiteten (rot im Diagramm). Die Verluste liegen dabei im Bereich von ca. 20 Prozent.

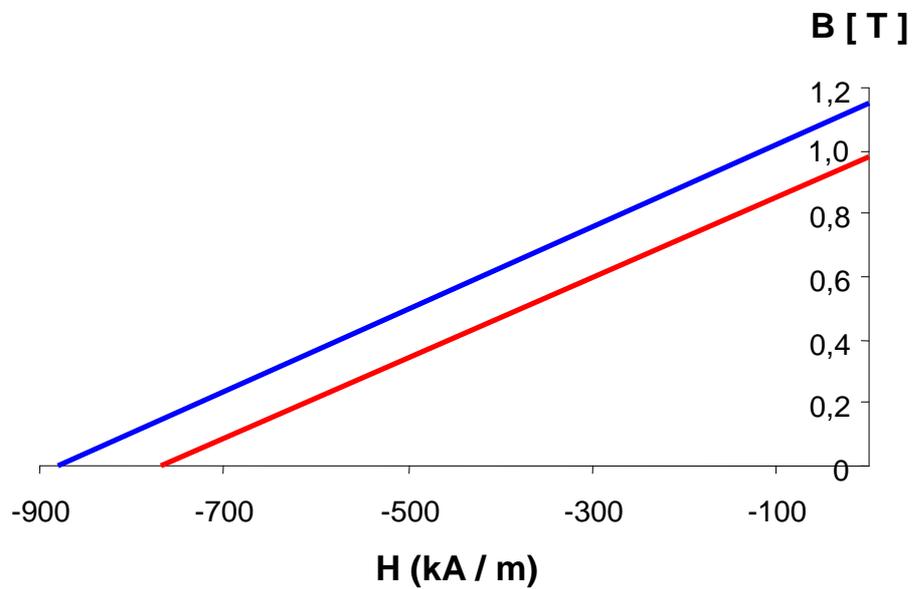


Abb. 6-41 BH-Kurve eines unbearbeiteten (blau) und eines erodierten (rot) NdFeB-Magneten

6.6.4 Betrachtung der radialen Kräfte auf den Läufer

Befindet sich der Läufer eines Linearantriebs bezüglich des Stators radial zentriert, so heben sich die radialen Kräfte auf den Läufer gegenseitig auf. Da jedoch die Lagerung des Läufers mittels einer Gleitlagerung erfolgt, ist immer mit einem Spalt zwischen der Gleitringen und der Statorgleithülse zu rechnen, was zu einer radialen Asymmetrie des Läufers und zu einer asymmetrischen Feldverteilung, sowie einer Radialkraft führt.

In der Abbildung 6-42 ist der Verlauf der Radialkraft in Abhängigkeit von der radialen Verschiebung des Läufers dargestellt. Die Gleitlagerung der miniaturisierten Linearantriebe für den Einsatz in Chip-on-the-Tip-Optiken beinhaltet einen Spalt zwischen den Gleitringen des Läufers und der Gleithülse des Stators von ca. $10\ \mu\text{m}$ bis $15\ \mu\text{m}$. Die entsprechende radiale Verschiebung des Läufers würde dann im ungünstigsten Fall zu einer Kraft von ca. 8 mN verursachen. Dies ist unkritisch, wenn durch eine geeignete Wahl der Reibpartner eine geringe Haft- und Gleitreibung vorliegt.

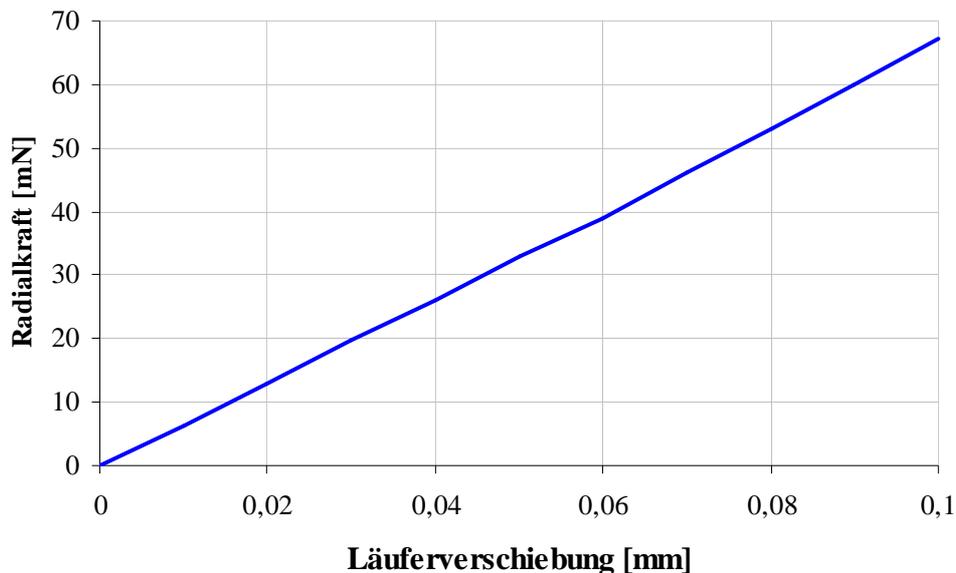


Abb. 6-42 Verlauf der Radialkraft in Abhängigkeit von der radialen Verschiebung des Läufers

Um die Spulendrähte nach außen zu führen, wird der Rückschluss mit einem Schlitz versehen. Je nach Durchmesser der verwendeten Drähte kann dieser Schlitz eine Breite bis zu einem Millimeter aufweisen. Dieser Schlitz stört die symmetrische Feldverteilung im Querschnitt des Linearantriebs, was wiederum zur Entstehung von reibungserhöhenden Radialkräften führt. In der Abbildung 6-43 ist der Verlauf der radialen Reluktanzkraft in Abhängigkeit von der Schlitzbreite dargestellt. Die Schlitzbreite bei Linearantrieben ist von dem Durchmesser der Spulen abhängig. Sie beträgt typischerweise 0,2 bis 0,5 mm.

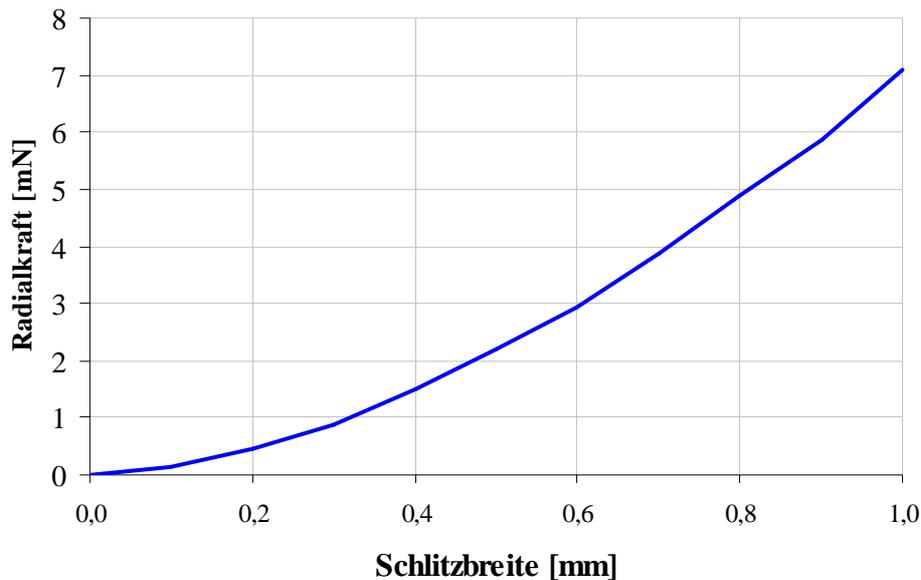


Abb. 6-43 Verlauf der Radialkraft in Abhängigkeit von der Breite des Rückschlussschlitzes

Exzentrizität und Schlitz führen zur Entstehung von reibungserhöhenden Radialkräften. Das hat negative Auswirkungen auf die Positioniergenauigkeit bei den kontinuierlich betriebenen Linearantrieben. Bei den linearen Schrittmotoren ist dies nicht so dramatisch und lässt sich unter Umständen sogar zur Verstärkung der Haltekräfte in den stabilen Positionen nutzen.

6.6.5 Zusammenfassung der Toleranzanalyse

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Ergebnisse der Toleranzanalyse beziehen sich ausschließlich auf die vorgestellten Beispiele, so dass bei der Entwicklung eines neuen Linearantriebs eine erneute, ausgiebige Betrachtung der zulässigen Fertigungs- und Montagetoleranzen notwendig ist. Allerdings zeigen die Beispiele Ansätze zur Vorgehensweise bei solcher Analyse und geben einen Überblick über die Größenordnung der auftretenden und zulässigen Fehler. Die beim Aufbau der Prototypen gewonnenen Erfahrungen sind damit von erheblicher Bedeutung für die spätere Entwicklung der serienreifen Produkte.

7 Endoskope mit einem distal angeordneten Bildaufnehmer

7.1 Optisches System

Für den Aufbau der Chip-on-the-Tip-Videomodule wurde ein 1/4“-CCD-Chip der Firma NET (New Electronic Technology) ausgewählt (siehe Abbildung 7-1). Das im Kapitel 3 vorgestellte 1/6“-optische-System musste somit auf eine größere Bilddiagonale von 4,5 mm skaliert werden.

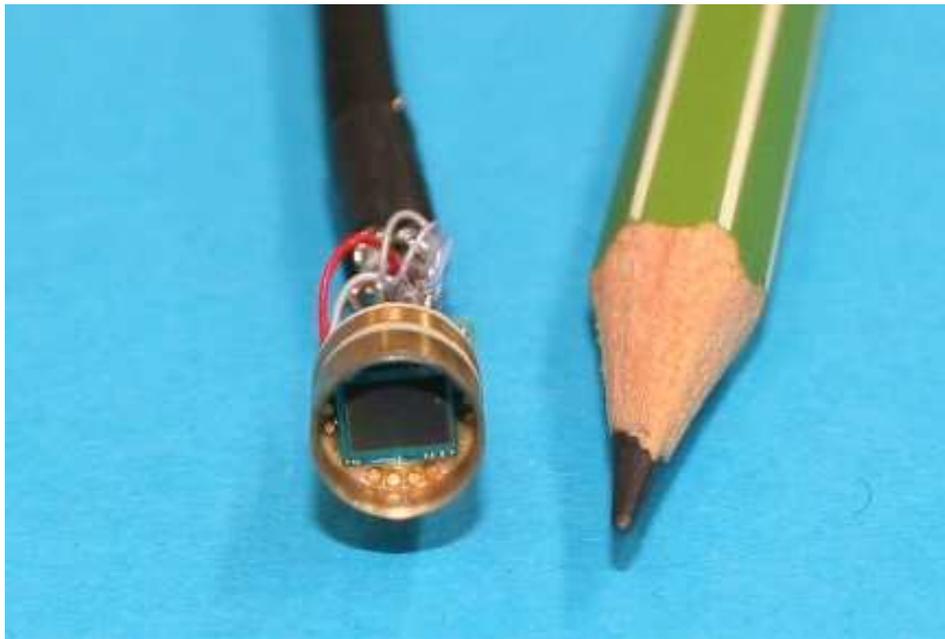


Abb. 7-1 1/4“-CCD-Chip der Firma NET (New Electronic Technology)

Das optische System ist in der Abbildung 7-2 dargestellt. Für den Einsatz in einem Videoparaskop wurden an dem optischen System folgende Änderungen vorgenommen: Vor der ersten Linse befindet sich ein Frontglas aus Saphir, das wegen seiner hohen Härte und Kratzfestigkeit einen Schutz gegen mechanische Beschädigungen gewährleistet. Nach der ersten Negativlinse wird eine Glasrolle platziert. Diese erlaubt einen universellen Einsatz der Optik sowohl für Endoskope mit einem Geradeausblick, als auch für solche mit Seitenblickoptik, bei der die Glasrolle durch ein entsprechendes Prisma ersetzt wird. Zwischen der Glasrolle und der plankonvexen Linse befindet sich eine planparallele Platte, die als Substrat für die Aperturblende dient. Die letzte Änderung betrifft die Glasscheibe nach dem Achromat, die den CCD-Chip abdeckt und bei der endgültigen Auslegung des Videomoduls mitberücksichtigt werden muss.

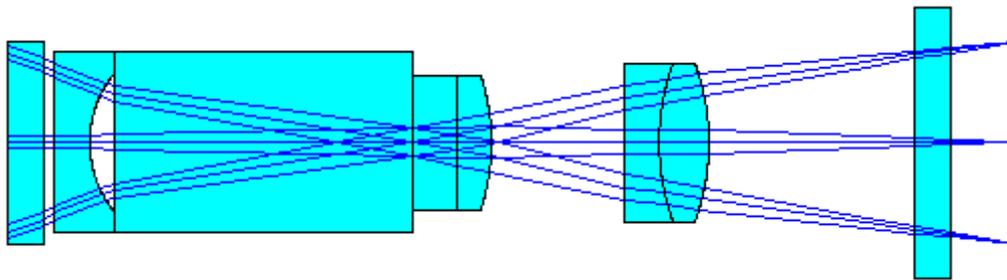


Abb. 7-2 Ein 1/4“ optisches System für den Aufbau eines Videolaparaskops

Aufgrund der Vorgaben des Projektpartners wurde entschieden, für den Einsatz in einem Videolaparoskop zwei Ausführungsformen der Videomodule zu entwickeln. Zum Ersten wurde ein Videokopf mit einer Fixfokusoptik aufgebaut. Diese Optik besitzt eine Aperturblende von 0,71 mm, wodurch sich eine Eintrittspupille mit dem Durchmesser von 0,34 mm ergibt.

Ein weiteres Videomodul ist mit einem bistabilen Linearantrieb ausgestattet, so dass hiermit zwei Positionen einstellbar sind. Um die Lichtausbeute des optischen Systems zu erhöhen, wurde der Durchmesser der Eintrittspupille des zweiten Prototypen auf 0,46 mm vergrößert. Die dadurch resultierende Verringerung der Schärfentiefe wird mittels der Nachfokussierung mit Hilfe des bistabilen Linearantriebs kompensiert. In der Abbildung 7-3 sind die Verläufe der Spotradien in Abhängigkeit des Objektabstands für das Fixfokusvideomodul dargestellt. Durch den Übergang von dem 1/6“-auf einen 1/4“-Bildaufnehmer und somit eine Vergrößerung der Pixelgröße, sollte man auch den Wert des zulässigen Spotradius erhöhen. Allerdings wurden durch die Vorgaben des Projektpartners und die erhöhten Ansprüche an die Bildqualität die zulässigen Spotradien für die Auslegung der Optik auf 8,5 μm festgelegt.

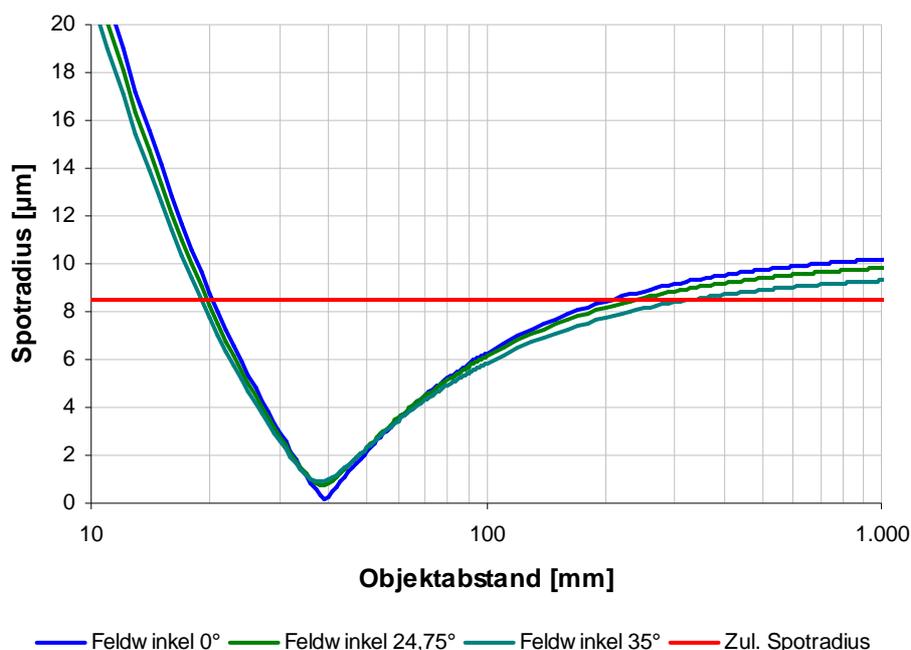


Abb. 7-3 Verlauf der Spotradien in Abhängigkeit vom Objektabstand des Fixfokusvideomoduls

Die Brennweite des Fixfokussystems beträgt 3,6 mm, bei einem Durchmesser der Eintrittspupille von 0,34 mm ergibt sich eine Blendenzahl von 10,6. Der Verlauf der Schärfentiefe liegt zwischen den angestrebten 20 mm in Nahbereich und 200 mm Fernbereich.

Die Schärfentiefe des Zweistellungsfokussystems ist in der Abbildung 7-4 anhand der Verläufe der Spotradien in Abhängigkeit von dem Objektstands dargestellt. Der Bereich der Schärfentiefe im Nahfeld liegt zwischen 12 und 22 mm, im Fernfeld zwischen 19 und 300 mm.

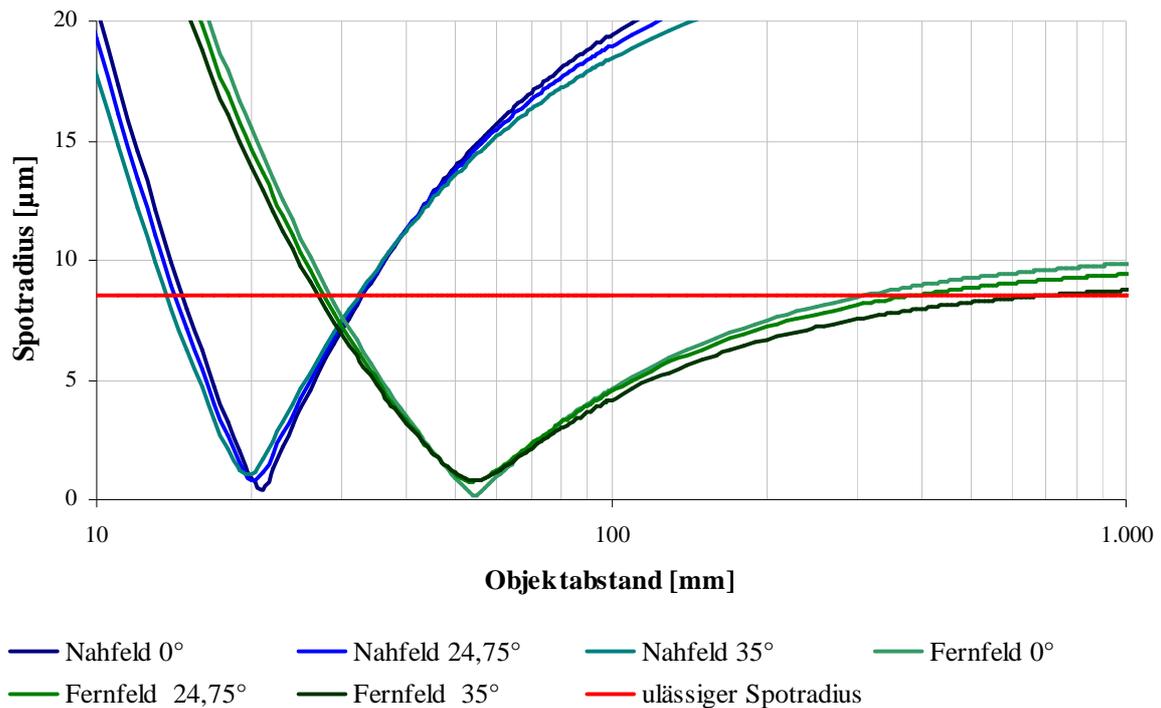


Abb. 7-4 Verlauf der Spotradien in Abhängigkeit vom Objektstand des Videomoduls mit dem Zweistellungsfokussystem

Bei der Zweistellungsoptik liegt die Brennweite bei 3,6 mm. Mit einer Eintrittspupille von 0,46 mm beträgt die Blendenzahl 7,8. Der halbe objektseitige Feldwinkel w der beiden optischen Systeme beträgt 35° . Durch den Einsatz des bistabilen Motors ergibt sich ein Schärfentiefebereich von 15 bis ca. 280 mm.

Die Verwendung eines bistabilen Linearantriebs zur Verstellung des Fokusachromats bewirkt eine Vergrößerung des Bereichs der Schärfentiefe bei gleichzeitiger Erhöhung der Lichtstärke der Optik um einen Faktor von ca. 1,8.

7.2 Entwickelte Videomodule

Abbildung 7-5 zeigt ein Schnittbild des Videomoduls mit dem bistabilen Linearantrieb BSLA 3,9 x 0,5. Der Läufer des Linearmotors inklusive Permanentmagnet, weichmagnetischer Polschuhe und Gleitringe wird direkt auf die Linsenfassung des Fokusachromats montiert. Die Statorhülse und der weichmagnetische Rückschluss werden auf der Linsenfassung der feststehenden Linsengruppe befestigt. Der Verfahrweg des Läufers wird links durch die Linsenfassung der Fixlinsen und rechts durch eine eingeklebte Messingscheibe begrenzt.

In den Rückschluss des Linearantriebs wird der CCD-Chip unter Sichtkontrolle eingeführt und verklebt. Hindurch lassen sich Fertigungs- und Montagefehler der Linsen und Linsenfassungen ausgleichen.

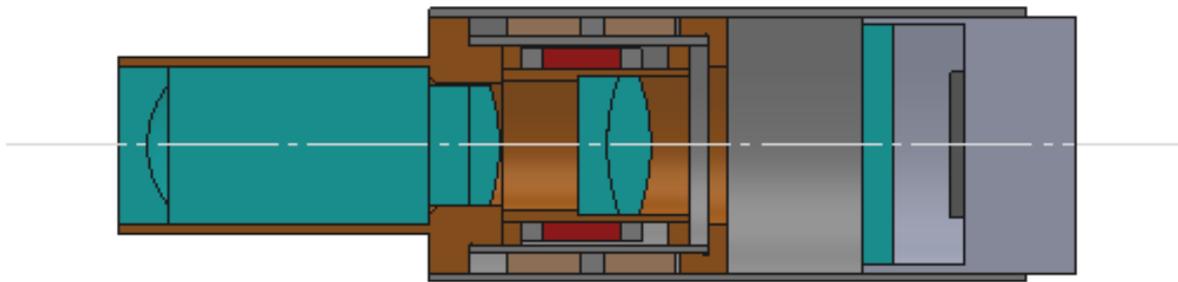


Abb. 7-5 Videomodul mit einem integrierten bistabilen Linearantrieb

Beim Aufbau des Videomoduls mit einem Fixfokusobjektiv wird der Linearmotor durch eine größere Linsenfassung aus Messing ersetzt.

7.2.1 Mechanische Fokussierung

Eine mechanische Lösung zur Fokuseinstellung bietet sich bei starren Endoskopen mit Chip-on-the-Tip-Optiken an. Die Verstellung der Fokuslinse kann durch Aktoren, die proximalseitig angeordnet sind, realisiert werden. Die Motoren werden mittels Zugdrähten mit der beweglichen Linsenfassung verbunden. Die rückstellende Kraft erfolgt dabei durch eine Feder (siehe Abbildung 7-6).

Ein derartiges System hat eine Reihe von Vorteilen. Dafür lassen sich kommerziell erhältliche Elektromotoren verwenden, wodurch die Entwicklungs- und Herstellungskosten gesenkt werden. Dadurch ist es möglich, auch bei geringen Investitionen sehr schnell ein fokussierbares Endoskop auf den Markt zu bringen. Die Wärme, die durch die Verlustleistung der Elektromotoren entsteht, kann am Endoskopgriff leichter abgeführt werden als an der Endoskopspitze. Weiterhin kann die elektrische Sicherheit gegen einen Durchschlag leichter gewährleistet werden.

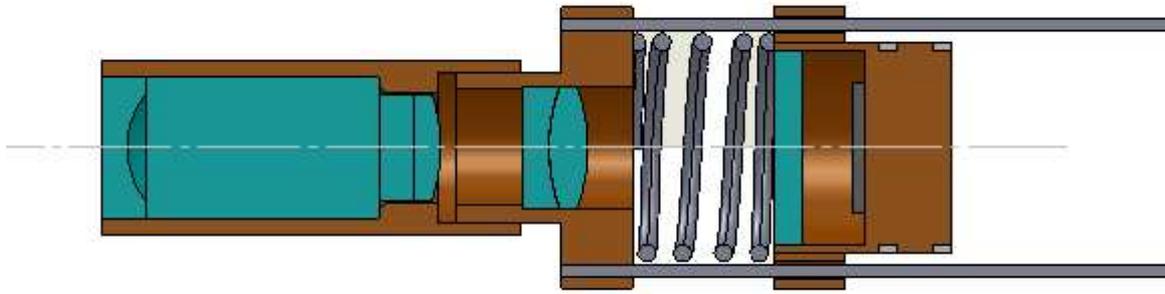


Abb. 7-6 Aufbau eines Chip-on-the-Tip-Videomoduls mit mechanischer Verstellung des Fokusachromaten mittels Zugdrähten

Besonders große Vorteile bietet diese Aktorikausführung für optische Systeme, bei denen mehrere Linsengruppen bewegt werden müssen und die Bewegungsbahnen nichtlinear miteinander gekoppelt sind. Dies ist vor allem bei den Objektiven mit verstellbarer Brennweite der Fall.

Denkbar wäre auch eine Kombination der vorgestellten Aktorkonzepte. Für die Verstellung der Zoomlinsen könnte man die Mechanik mit den Zugdrähten verwenden und für die Bewegung der Fokuslinsengruppe einen Lineardirektantrieb, da sich dieser aufgrund der höheren Dynamik besonders gut für die Autofokussysteme eignet. Außerdem werden im medizinischen Bereich fast ausschließlich parfokale Zoomobjektive verwendet, bei denen das Nachfokussieren bei der Bildvergrößerung oder Verkleinerung nicht erforderlich ist. Diese Art der Objektive lässt sich dadurch realisieren, dass die Brennweite durch das Verschieben von mindestens zwei Linsengruppen, deren Bewegung miteinander gekoppelt ist, geändert wird.

7.3 Montage der Baugruppen

In der Abbildung 7-7 sind die gefassten Linsengruppen der Fixfokusoptik (oben) und der Optik mit dem Zweistellungsfokus (unten) dargestellt. Die Linsengruppen der Fixfokusoptik sind in einer Linsenfassung aus Messing, die zur Reduzierung des Streulichts geschwärzt ist, gefasst. Der Fokusachromat befindet sich im Läufer des bistabilen Linearantriebs, so dass dieser zwischen der feststehenden Linsengruppe und dem Bildaufnehmer bewegt werden kann.

Wie man der Abbildung entnehmen kann, ist die Linsenfassung der feststehenden Linsen kürzer als die Länge der Optik. Dies wurde aus Platzgründen notwendig, um an der Endoskopspitze die Lichtquelle in Form einer LED unterzubringen. Der vordere Teil der Linsengruppe wird vor der Montage im Endoskop noch zusätzlich geschwärzt und in eine Fassung aus PEEK eingeführt.

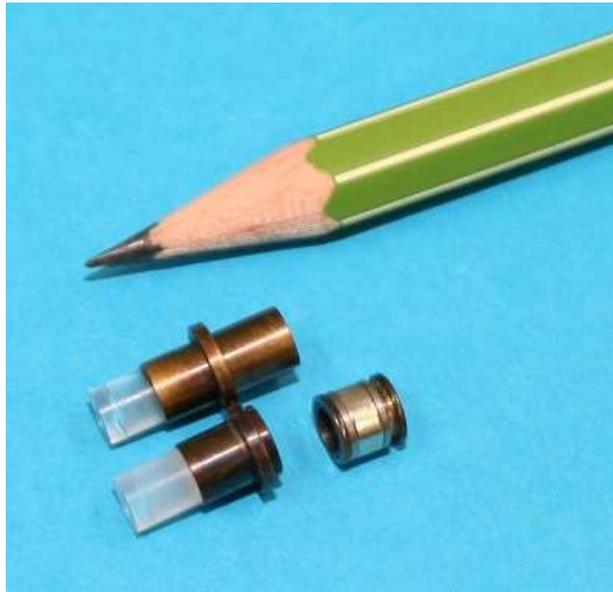


Abb. 7-7 Gefasste Linsengruppen der Fixfokusotik (oben) und der Optik mit dem Zweistellungsfokus (unten)

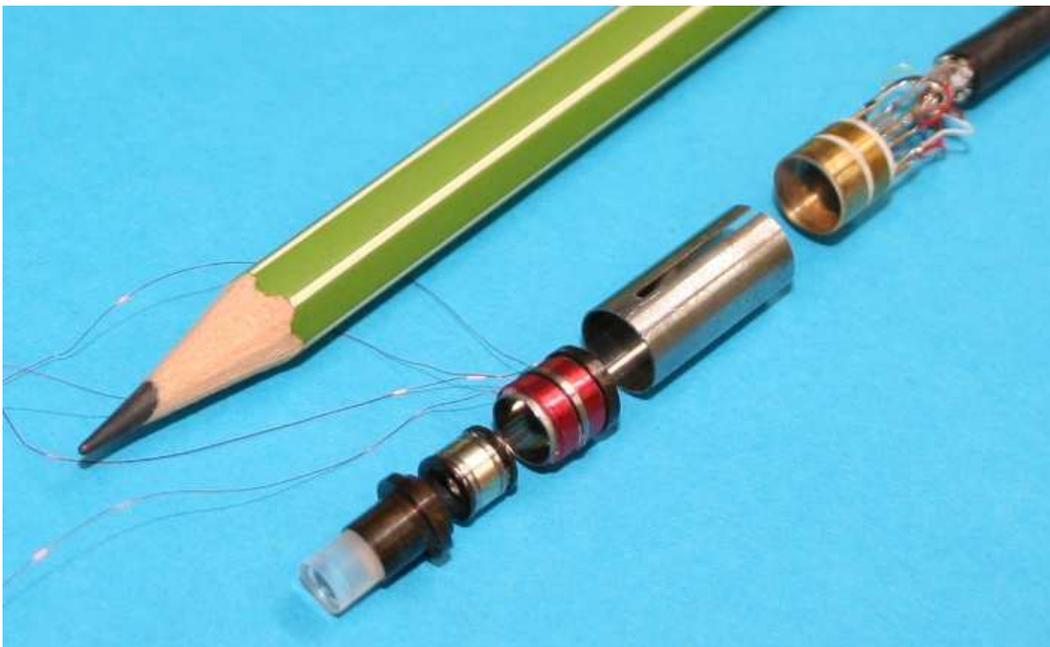


Abb. 7-8 Einzelbauteile des 1/4“-Chip-on-the-Tip-Videomoduls mit Linearantrieb, von links nach rechts: feststehende Linsengruppe, Läufer mit Fokusachromat, Stator, weichmagnetischer Rückschluss, CCD-Chip

Die Einzelbauteile des Videomoduls mit der Zweistellungsoptik sind in der Abbildung 7-8 dargestellt. Bei der Konstruktion des Videomoduls wurde darauf geachtet, dass die einzelnen Komponenten ineinander gleiten und damit gut geführt werden, so dass sie sehr einfach montiert werden können. Im ersten Schritt wird der Läufer in die Gleithülse des Stators eingeführt, danach wird die Linsenfassung der vorderen Linsengruppe mit dem Stator verklebt. Der weichmagnetische Rückschluss wird über den Stator gezogen und die Spulendrähte aus dem Rückschlussschlitz herausgezogen. Im letzten Schritt wird der Bildaufnehmer im Rückschluss des Linearantriebs justiert.

Die Justage des Bildaufnehmers erfolgt unter Sichtkontrolle indem ein Testbild am Monitor beobachtet wird, so dass eventuelle Fertigungsfehler der Linsen kompensiert werden können. Nach der Justage wird der Bildaufnehmer mit Klebstoff fixiert.

Der Abbildung 7-8 verdeutlicht noch einmal die Einfachheit des Aufbaus des gesamten Videokopfs, was vor allem durch den Einsatz eines linearen Direktantriebs ermöglicht wurde. Durch den hohlzylindrischen Aufbau um die zu bewegende Linsengruppe ergibt sich ein kompakter Aufbau.

Das Ergebnis der Montage ist in der Abbildung 7-9 dargestellt. Bei dem Videokopf mit dem Fixfokusobjektiv wird der CCD-Chip in der geschwärzten Messinghülse montiert und unter Sichtkontrolle justiert.

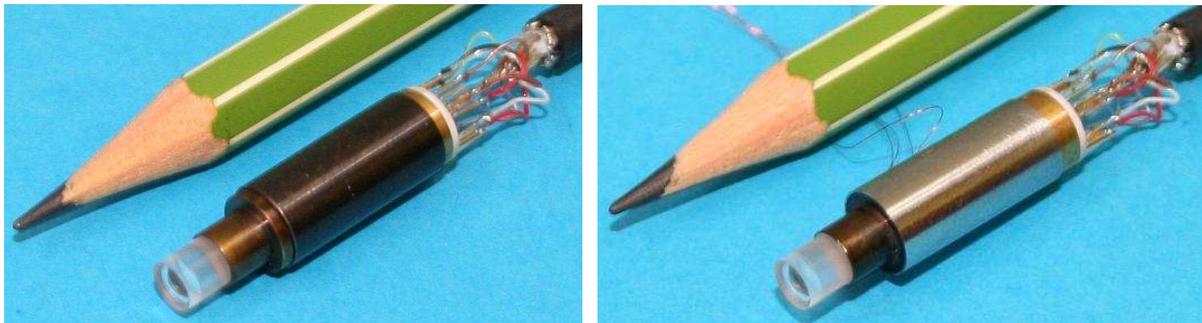


Abb. 7-9 Videoköpfe mit Fixfokusoptik (links) und mit Zweistellungsfokusoptik (rechts)

Ein wichtiger, bis jetzt nicht behandelter Punkt bei der Entwicklung der Videoköpfe für den Einsatz in Chip-on-the-Tip-Endoskopen ist die elektrische Sicherheit. Die elektrischen Bauteile, wie die Spulen und der digitale Bildaufnehmer, sollen elektrisch so isoliert werden, dass die anliegenden Spannungen keine Gefahr für den Patienten darstellen. Bei der Zertifizierung von medizinischen Geräten werden diese mit einer Spannung von vier kV auf Durchschlagsfestigkeit geprüft, was sehr hohe Anforderung an die Isolierung stellt. Um die Autoklavierbarkeit zu gewährleisten, werden Endoskopschäfte aus Edelstahl verwendet. Die Isolation des Videokopfs von dem leitfähigen Endoskopschaft kann durch eine Kunststoffhülse erfolgen. Bei der Auswahl von Isolationskunststoffen ist ihre Erweichungstemperatur zu berücksichtigen. Diese muss oberhalb der Autoklaviertemperatur liegen.

7.4 Alternativer Aufbau einer Fixfokusoptik

Das für den Einsatz in einem Chip-on-the-Tip Endoskop entwickelte und in den vorherigen Kapiteln vorgestellte optische System umfasst eine Linsengruppe, deren einzelne Linsen miteinander verkittet werden und einen Achromaten, der separat positioniert wird. Diese Optik hat den erheblichen Vorteil, dass sie sowohl für die Fixfokus- als auch für die fokussierbare Ausführung einsetzbar ist. Will man aber eine reine Fixfokusoptik bauen, so ließe sich eine Linsengruppe aus miteinander verkitteten Linsen aufbauen. Das nach diesem Prinzip entwickelte optische System ist in der Abbildung 7-10 dargestellt.

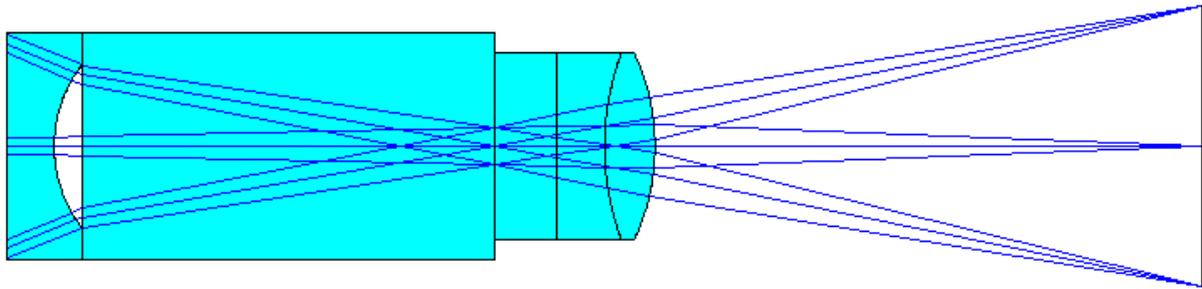


Abb. 7-10 Kompakte Fixfokusendoskopoptik aus verkitteten Linsen

Wie man der Abbildung 7-10 entnehmen kann, besteht das optische System analog zu dem vorherigen aus einer Negativlinse, die direkt hinter der Saphirscheibe platziert ist. Auf die Negativlinse folgt eine Glasrolle, die bei den Seitenblickoptiken durch ein Prisma ersetzt wird. Danach folgt ein Glaträger für die Blende. Anschließend wird ein verkitteter Achromat platziert. Die Abbildungsqualität dieser Optik entspricht der mit separatem Achromaten, allerdings erfordert dies deutlich geringeren Fertigungsaufwand. Auch der Justageaufwand bei diesem System ist vergleichsweise unkomplizierter. Der Verlauf der Schärfentiefe ist anhand der Spotgröße in Abhängigkeit von dem Objektstand in der Abbildung 7-11 dargestellt.

Der Durchmesser der Eintrittspupille dieser Fixfokusoptik liegt bei 0,34 mm, der nominelle Objektstand beträgt 37,5 mm. Der gesamte Bereich der Schärfentiefe liegt, wie angefordert, zwischen 20 mm und 200 mm.

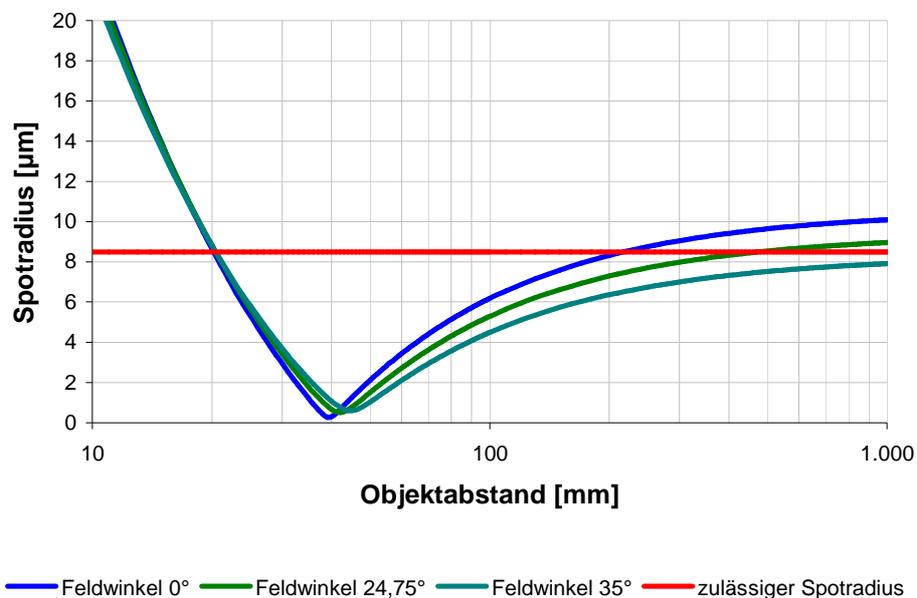


Abb. 7-11 Spotgröße in Abhängigkeit vom Objektstand bei der alternativ entwickelten Fixfokusoptik

8 Endoskopkamera

Abhängig von den Anforderungen und den Einsatzgebieten werden in der Medizin verschiedene Kamerasysteme verwendet. In der letzten Zeit werden im Bereich der Laparaskopie Kameras mit einem Drei-Chip-Bildaufnehmer und HD-Auflösung präferiert.

Diese Kameras verfügen meist über ein parfokales Zoomobjektiv mit einem Vergrößerungsfaktor zwischen 1,5 und 3. Als parfokal bezeichnet man die Zoom-Objektive, bei denen bei konstantem Objektstand die Brennweite verändert werden kann ohne das Nachfokussieren notwendig ist. In anderen Worten bedeutet es, dass man die Kamera einmal auf ein feststehendes Objekt fokussiert und danach beim Vergrößern oder Verkleinern das immer scharf bleibt und erst das Ändern des Arbeitsabstandes eine Nachfokussierung erfordert.

In der Abbildung 8-1 sind zwei solcher HD-Kameras von unterschiedlichen Herstellern dargestellt.



Abb. 8-1 Endoskopkamera mit parfokalem Zoomobjektiv von XION (oben) und B. Braun (unten) [Xion10], [BBra10]

Diese Art von Endoskopkameras enthält in einem Gehäuse sowohl den Bildaufnehmer als auch das Objektiv, bei dem die Verstellung der Brennweite, und die Fokussierung durch manuell verstellbare Drehrädchen erfolgt. Die manuelle Verstellung der Brennweite und die Fokussierung behindern den Arzt im Verlauf minimal invasiven Eingriffe. Daher wird in diesem Abschnitt der Arbeit beispielhaft gezeigt, wie es gelingt, eine Justage dieser optischen Parameter durch den Einsatz von Aktoren für den Arzt erheblich zu erleichtern. Hierfür werden verschiedene Ansätze vorgestellt, die sich durch ihren Integrationsgrad unterscheiden.

Bei einer weiteren Familie von medizinischen Kameras lassen sich die digitalen Bildaufnehmer und Objektive trennen. Ein Beispiel einer solchen Kamera ist in der Abbildung 8-2 abgebildet. Beide Bauteile werden meist über einen C-Mount-Anschluss (genormter Gewindeanschluss) miteinander verbunden. Der Durchmesser des Gewindes beträgt ein Zoll (25,4 mm) mit einer Gewindesteigung von 1/32 Zoll. Wichtig ist die Position des Bildaufnehmers zu dem Gewindeflansch von 0,69 Zoll (17,526 mm).



Abb. 8-2 Endoskopkamera mit wechselbaren Objektiven [WOM10]

Ein großer Vorteil dieser Ausführungsform von Endoskopkameras bietet sich durch die Verwendung unterschiedlicher Objektive, die je nach Einsatzgebiet ausgetauscht werden. Es können Objektive mit konstanter, bzw. mit verstellbarer Brennweite eingesetzt werden. In der Abbildung 8-3 sind zwei Beispiele solcher austauschbarer Kameraobjektive der Firma Schöly Fiber Optic dargestellt. Unter anderem wird dadurch auch die Verwendung von Bauteilen unterschiedlicher Hersteller ermöglicht.



Abb. 8-3 Fokussierbares Kameraobjektiv mit fester (links) und verstellbarer Brennweite (rechts) [Schö10]

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden Kameras der Firma Karl Storz betrachtet, für die Antriebsmodule zur motorischen Justage optischer Parameter entwickelt wurden. Diese Kameras werden an Endoskopen und Mikroskopen verwendet (siehe Abbildung 8-4).



Abb. 8-4 Videokamera Image 1 H3 Z (links) und Drei-Chip-Videokopf mit einem C-Mount-Anschluss H3 M (rechts) der Firma Karl Storz [Karl09]

Die Image 1 HD Kamera (Abbildung 8-4 links) verfügt über einen digitalen Drei-Chip-Bildaufnehmer mit einem parfokalen zweifachen Zoom-Objektiv. Die Verstellung der Brennweite und die Einstellung der Bildschärfe erfolgt manuell über zwei Drehrädchen, die mittels einer magnetischen Kupplung mit der Mechanik der Kamera im Inneren der Kamera verbunden sind.

Der H3 M Videokopf (Abbildung 8-4 rechts) enthält kein Objektiv, sondern nur einen digitalen Drei-Chip-Bildaufnehmer. Über einen C-Mount-Anschluss kann dieser mit einem Objektiv für die Verwendung mit Endoskopen oder Mikroskopen verbunden werden.

In der Abbildung 8-5 ist eine Abbildung aus der Patentschrift der Firma Karl Storz Imaging zur Erklärung der Funktionsweise des Objektivbaus dargestellt. Die Linsenfassungen des Objektivs werden mittels Kugeln in einer Drehkulisse gelagert. Für die beweglichen Linsengruppen geben die Bahnen in der Drehkulisse die Bewegungsabläufe vor. Es handelt sich dabei um die gekoppelte Bewegung zweier Linsengruppen. Für die feststehenden Linsengruppen sind die umlaufenden Bahnen, die keine axiale Auslenkung zulassen, vorgesehen.

Die Linsenfassungen sind aus weichmagnetischen Materialien, so dass durch die Drehung der permanentmagnetischen Kupplungen diese eine Schraubenbewegung in den entsprechenden Bahnen der Drehkulissee ausführen.

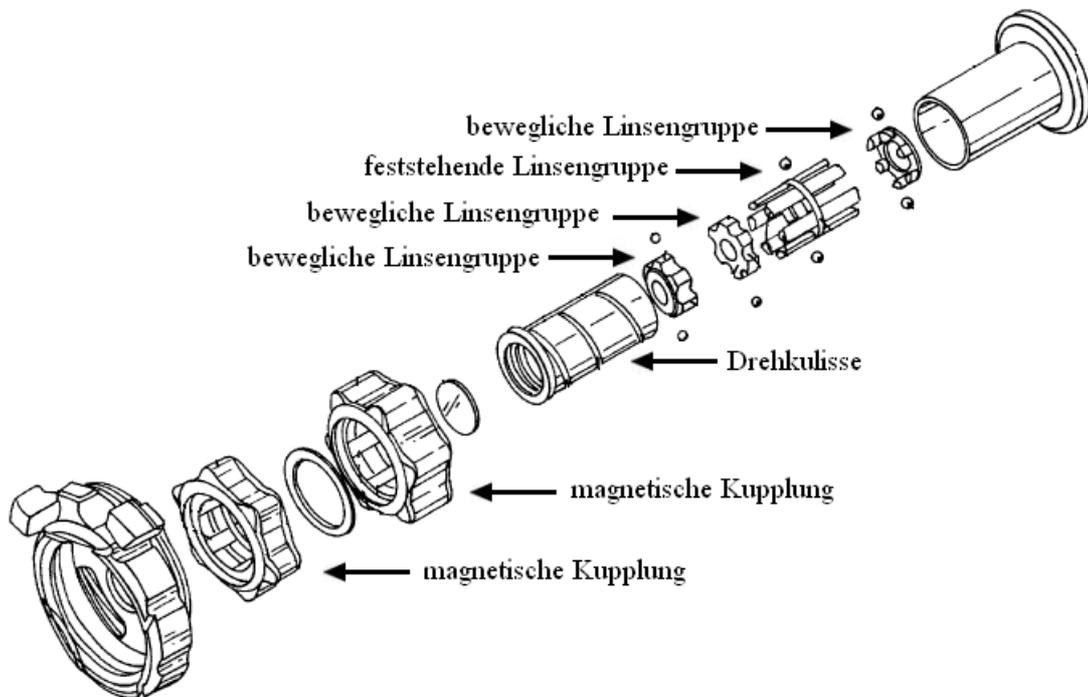


Abb. 8-5 Aufbau der Zoom- und Fokussiermechanik für die HD-Kamera [nach Anha03]

8.1 Aufsteckadapter für die motorische Bewegung von Linsen

Die motorische Bewegung der Linsen lässt sich über einen Aufsteckadapter erreichen, der die manuell verstellbaren Drehrädchen der Kamera ersetzt. In der Abbildung 8-6 ist die Baugruppe in einer Explosionsansicht, welche die Grundidee des Vorhabens verdeutlicht, dargestellt.



Abb. 8-6 Kamera, Aufsteckadapter und Aufnahme für die Okularmuschel

Im Inneren des Adapters befinden sich kleine Elektromotoren, die Magnetkupplungen drehen und über die magnetische Kopplung zu den weichmagnetischen Linsenfassungen die Drehbewegung der beweglichen Linsen verursachen.

Eine Herausforderung bei der Entwicklung des Adapters stellt der geringe zur Verfügung stehende Bauraum dar. Entlang der optischen Achse des Kameraobjektivs darf das Bauteil 30 mm nicht überschreiten, damit die Aufnahme für die Okularmuschel an der dafür vorgesehener Stelle befestigt werden kann. Auch in der Breite und Höhe kann der Adapter nicht beliebig groß sein, damit die Ergonomie der gesamten Baugruppe gewährleistet ist. Die angestrebte Größe des Adapters entspricht dabei der Kontur der Kamera von ca. 45 mm in der Breite und 60 mm in der Höhe. Eine Erhöhung der Abmessungen des Adapters kann zu beträchtlichen Einschränkungen der Ergonomie der Kamera und damit zu einer Ablehnung seitens der potentiellen Nutzer führen.

8.1.1 Diskussion der Konzepte und Aufbau von Versuchsmustern

Eine relativ einfache Möglichkeit, die Antriebseinheit des Aufsteckadapters zu konzipieren, besteht in der Verwendung eines kleinen Elektromotors mit einem Planetengetriebe. Das Drehmoment des Elektromotors wird durch das Untersetzungsgetriebe verstärkt und mittels einer zusätzlichen Stirnradtriebbestufe weitergeleitet. Dieser Aufbau ist in der Abbildung 8-7 dargestellt.

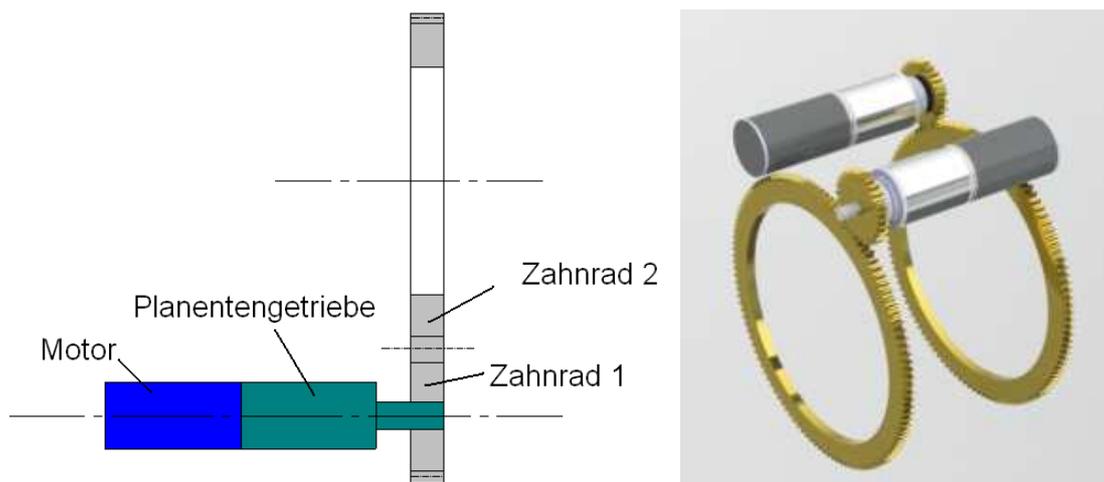


Abb. 8-7 Schematischer Aufbau (links) und ein 3D-Modell (rechts) der Antriebseinheit für den Aufsteckadapter der HD-Kamera

Der Vorteil dieser Ausführungsform besteht in der Einfachheit der Konstruktion, wodurch die Fertigung der Teile und die Montage der Baugruppe erleichtert werden.

Wie bereits erwähnt, steht nur ein sehr kleiner Bauraum für die Antriebseinheit zur Verfügung, wodurch die Suche und die Auswahl der passenden Elektromotoren erschwert sind. Nach einer ausführlichen Recherche konnte nur ein einziger Elektromotor mit Planetengetriebe von der Firma Namiki Precision Jewel gefunden werden, der die geometrischen Randbedingungen erfüllt und bei hohen Drehzahlen genügend Drehmoment zur Verfügung stellt.

Ein 3D-Modell der Antriebseinheit mit diesen Motoren ist in der Abbildung 8-8 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Konstruktion vor der Montage des Gehäuses. Es befinden sich beide Motoren auf der Unterseite der Kamera. Die Fixierung der Antriebe im Motorhalter erfolgt durch Klemmung mit Madenschrauben. Das Drehmoment der Elektromotoren wird durch das Planetengetriebe verstärkt und mittels der Stirnradtriebstufe auf die magnetische Kupplungen weitergeleitet.

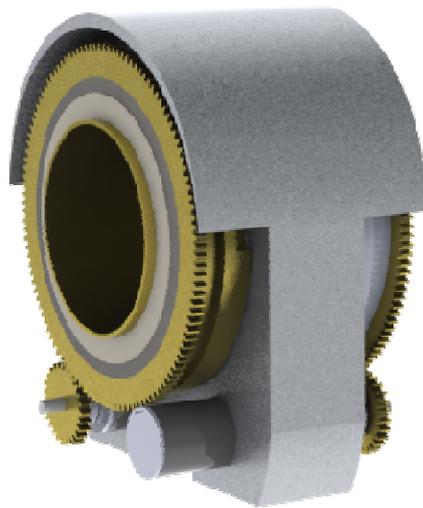


Abb. 8-8 Antriebseinheit des Aufsteckadapters mit den Namiki-Motoren [Matz10]

Der Aufsteckadapter für die Endoskopkamera soll als mechanisch abgeschlossenes System aufgebaut werden, was eine zusätzliche Wand zwischen den magnetischen Kupplungen und dem Kameragehäuse erfordert. Diese Änderung bewirkt eine Vergrößerung des Luftspalts im magnetischen Kreis der Kupplungen. Um diese Auswirkungen zu kompensieren, werden für die magnetischen Kupplungen Segmentmagnete, anstatt der früher verwendeten Rechteckmagnete, eingesetzt (die Begründung ist ausführlich im Kapitel 5 beschrieben).

In der Abbildung 8-9 sind die montierten magnetischen Kupplungen dargestellt. Die Magnetkupplungen bestehen aus je einem weichmagnetischen Rückschluss und sechs diametral, alternierend magnetisierten Segmentpermanentmagneten. An den beiden Seiten der Kupplungen befinden sich Gleitlager aus PEEK. Auf dem weichmagnetischen Rückschluss befinden sich ein Zahnrad und ein Ring mit einer auf dem Umfang eingefräster Nut, welche die Drehbewegung der magnetischen Kupplung begrenzt. Da die im Inneren der Kamera verbauten Bauteile nicht verändert werden können, wurde die Optimierung der magnetischen Kupplung nur auf die Änderung der Magnetform von rechteckig auf sektorförmig beschränkt.



Abb. 8-9 Montierte magnetische Kupplungen

Das Drehmoment des Antriebs, bestehend aus einem Motor und einem daran direkt angeschlossenen Planetengetriebe der Firma Namiki sowie einer Stirnraduntersetzung auf die Magnetkupplung, berechnet sich mit dem Motorenndrehmoment $M_{\text{Motor}} = 0,25 \text{ mNm}$, der Getriebeuntersetzung des Planetengetriebes von $105 : 1$ und dem angegebenen Wirkungsgrad von 72 Prozent sowie der zusätzlichen Untersetzung der Stirnradstufe von $4,4 : 1$ und dem dafür angenommenen Wirkungsgrad von 75 Prozent zu:

$$M_{\text{ges}} = M_{\text{Motor}} \cdot i_{\text{ges}} \cdot \eta_{\text{ges}} \quad (8-1)$$

$$M_{\text{ges}} = 62,37 \text{ mNm}$$

Die Drehzahl beträgt folglich:

$$n = \frac{n_{\text{Motor}}}{i_{\text{gesamt}}} \quad (8-2)$$

$$n = 110 \frac{1}{\text{min}}$$

Die Kennwerte der beiden entwickelten Einheiten sind nachfolgend in den Tabellen 8-1 und 8-2 zusammengefasst.

	Untersetzungsverhältnis	max. Drehzahl [1 / min]	Wirkungsgrad [%]	Drehmoment [mNm]
Elektromotor	---	10.650,00	25	0,25
Planetengetriebe	105 : 1	101,43	72	18,90
Stirnradgetriebe	4,4 : 1	23,05	75	62,37

Tabelle 8-1 Charakteristische Kenngrößen der Antriebseinheiten mit den Namiki-Motoren

In der Abbildung 8-10 sind die Einzelbauteile für den Aufbau eines Aufsteckadapters mit den Namiki-Motoren dargestellt.



Abb. 8-10 Einzelbauteile des Aufsteckadapters für die HD-Kamera

In der Abbildung 8-11 ist der aufgebaute Aufsteckadapter mit den Namiki-Motoren vor der Montage des Gehäuses dargestellt.



Abb. 8-11 Aufsteckadapter mit den Namiki-Motoren vor der Montage des Gehäuses

In der Abbildung 8-12 (unten) ist der aufgebaute Prototyp des Aufsteckadapters, montiert auf der Endoskopkamera dargestellt. Im Vergleich dazu ist die ursprüngliche Kamera mit den Drehrädchen abgebildet (oben). Wie man der Abbildung entnehmen kann, bewirkt der montierte Adapter nur eine geringfügige Vergrößerung der Außenkonturen der Kamera, wodurch keine Beeinträchtigungen der Ergonomie der Kamera bei der Verwendung als Handgerät auftreten.



Abb. 8-12 HD-Kamera ohne (oben) und mit Automatisierungsaufsatz (unten)

Der Nachteil dieser Ausführungsform der Antriebseinheit besteht in sehr eingeschränkter Auswahl der Elektromotoren und die fehlende Drehpositionsdetektierung.

Einen großen Vorteil bietet der Einsatz von bürstenlosen Servomotoren der Firma Faulhaber. Diese Elektromotoren verfügen über drei Hall-Sensoren, die um 120° zueinander versetzt sind. Mit Hilfe dieser Sensoren wird das Magnetfeld des Rotormagneten gemessen, so dass die Position des Rotors ermittelt werden kann. Diese Rückmeldung ist von besonders großer Bedeutung für den Aufbau eines Autofokussystems.

Die Länge dieses Motors beträgt ca. 25 mm. Beim Einsatz eines Planetengetriebes mit einer 16 : 1 Untersetzung erhöht sich die Länge der Antriebseinheit auf fast 35 mm. Damit überschreitet sie die Abmaße des zur Verfügung stehenden Bauraums. Aus diesen Gründen wurde eine andere Anordnung der Antriebselemente für den Aufbau mit diesen Motoren ausgearbeitet.

Um den Platz in axialer Richtung zu sparen, wurde der Motor parallel zu dem Planetengetriebe angeordnet und mittels einer zusätzlichen Stirnradtriebstufe miteinander verbunden (siehe Abbildung 8-13). In der Abbildung 8-14 ist die Antriebseinheit des Aufsteckadapters mit paralleler Anordnung der Motoren und Planetengetriebe dargestellt.

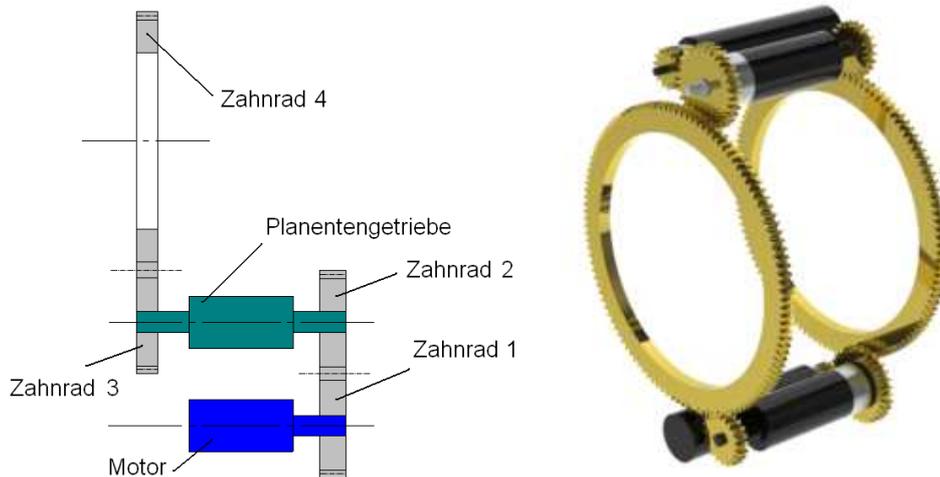


Abb. 8-13 Schematischer Aufbau (links) und ein 3D-Modell (rechts) der Antriebseinheit mit paralleler Anordnung des Elektromotors und des Planetengetriebes für den Aufsteckadapter der HD-Kamera

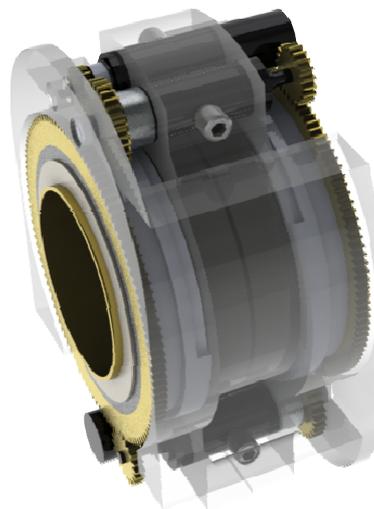


Abb. 8-14 Antriebseinheit für den Aufsteckadapter mit den Faulhaber-Motoren [Matz10]

Der Motorhalter hat Bohrungen für Motore und Getriebe, deren Abstände sich aus den Teilkreisdurchmessern der Zahnräder ergeben. Zur Fixierung der Motoren und Getriebe in den Bohrungen der Halterung werden Schrauben, welche die Motore seitlich einklemmen, verwendet.

Der an das Getriebe geschraubte Flansch (siehe Abbildung 8-15) dient dazu, die Zwischenwelle, auf der sowohl das Zahnrad der ersten Stirnradstufe als auch das Getrieberitzel des Planetengetriebes sitzen, mittels eines Kugellagers zu lagern und die Welle zum Planetengetriebe auszurichten. Das zweite Wellenende wird in der Bohrung der Motorhalterung kugellagert.



Abb. 8-15 Getriebeflansch mit der Wellenlagerung (oben) und komplette Getriebeeinheit (unten) [Matz10]

Der aufgrund des geringen Durchmessers und des vorhandenen Positionsgebers ausgewählte Motor der Firma Faulhaber verfügt über ein Nenndrehmoment von 0,36 mNm. Zum Umleiten des Drehmoments vom Motor zum Planetengetriebe wird ein Stirnradgetriebe mit der Untersetzung von 2,1 : 1 verwendet. In Verbindung mit dem dazugehörigen Planetengetriebe resultiert eine Untersetzung von 16 : 1. Die Einleitung des Drehmoments auf die magnetische Kupplung erfolgt über die zweite Stirnradtriebstufe mit einer Untersetzung von 6 : 1.

Das Gesamtdrehmoment ergibt sich somit unter der Berücksichtigung der Wirkungsgrade der einzelnen Getriebestufen zu:

$$M_{\text{ges}} = M_{\text{Motor}} \cdot i_{\text{ges}} \cdot \eta_{\text{ges}} \quad (8-3)$$

$$M_{\text{ges}} = 32,7 \text{ mNm}$$

Für das Planetengetriebe der Firma Faulhaber wurde der im Datenblatt angegebene Wirkungsgrad von 80 Prozent verwendet. Für die Stirnradtriebbestufen wurden die Werte des Herstellers für die Messingzahnräder im Trockenlauf von 75 Prozent angenommen.

Die Nenndrehzahl verringert sich somit wie folgt:

$$n = \frac{n_{\text{Motor}}}{i_{\text{gesamt}}} \quad (8-4)$$

$$n = 231 \frac{1}{\text{min}}$$

Eine komplette Umdrehung von 360° dauert somit 0,26 s. Da aber die Drehrädchen nur um 100° für den Zoom und 180° für den Fokus bewegt werden, ergeben sich jeweils die Zeiten von 0,072 s und 0,13 s.

	Untersetzungsverhältnis	max. Drehzahl [1 / min]	Wirkungsgrad [%]	Drehmoment [mNm]
Elektromotor	---	46.500	52	0,360
Stirnradgetriebe	2,1 : 1	22.143	75	0,567
Planetengetriebe	16 : 1	1.384	80	7,258
Stirnradgetriebe	6 : 1	231	75	32,659

Tabelle 8-2 Charakteristische Kenngrößen der Antriebseinheiten mit den Faulhaber-Motoren

In der Abbildung 8-16 sind die Einzelbauteile für den Aufbau eines Aufsteckadapters mit den Faulhaber-Motoren und den parallel angeordneten Planetengetrieben dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass für den Aufbau dieser Lösung mehr Bauteile verwendet werden, als bei dem vorherigen Aufbau. Dies liegt in der Notwendigkeit des Umleitens des Drehmoments durch die parallel angeordneten Elektromotore und Planetengetriebe.



Abb. 8-16 Einzelbauteile des Aufsteckadapters mit paralleler Anordnung des Elektromotors und des Planetengetriebes für einen Aufsteckadapter der HD-Kamera

Die Tests des Aufsteckadapters mit paralleler Anordnung des Elektromotors (Faulhaber) und des Planetengetriebes haben gezeigt, dass es durch die Fertigungstoleranzen aller Teile zum Verkanten der kleinen Zahnräder (Modul 0,3 mm) kommen kann, wodurch ein aufwendiges Nachjustieren der beweglichen Teile erforderlich war. Beim Aufbau von weiteren Prototypen ist es deswegen ratsam, höhere Fertigungsgenauigkeiten einzuhalten. Dies ist z.B. durch das Fräsen der kompletten Motorhalterung ohne Umspannen des Werkstücks zu erreichen.

8.1.2 Weiterentwicklung des Aufsteckadapters

Die Weiterentwicklung des Aufsteckadapters betrifft vor allem die Einhaltung der Zertifizierungsnormen. Zum Ersten soll die elektrische Sicherheit der Konstruktion gewährleistet werden. Dies kann dadurch erfolgen, dass die verbauten Elektromotoren von der Motorhalterung durch die Kunststoffhülse getrennt werden. Allerdings würde diese Maßnahme nicht komplett ausreichen, da der elektrische Strom der Motoren über die elektrisch leitfähigen Zahnräder zu den Gehäuseteilen fließen kann. Durch das Auskleiden der Innenseite des Gehäuses mit isolierenden Folien oder durch ihre Isolierbeschichtung, wie z.B. Parylen, lässt sich dies vermeiden.

Im Weiteren soll auch die Autoklavierbarkeit der Baugruppe gewährleistet werden. Das Gehäuse lässt sich durch Laserschweißen abdichten. Allerdings müssen die inneren Teile Temperaturen von 134°C aushalten, was entsprechende Anforderungen an die Permanentmagnete der Motoren und an die magnetischen Kupplungen stellt. Auch der elektrische Stecker muss dampfdicht sein, was die Verwendung von Steckern mit Kunststoffisolierung ausschließt. Einige Hersteller bieten solche Stecker an, bei denen die Pins durch das Vergießen mit Glas isoliert werden.

Ein weiterer Schritt zur Entwicklung eines marktfähigen Produkts betrifft die Ergonomie. Die ersten Tests haben gezeigt, dass der Adapter zu nah an der Okularmuschel sitzt, so dass diese sich schwer betätigen lässt. Dies erfordert eine Umkonstruktion des Gehäuses, zum Beispiel durch seitliche Einbuchtungen am Gehäuse, wie es in der Abbildung 8-14 dargestellt ist.



Abb. 8-17 Aufsteckadapter mit dem modifizierten Gehäuse [Matz10]

Ein wichtiger Punkt bei der Gestaltung des Aufsteckadapters betrifft dessen Einsatzbereich. Soll die automatisierte Kamera als Handgerät genutzt und die Linsenverstellung durch das manuelle Betätigen der Knöpfe realisiert werden, so ist es sinnvoll, die Bedienelemente gleich auf dem Gehäuse des Aufsteckadapters zu platzieren. Ein 3D-Modell dieser Ausführungsform ist in der Abbildung 8-18 dargestellt. Bei der Verwendung der Kamera mit Mikroskopen ist es besser, die Bedienung separat aufzubauen.



Abb. 8-18 Automatisierte Kamera mit den Bedienelementen auf dem Gehäuse [Matz10]

Es ist auch denkbar, dass dieser Adapter nicht nur für eine Kamera, sondern für eine Reihe von Endoskopkameras verwendet werden kann. Da die Kameras aufgrund der unterschiedlichen Optiken verschiedene Bauräume entlang der optischen Achse zur Verfügung stellen, muss die Länge des Adapters variabel gestaltet werden. Die Länge des Gehäuses ließe sich durch an die jeweiligen Kameras angepasste Abstandsringe adaptieren. Dies erfordert jedoch, dass die Durchmesser der Optikgehäuse dieser Kameras ungefähr gleich sind.

8.2 Automatisiertes C-Mount-Objektiv

Für die Entwicklung der integrierten Lösung einer motorisierter Endoskopkamera wird auf der Basis des vorhandenen optischen Systems der Image 1HD ein Objektiv mit integrierten Aktorsystemen aufgebaut, das über einen C-Mount-Anschluss mit dem digitalen Bildaufnehmer verbunden wird (siehe Abbildung 8-19). Diese Anordnung erlaubt einen universellen Einsatz des automatisierten Objektivs mit unterschiedlichen digitalen Bildaufnehmern.



Abb. 8-19 Automatisiertes Kameraobjektiv mit einem C-Mount-Drei-Chip-Bildaufnehmer

8.2.1 Diskussion der Konzepte

Das Objektiv der Kamera weist drei bewegliche Linsengruppen auf. Durch die Verschiebung der ersten Linsengruppe wird die Fokusfunktion realisiert. Für die Änderung der Brennweite werden die beiden anderen Linsengruppen bewegt, wobei die Bewegungen dieser Linsengruppen miteinander nichtlinear gekoppelt sind.

Die Motorisierung der Fokuslinsengruppe kann sowohl durch den Einsatz eines Linearantriebs, als auch mittels eines Rotationsmotors mit Umformung der Rotation in eine Translation erfolgen. Aufgrund der Kopplung der Bewegungen der Zoomlinsen ist es problematisch, diese mit Linearantrieben zu realisieren.

Deutlich praktischer ist der Einsatz eines Rotationsmotors, der eine Drehkulisse, mit den der Bewegung entsprechenden Kurvenbahnen der Zoomlinsen dreht. Sind die zu bewegenden Linsenfassungen gegen das Verdrehen gesichert, so wird die Rotation der Drehkulisse in eine Translation umgewandelt. Basierend auf diesen Ideen wurden einige Antriebskonzepte entwickelt, die im Folgenden vorgestellt werden.

In der Abbildung 8-20 ist der Aufbau dargestellt, bei dem die Verstellung der Fokuslinse mittels des Linearantriebs mit permanentmagnetischer Selbsthaltung (LMPS 7,6 x 3,2) erfolgt. Die Rotation der Drehkulisse zur Verstellung der Brennweite der Kamera wird mittels eines hohlzylindrischen dreiphasigen Synchronmotors durchgeführt. Dieser Motor muss jedoch speziell hierfür entwickelt werden.

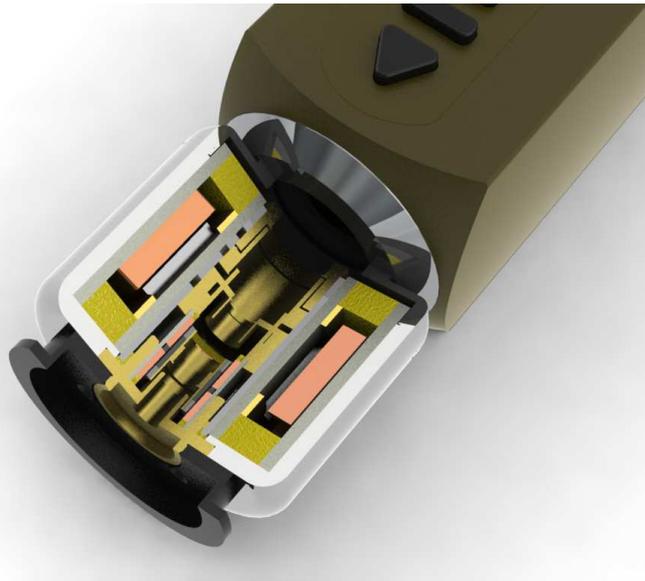


Abb. 8-20 Aufbau einer motorisierten Kamera mit einem Linearantrieb für die Verstellung der Fokussierlinsengruppen und einem hohlzylindrischen dreiphasigen Synchronmotor zur Rotation der Zoomdrehkullisse

Der Einsatz des hohlzylindrischen Motors für die Rotation der Drehkullisse ermöglicht einen sehr kompakten Aufbau, bei dem der Aktor um die zu bewegende Linsengruppe gebaut wird. Der Aufbau dieses Motors ist in der Abbildung 8-21 dargestellt.

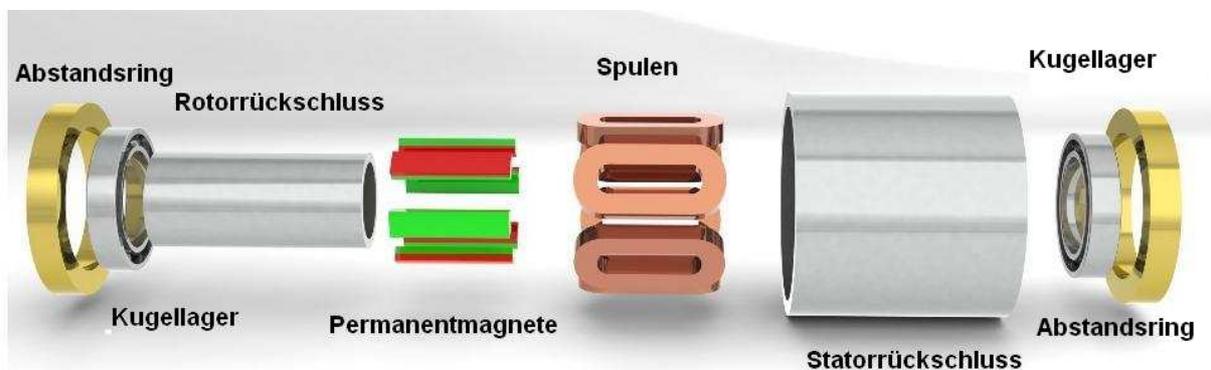


Abb. 8-21 Schematischer Aufbau eines hohlzylindrischen dreiphasigen Synchronmotors

Der Rotor des Motors besteht aus acht alternierend magnetisierten, sektorförmigen Permanentmagneten, die auf einem weichmagnetischen Rückschluss aufgeklebt werden (siehe Abbildung 8-22, rechts). Im weichmagnetischen Statorrückschluss werden sechs Kupferspulen befestigt (siehe Abbildung 8-22, links). Der Rotor wird mittels der Kugellager im Stator gelagert, die seitlich angebrachten Abstandsringe aus Messing dienen der Anpassung des Außendurchmessers des Kugellagers auf den Innendurchmesser des Statorrückschlusses.

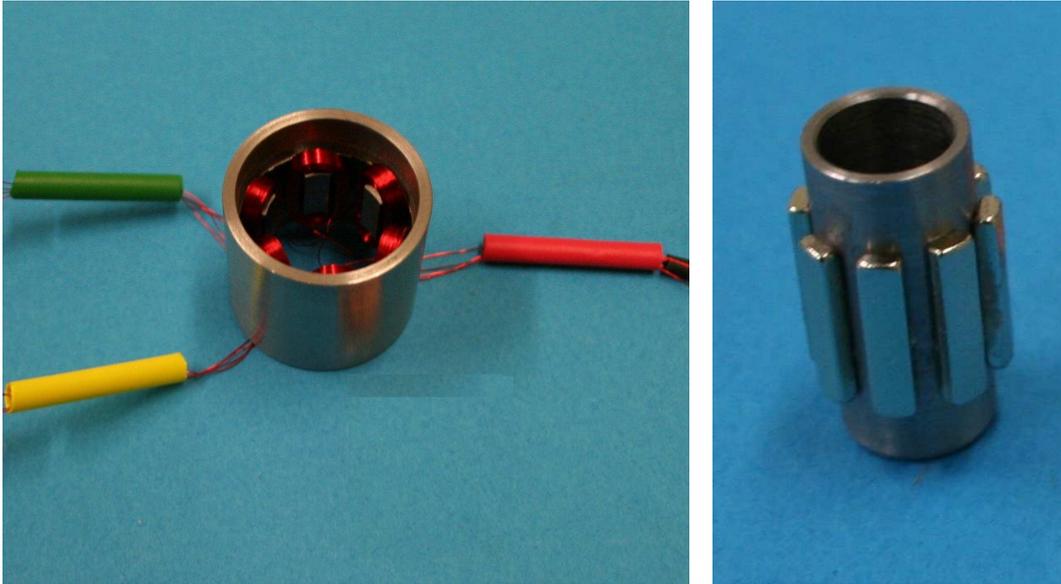


Abb. 8-22 Stator (links) und Rotor (rechts) des entwickelten Prototypen des hohlzylindrischen Motors

Die experimentellen Untersuchungen des Versuchsmusters haben gezeigt, dass dieser genügend Drehmoment, ca. 15 mNm bei einer Gesamtleistung von 1,5 W, zur Verfügung stellt. Um Bauraum zu sparen, lässt sich die Drehkulisse mit den Bewegungsbahnen für die Verstellung der Linsen aus weichmagnetischem Werkstoff fertigen und als Rotorrückschluss einsetzen.

Nachteilig stellt sich heraus, dass diese Art von Motoren mit den erforderlichen Abmaßen und Drehmomenten nicht kommerziell erhältlich ist. Die Entwicklung eines solchen Motors stellt keine große Herausforderung dar. Will man ihn jedoch zur Serienreife bringen, treibt dies die Kosten des Aktors hoch.

Aus diesen Gründen wird die Weiterentwicklung des hohlzylindrischen Motors zunächst nicht weiterverfolgt. Alternativ dazu lässt kommerziell erhältlicher Motor (wie für den Aufbau des Kameraadapters) verwenden. Analog zum vorherigen Aufbau wird auch hier die Fokusliniengruppe mittels eines Linearantriebs bewegt.

Der Einsatz des Linearantriebs bietet aufgrund seiner hohen Dynamik besonders in der Kombination mit einem Autofokussystem erhebliche Vorteile. Wird das nicht benötigt, kann die Bewegung der Fokuslinse auch mittels eines konventionellen Rotationsmotors und einer entsprechenden Mechanik zur Umformung der Rotation in Translation erfolgen. Das Modell dieses Aufbaus ist in der Abbildung 8-23 dargestellt.

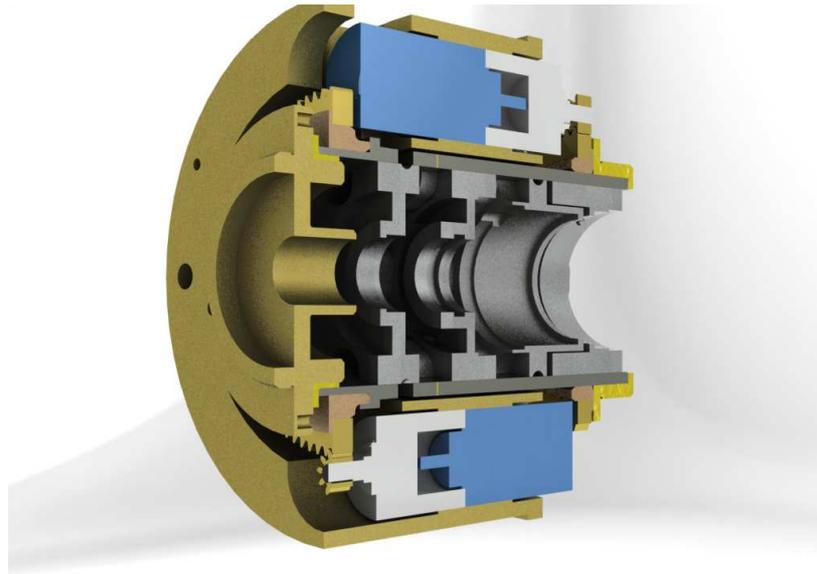


Abb. 8-23 Aufbau einer motorisierten Kamera, bei der sowohl die Fokus- als auch die Zoomlinsen mittels kommerziell erhältlicher Motoren bewegt werden

Durch den Einsatz von Getrieben lässt sich das Drehmoment vergrößern. Die kommerziell erhältlichen Planetengetriebe mit einem Durchmesser von 6 - 8 mm erlauben sehr hohe Übersetzungen im Bereich bis zu 1000 : 1, bei relativ geringen Längen von nur 15 bis 30 mm, so dass sehr hohen Drehmomenten verfügbar sind. Allerdings vermindert dies beträchtlich die Dynamik des gesamten Antriebssystems.

8.2.2 Versuchsmuster

Um eine schnelle Produktentwicklung zu ermöglichen, wurde entschieden, zur Motorisierung des C-Mount-Objektivs kommerziell erhältliche Elektromotore mit Planetengetrieben einzusetzen. Es werden dabei die Motoren der Firma Namiki wie für den Adapter verwendet.

In der Abbildung 8-24 ist der Aufbau zur Bewegung der Fokuslinsengruppe dargestellt. Die Linsenfassung (4) wird in eine Aufnahme (3) eingeklebt. Diese Aufnahme enthält oben und unten zwei Bohrungen, in die zwei Stifte zur Führung in der Drehkulisse (5) eingesetzt werden. Die Verdrehsicherung (2) enthält vier Laschen, die in die entsprechenden Ausschnitte der Aufnahme der Linsenfassung passen und diese gegen das Verdrehen sichern. Die Verdrehsicherung wird an der vorderen Scheibe des Objektivgehäuses befestigt. Bei einer Drehung der Drehkulisse wird somit die Fokuslinsengruppe bewegt und folgt den entsprechenden Bahnen.

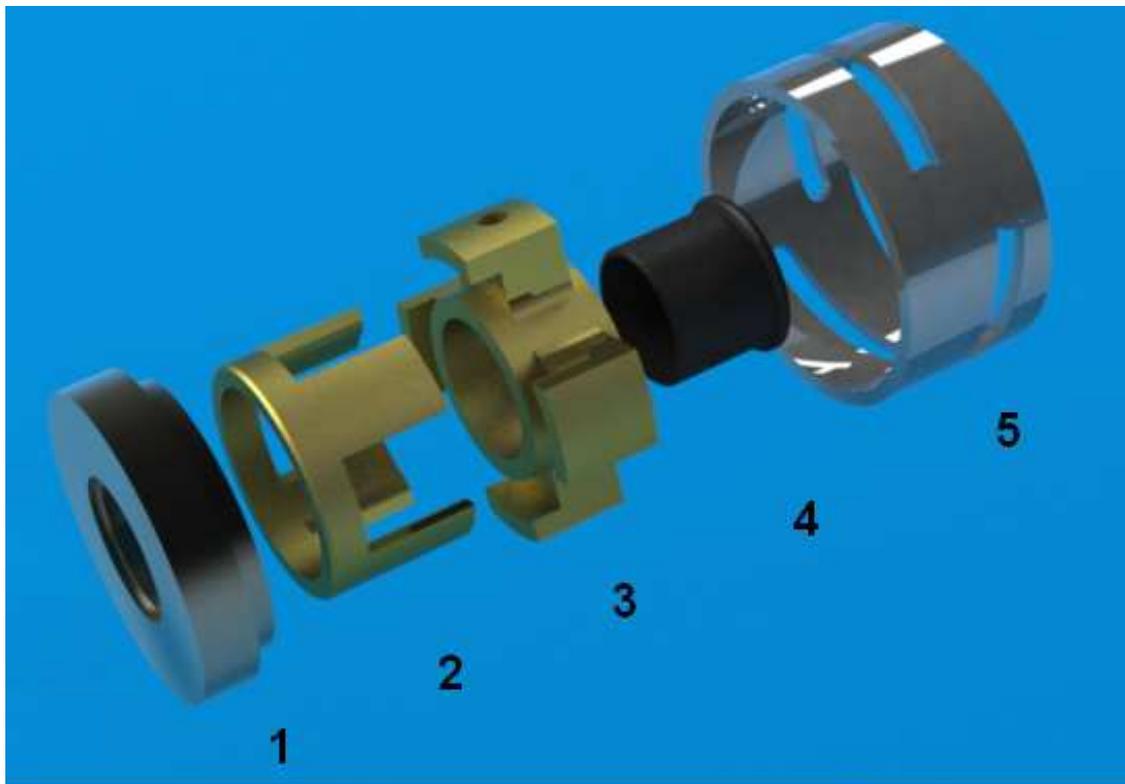


Abb. 8-24 Aufbau der Mechanik zum Bewegen der Fokuslinsengruppe. 1 = vordere Scheibe des Objektivgehäuses, 2 = Verdrehsicherung, 3 = Aufnahme für die Linsenfassung, 4 = Linsenfassung, 5 = Drehkulisse mit der Bewegungsbahn [Schu11]

Im Gegensatz zur Fokuslinsengruppe müssen für die Verstellung der Brennweite nicht eine Linse, sondern zwei Linsengruppen nichtlinear bewegt werden. Dazwischen befindet sich eine feststehende Linse.

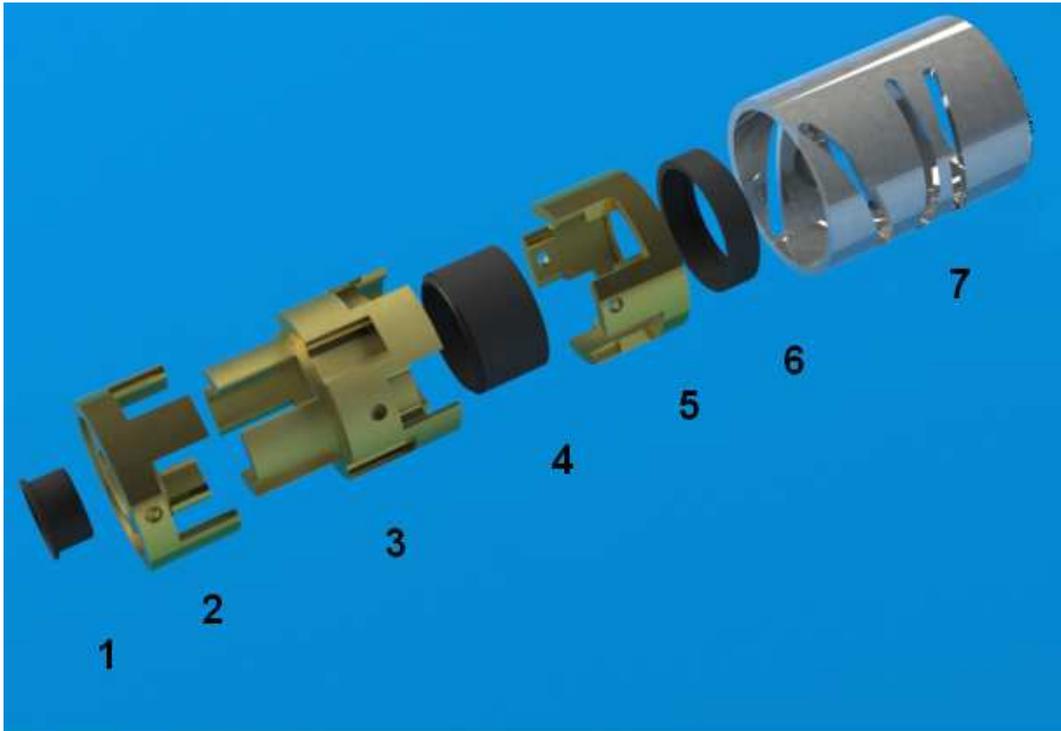


Abb. 8-25 Mechanik zum Bewegen der Zoomlinsengruppe. 1 = vordere Zoomlinse, 2 = Aufnahme für die vordere Zoomlinsenfassung, 3 = Aufnahme für die Linsenfassung der feststehenden Linsengruppe, 4 = Linsenfassung der feststehenden Linsengruppe, 5 = Aufnahme für die hintere Zoomlinsenfassung, 6 = hintere Zoomlinsenfassung, 7 = Drehkulissee mit den Bewegungsbahnen [Schu11]

Der Aufbau der Mechanik zur Verstellung der Brennweite ist in der Abbildung 8-25 dargestellt. Die beiden Zoomlinsen (1) und (6) werden in die Aufnahmen (2) und (5) eingeklebt, die mittels der Laschen zu der Aufnahme der feststehenden Linse ausgerichtet werden. Mittels der Stifte in den Bohrungen dieser Aufnahmen werden die Linsengruppen in den Bahnen der Drehkulissee (7) ausgerichtet. Die feststehende Linsengruppe verläuft am Umfang der Drehkulissee und führt keine axiale Verschiebung aus. Bei Drehung der Drehkulissee werden mittels der Laschen, die gegen die Verdrehung gesicherten Linsenfassungen entlang der optischen Achse entsprechend den eingearbeiteten Bahnen bewegt.

Die beiden Teile des optischen Systems inklusive der entsprechenden Mechanik werden in das Objektivgehäuse eingebaut und zueinander axial ausgerichtet.

Das optische System, inklusive der auf der dargestellten Weise montierten Mechanik, wird im Rahmen, an dem alle Kamerakomponenten befestigt werden, platziert und dort anhand von Gleitlagern aus PEEK geführt. Auf die beiden Drehkulisseen zum Verstellen der beweglichen Linsengruppen werden Zahnräder befestigt.

Die Elektromotoren mit den aufgeschraubten Planetengetrieben werden zuerst in kleinen Motorhalterungen fixiert und dann ebenfalls am Rahmen befestigt. Die Zahnräder der beiden Stirnradtriebsebenen zum Übertragen des Drehmoments von der Antriebseinheit auf die Drehkulisseen werden mittels drei Schrauben zueinander justiert. Dies geschieht dadurch, dass zwei seitliche Schrauben in die entsprechenden Gewindebohrungen eingeschraubt werden.

Die mittlere Schraube drückt gegen den Rahmen. Auf diese Weise lassen sich die Fertigungs- und Montagetoleranzen ausgleichen sowie die Zahnräder gegen das mechanische Verklemmen sichern. Das so aufgebaute Modul, noch ohne Gehäuse, ist in der Abbildung 8-26 abgebildet.

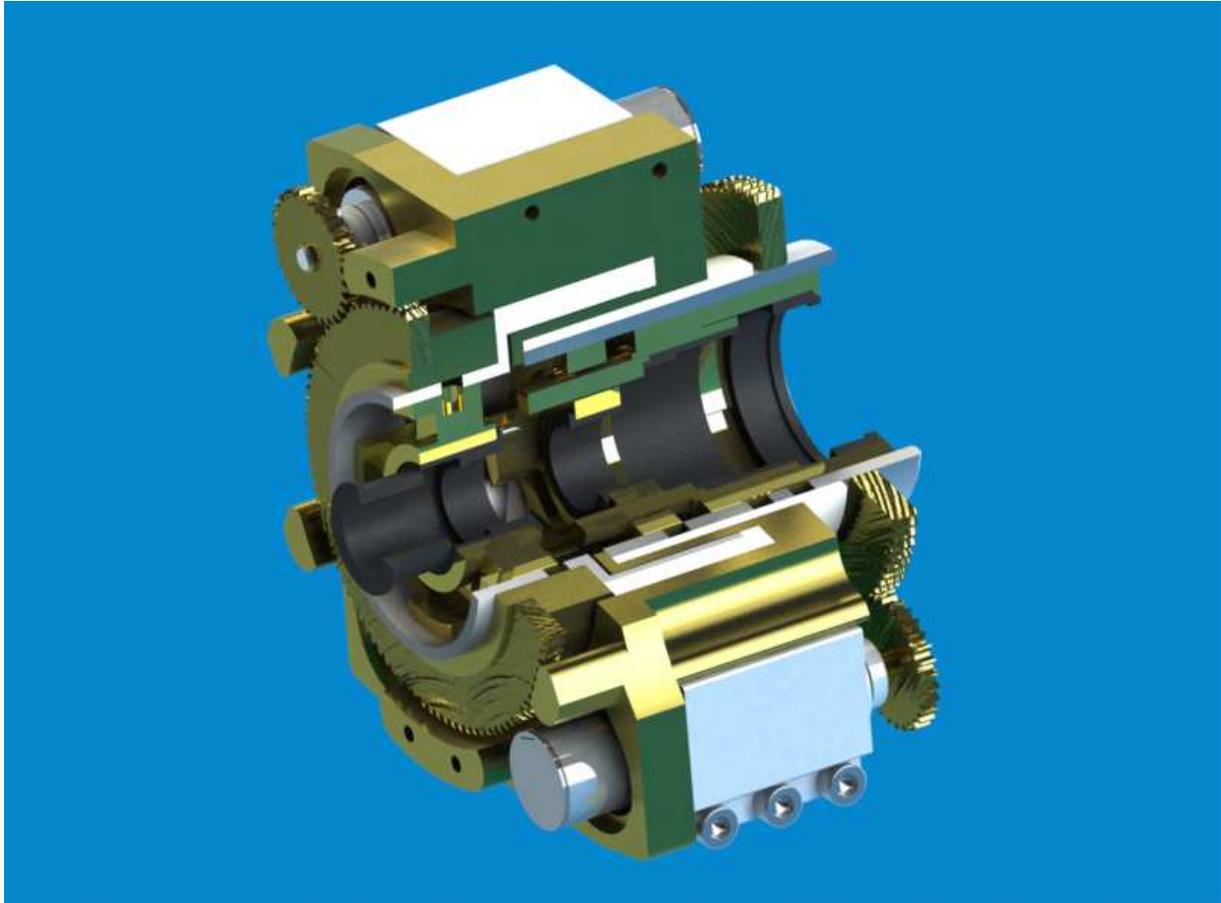


Abb. 8-26 C-Mount-Objektiv ohne Gehäuse mit integrierten Antrieben [Schu11]

Für diesen Aufbau werden die gleichen Elektromotoren wie für den Kameraadapter verwendet. Das gesamte Drehmoment des Antriebs, bestehend aus einem Motor und einem direkt angeschlossenen Planetengetriebe beträgt 18,9 mNm. Durch die zusätzliche Untersetzung der Stirnradtriebstufe mit einer Untersetzung von 3,3 : 1 wird das Drehmoment auf ca. 46,8 mNm erhöht.

Im letzten Schritt wird die gesamte Konstruktion in einem Gehäuse untergebracht. An das Gehäuse wird von vorn eine Schnellkupplung zur Aufnahme der Okularmuschel des Endoskops angeschraubt. Von der anderen Seite wird ein Adapter mit dem entsprechenden C-Mount-Gewinde befestigt, so dass der Kamerakopf mit dem Bildaufnehmer damit verbunden werden kann. In der Abbildung 8-27 ist das Modell des gesamten Aufbaus dargestellt.

Ein Nachteil dieser Konstruktion besteht in der Verwendung eines Kabels für die Stromversorgung der Elektromotoren, zusätzlich zum Kamerakabel. Der Kamerakopf enthält drei programmierbare Tasten, die sich auf seiner oberen Seite befinden. Diese Knöpfe können unter Umständen, z.B. bei der Verwendung der automatisierten Kamera als Handbediengerät, zur Steuerung der Motoren genutzt werden.

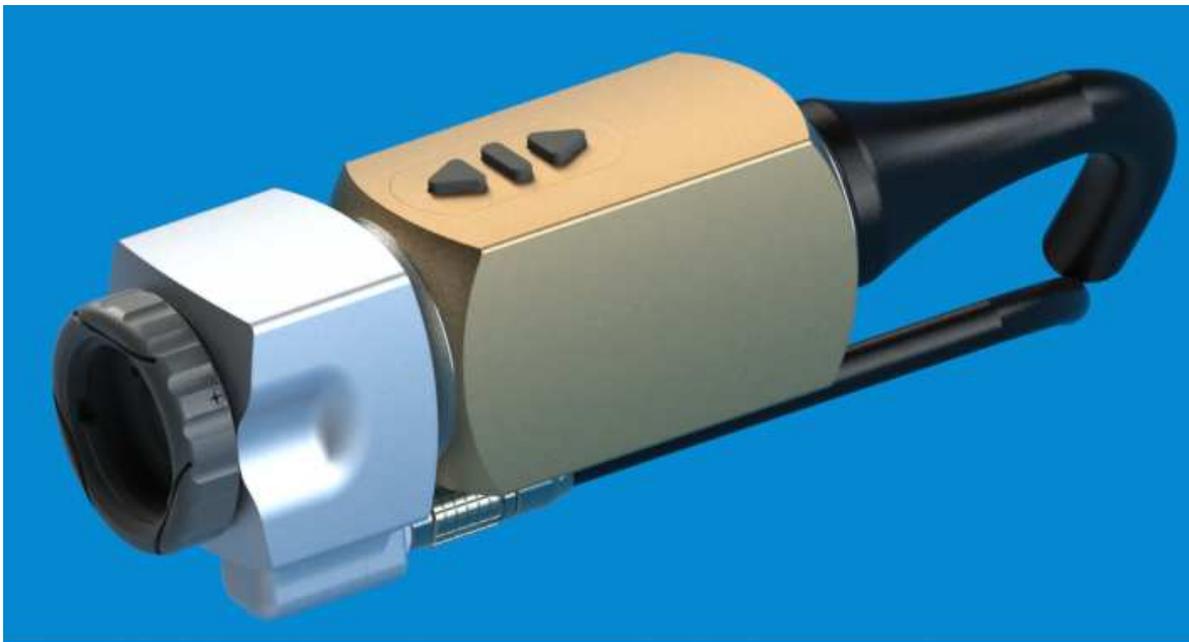


Abb. 8-27 Zusammengebaute Kameraeinheit mit dem automatisierten C-Mount-Objektiv [Schu11]

8.2.3 Gestaltung der Positionsrückmeldung

Im Gegensatz zu den kontinuierlichen und bistabilen Linearantrieben, die nur im gesteuerten Zustand betrieben werden, ist bei dem Betrieb der Endoskopkamera in einem Autofokussystem eine Positionsrückmeldung erforderlich.

Die verwendeten Elektromotoren der Firma Faulhaber haben den entscheidenden Vorteil, dass sie bereits mit einem Positionsrückmeldesystem ausgestattet sind. Ein Auszug aus dem Datenblatt dieser Motoren ist in der Abbildung 8-28 abgebildet.

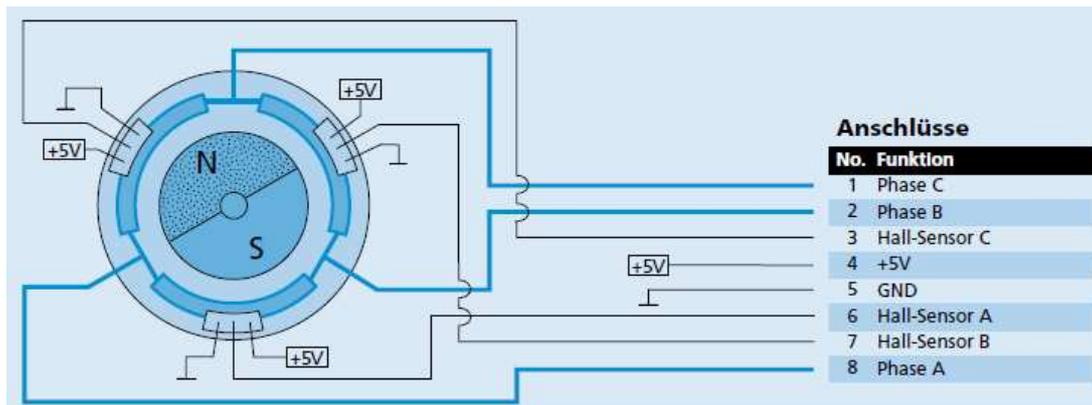


Abb. 8-28 Positionsrückmeldung des bürstenlosen DC Servomotors, Serie 0620 B der Firma Faulhaber [Faul11b]

Diese Elektromotoren verfügen über zwei analoge Hallsensoren, die um 120° zu einander versetzt im Stator platziert sind und direkt die Winkelstellung des Rotormagnets detektieren. Gemäß den Herstellerangaben liegt die Positioniergenauigkeit dieses Motors bei 3.000 Punkten pro Umdrehung. Die Position des Rotors wird ständig detektiert und nachgeregelt. Aufgrund der hohen Untersetzung durch ein Planetengetriebe und einer zusätzlichen Stirnradgetriebebestufe wird die Auflösung der Positioniergenauigkeit noch einmal deutlich erhöht.

Bei der Verwendung von sensorlosen Motoren lässt sich die Positionsrückmeldung durch einen zusätzlichen Winkelgeber erreichen. Ein solcher Sensor ist in der Abbildung 8-29 dargestellt.

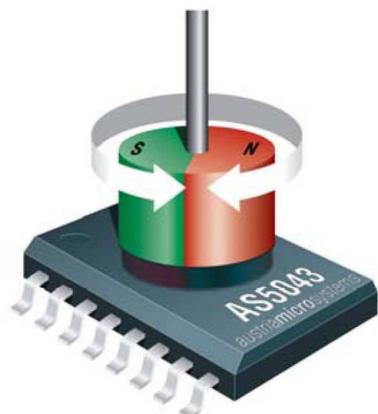


Abb. 8-29 Winkelgeber [Aust10]

In diesem Sensor messen vier Hall-Sensoren simultan das Streufeld eines Permanentmagneten, woraus proportional zum Rotationswinkel eine Ausgangsspannung resultiert. Der Permanentmagnet lässt sich dann auf das kleinere Zahnrad der Stirnradgetriebestufe aufkleben, so dass mittels des vorgestellten Sensors seine Winkelstellung ermittelbar ist.

8.2.4 Weiterentwicklung des automatisierten Objektivs

Die Vorschläge für die Weiterentwicklung des Aufsteckadapters in Bezug auf die elektrische Sicherheit, die Autoklavierbarkeit und die Ergonomie sind auch für die Weiterentwicklung des motorisierten C-Mount Objektivs zutreffend.

Das motorisierte C-Mount-Objektiv stellt eine Vorstufe bei der geplanten Entwicklung einer vollautomatisierten Kamera dar. Diese Kamera soll alle Bauteile, inklusive den Objektiv mit den Motorsystemen und den Bildaufnehmer in einem Gerätegehäuse vereinigen. Dadurch lassen sich die Nachteile bezüglich der Kontaktierung und der Ergonomie der gesamten Baugruppe beseitigen. Würde man die Entwicklung der trennbaren Objektive verfolgen, ist es notwendig, die Schnittstelle des automatisierten Objektivs und des digitalen Bildaufnehmers neu zu gestalten, da das zusätzliche Kabel für die Stromversorgung der Motoren und die Eingangs- und Ausgangskanäle der Positionssensoren die Handhabung der Kamera beträchtlich stört.

Diese Verbindung könnte in erster Linie durch die Ausstattung des Objektivs und des Videokopfs mit elektrischen Steckern erfolgen, so dass die Ankopplung rein mechanisch erfolgen würde. Es wäre auch denkbar, die Energieversorgung induktiv einzukoppeln, wodurch man auf die mechanischen Stecker verzichten könnte. Auch die Informationsverbindung kann dann auf drahtlosem Weg realisiert werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Eine Recherche bei den Medizintechnikherstellern hat ergeben, dass zurzeit eine verstärkte Entwicklung von Haltearmsystemen für den laparoskopischen Einsatz stattfindet. Ein großes Hindernis ergibt sich aus dem Umstand, dass die Endoskopkameras zur Bildvergrößerung oder zur Nachfokussierung vom operierenden Arzt manuell betätigt werden müssen. Dies lässt sich durch die im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelten bildgebenden Systeme deutlich verbessern.



Abb. 9-1 Einsatz eines motorisierten Haltearms der Firma AKTORmed GmbH bei einer laparoskopischen Operation (oben), Haltearm mit der Endoskopkamera und einem starren Endoskop (unten) [Akto10]

Die Mehrzahl der neuartigen Mensch-Maschine-Schnittstellen für den medizinischen Einsatz, wie z.B. die Sprachsteuerung oder das Eye-Tracking, befinden sich zurzeit noch in einem frühen Stadium der Entwicklung und sind eher eine Seltenheit im praktischen Einsatz im operativen Alltag.

Einen interessanten Ansatz bietet dabei die Firma AKTORmed GmbH mit einem autoklavierbaren Bedienteil (siehe Abbildung 9-2), das auf den chirurgischen Instrumenten ergonomisch untergebracht werden kann. Mittels dieses Bedienerteils, kann der Arzt, ohne die chirurgischen Instrumente loszulassen, den Haltearm und die Kameraeinstellungen selbst steuern, wodurch die Assistenzperson völlig entbehrlich wird.



Abb. 9-2 Bedienerteil zur ergonomischen Steuerung des Haltearms, an einem chirurgischen Instrument fixiert [Akto10]

Ein weiterer Trend bei der Neuentwicklung von modernen Operationssystemen betrifft die Teleoperationen. Dabei sitzt der Chirurg wenige Meter vom Patienten entfernt und bewegt die Operationsinstrumente mittels einer Steuereinheit, das Geschehen wird dabei auf einem Monitor beobachtet. Der Einsatz solcher Systeme erfordert zwangsweise die Verwendung vollautomatisierter Kamerasysteme in einer Kombination mit Endoskopen oder Mikroskopen. Da diese Art von Teleoperationssystemen als zukunftsweisend gilt, folgt zwangsläufig eine verstärkte Entwicklung im Bereich der bildgebenden Systeme.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden eine Reihe funktionsfähiger Aktorkonzepte zur Verwendung in sehr unterschiedlichen optischen Systemen entwickelt und aufgebaut.

Es steht nunmehr eine Fülle von Lineardirektantrieben für den Einsatz in Chip-on-the-Tip-Optiken zur Verfügung. Die experimentellen Untersuchungen der Labormuster bestätigen die mittels FEM-Berechnungen ermittelten Werte hinsichtlich der Kräfte und der Verfahrswege. Die konstruierten Motoren zeichnen sich durch einen sehr einfachen Aufbau und durch vergleichsweise geringe Anforderungen an die Fertigungs- und Montagegenauigkeiten aus.

Ein weiterer Vorteil dieser Antriebe ist ihre Variabilität. Aufgrund des unkomplizierten Aufbaus lassen sie sich leicht für andere Anwendungen umkonstruieren und mittels FEM-Berechnung optimieren.

Wegen der geringeren Auflösung und der damit verminderten Qualität der optischen Abbildung der CCD- oder CMOS-Chips stellen die Chip-on-the-Tip-Endoskope noch keine große Konkurrenz zu den konventionellen starren Endoskopen mit den proximalseitigen Drei-Chip-Kameras dar. Allerdings lässt die fortschreitende Entwicklung der CMOS-basierten Bildaufnehmer darauf schließen, dass bereits in naher Zukunft sehr kleine Bildaufnehmer mit hoher Auflösung und deutlich geringeren Preisen als die CCD-Chips auf den Markt kommen.

Besonders große Vorteile bieten die hier entwickelten miniaturisierten Linearantriebe beim Einsatz in flexiblen Endoskopen. Mit einem distal angeordneten Bildaufnehmer ist zu erwarten, dass die Fiberskopes vom Markt verdrängt werden. Allerdings verwendet man bisher bei diesen Endoskopen nur Fixfokusoptiken. Damit wird die weitere Miniaturisierung der flexiblen Endoskope beschränkt. Der Einsatz von fokussierbaren Optiken erlaubt das Öffnen der Blende und dadurch die Verwendung wenig lichtempfindlicher, aber deutlich kleinerer Bildsensoren.

Durch den Einsatz von Aktoren lassen sich aber auch bei medizinischen Kameras für starre Endoskope und Operationsmikroskope erhebliche Vorteile erreichen. Das Feedback des Projektpartners hat gezeigt, dass der entwickelte Adapter für die Motorisierung der Kamera sehr gute Chancen hat, bereits in naher Zukunft zu einem medizintechnischen Produkt zu werden. Der Einsatz dieses Adapters erlaubt es dem Anwendern, bei geringen Investitionskosten eine vollmotorisierte Kamera zu nutzen.

Resümierend kann man festhalten, dass die optischen Systeme mit Linearaktoren eine ganze Reihe von Vorteilen gegenüber den Fixfokusoptiken bieten. Außerdem gibt es derzeit keine kommerziell erhältlichen Aktorsysteme, die für die Chip-on-the-Tip-Endoskope verwendet werden können. Im Bereich der Automatisierung der proximalseitigen Kameras bieten die selbst entwickelten Motoren eine bessere Möglichkeit der Anpassung an die geometrischen und funktionellen Randbedingungen.

10 Symbole und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung	Einheit
a	objektseitige Schnittweite	mm
a'	bildseitige Schnittweite	mm
a_h	hintere objektseitige Grenze des Schärfetiefenbereichs	mm
a_v	vordere objektseitige Grenze des Schärfetiefenbereichs	mm
a'_h	hintere bildseitige Grenze des Schärfetiefenbereichs	mm
a'_v	vordere bildseitige Grenze des Schärfetiefenbereichs	mm
a_{ges}	gesamtes Schärfentiefebereich	mm
B	magnetische Induktion (Flussdichte)	T
B_s	Sättigungsinduktion	T
d_{Airy}	Durchmesser des Airy-Scheibchens	μm
d_{Cu}	Durchmesser des Kupferdrahts	mm
d_I	Durchmesser der Drahtisolierung	mm
d_{EP}	Durchmesser der Eintrittspupille	mm
d_u	zulässiger Unschärfedurchmesser	μm
f	objektseitige Brennweite	mm
f'	bildseitige Brennweite	mm
H	magnetische Feldstärke	A/m
H_c	Koerzitivfeldstärke	A/m
i	elektrischer Strom	A
k	Blendezahl	---
k_F	Füllfaktor einer Spule	---
M	Drehmoment	Nm
M_B	Bildmodulation	---
M_O	Objektmodulation	---
n	Anzahl der elektrischen Impulse pro Sekunde	---
P	elektrische Leistung	W
R	elektrischer Widerstand	Ω
t_i	Impulsdauer	s
t_p	Pausendauer	s

w	halber Feldwinkel objektseitig	°
w'	halber Feldwinkel bildseitig	°
y'	halbe Bildhöhe	mm
y	halbe Objekthöhe	mm
η	Wirkungsgrad	---
δ	Luftspalt im magnetischen Kreis	mm
Θ	magnetische Durchflutung	A Win.
λ	Wellenlänge des Lichts	nm
v	Ortsfrequenz	Lp/mm
v_{\max}	maximal auflösbare Ortsfrequenz	Lp/mm
μ_0	Permeabilität des Vakuums	Vs/Am
μ_r	relative Permeabilität	---
τ	Zeitkonstante der Spule	s

Abkürzung

Bedeutung

BSLA	bistabiler Linearantrieb
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
DLC	Diamond Like Carbon
LMPS	Linearmotor mit permanentmagnetischer Selbsthaltung
Lp	Linienpaar
MTF	Modulationstransferfunktion
PEEK	Polyetheretherketon
RLLA	Reluktanz- und lorentzkraftbetriebener Linearantrieb

11 Literaturverzeichnis

- [Akto10] AKTORmed GmbH, Firmenhomepage, <http://www.aktormed.com>, vom November 2010
- [Anha03] Anhalt, T., J., Endoscopic video camera with magnetic drive focusing, United States Patent, US 6,522,477 B2, 2003
- [Anha06] Anhalt, T., J., Magnetische Fokussier- und / oder Zoomvorrichtung, Deutsche Patentschrift, DE 602 24 317 T2, 2006
- [Aust10] Austriamicrosystems AG, Firmenhomepage, <http://www.austriamicrosystems.com>, vom Mai 2010
- [BBra10] B. Braun Melsungen AG, Firmenhomepage, <http://www.bbraun.de>, vom August 2010
- [Berg02] Bergmann, W., Werkstofftechnik 2, Werkstoffherstellung - Werkstoffverarbeitung - Werkstoffanwendung, 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2002
- [Bobr10a] Bobrowski, A., Aufbau einer Ansteuerung für die Zoom- und Fokusfunktion einer Endoskopkamera, Studienarbeit am Fachgebiet Mikrotechnik, Technische Universität Berlin, 2010
- [Bobr10b] Bobrowski, A., Elektromagnetischer Linearantrieb für eine Endoskopkamera, Projektarbeit am Fachgebiet Mikrotechnik, Technische Universität Berlin, 2010
- [Faul10] Dr. Fritz Faulhaber, Firmenhomepage, <http://www.faulhaber-group.com>, vom Juni 2010
- [Faul11a] Dr. Fritz Faulhaber, Technische Informationen, Firmenschrift, 2. Auflage, Schönaich, 2010 - 2011
- [Faul11b] Dr. Fritz Faulhaber, Bürstenlose DC Servomotoren, Serie 0620 B, Datenblatt, 2010

- [Faul11c] Dr. Fritz Faulhaber, Planetengetriebe, Serie 06/1, Datenblatt, 2010
- [Faul11d] Dr. Fritz Faulhaber, Motion Controller, 4 - Quadranten - PWM mit RS232-Schittstelle, Serie MCBL 3003/06 S, Datenblatt, 2010
- [Fisc08] Fischer, R., E., Tadic-Galeb, B., Yoder, P., R., Optical System Design, Second Edition, McGraw-Hill Company, New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Dehli, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto, 2008
- [Gear02] Geary, J., M., Introduction to Lens Design, Willmann-Bell Inc., Richmond, USA, 2002
- [Gros05] Gross, H., Handbook of Optical Systems, Volume 1: Fundamentals of Technical Optics, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2005
- [Gros09] Gross, H., Hillenbrand, M., Mitschunas, B., Sinzinger, S., Lehrgangsunterlagen, 12. Ilmenauer Lehrgang: Modellierung optischer Abbildungen, Ilmenau, 2009
- [Hafe03] Haferkorn, H., Optik: Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen, 4. Auflage, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2003
- [Hech09] Hecht, E., Optik, 5. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, Wien, 2009
- [Höfe09] Höfer, J., Akil, G., Linearantrieb mit permanentmagnetischer Selbsthaltung, Projektarbeit am Fachgebiet Mikrotechnik, Technische Universität Berlin, 2009
- [Höfe10] Höfer, J., Hohlzylindrischer Synchronmotor für eine Endoskopkamera, Studienarbeit am Fachgebiet Mikrotechnik, Technische Universität Berlin, 2010
- [Kall08] Kallenbach, E., Eick, R., Quendt, P., Ströhla, T., Feindt, K., Kallenbach, M., Elektromagnete: Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung, 3. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008
- [Karl09] Karl Storz Endoskope, Produktkatalog, Telepräsenz: Bildgebende Systeme - Dokumentation - Beleuchtung - Gerätewagen, 9. Ausgabe, Tuttlingen, 2009

- [Karl10] Karl Storz Endoskope, Firmenhomepage, <http://www.karlstorz.de>, vom September 2010
- [Lehr04] Lehr, H., Schrader, S., Walter, S., Wanderfeld-Linearmotor, Deutsche Patentschrift, DE 103 23 629, 2004
- [Litf97] Litfin, G. (Hrsg.), Technische Optik in der Praxis, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1997
- [Matz10] Matzigewski, S., Entwicklung eines Antriebsadapters zur Steuerung der Zoom- und Fokusfunktion einer HD-Kamera, Diplomarbeit am Fachgebiet Mikrotechnik, Technische Universität Berlin, 2010
- [Mein97] Meins, J., Elektromechnik, Teubner Verlag, Stuttgart, 1997
- [Nami10] Namiki Precision Jewel Co., Ltd., Firmenhomepage, <http://www.namiki.net>, vom Juni 2010
- [Nass08] Nasse, H. H., Wie liest man MTF-Kurven, Teil I, Carl Zeiss, Geschäftsbereich Photo-Objektive, Firmenschrift, 2008
- [Nass09] Nasse, H. H., Wie liest man MTF-Kurven, Teil II, Carl Zeiss, Geschäftsbereich Photo-Objektive, Firmenschrift, 2009
- [Naum83] Naumann, H., Schröder, G., Bauelemente der Optik: Taschenbuch für Konstrukteure, 4. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 1983
- [NET10] NET, New Electronic Technology GmbH, Firmenhomepage, <http://www.net-gmbh.com>, vom Juni 2010
- [Hech05] Hecht, E., Optik, 4. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, Wien, 2005
- [Olym10] Olympus Winter & Ibe GmbH, Firmenhomepage, <http://www.olympus-owi.de>, vom November 2010
- [Pedr96] Pedrotti, F., Pedrotti, L., Bausch, W., Schmidt, H., Optik, Eine Einführung, Prentice Hall Verlag, München, London, Mexico, New York, Singapur, Sydney, Toronto, 1996

- [Phil00] Philippow, E., Grundlagen der Elektrotechnik, Verlag Technik, Berlin, 2000
- [Rait99] Raith, W., Lehrbuch der Experimental-Physik, Elektromagnetismus, Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York, 1999
- [Reic80] Reichel, K., Praktikum der Magnettechnik, Franzis - Verlag, München, 1980
- [Rich10] Richard Wolf, Firmenhomepage, <http://www.richard-wolf.com>, vom September 2010
- [Schö10] Schölly Fiberoptic GmbH, Firmenhomepage, <http://www.schoelly-group.com>, vom September 2010
- [Schr05] Schrader, S., Entwicklung von elektromagnetischen Linearantrieben und Autofokusoptiken für endoskopische Systeme, Dissertation am Fachgebiet Mikrotechnik, Technische Universität Berlin, 2005
- [Schr07] Schröder, G., Treiber, H., Technische Optik: Grundlagen und Anwendungen, 10. Auflage, Vogel Verlag, Würzburg, 2007
- [Schu11] Schulze, M., Entwicklung eines motorisierten Antriebsmoduls für ein Endoskopobjektiv, Diplomarbeit am Fachgebiet Mikrotechnik, Technische Universität Berlin, 2011
- [Schw08] Schwarzkopf, M., Varianten fokussierbarer Chip-on-the-Tip-Endoskopoptiken, Studienarbeit am Fachgebiet Mikrotechnik, Technische Universität Berlin, 2008
- [Schw09] Schwarzkopf, M., Entwicklung eines optischen Systems für die endoskopische Blutgefäßentnahme, Diplomarbeit am Fachgebiet Mikrotechnik, Technische Universität Berlin, 2009
- [Smit05] Smith, W. J., Modern Lens Design, McGraw-Hill Company, New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Dehli, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto, 2005
- [Stöl06] Stölting, H. - D., Kallenbach, E., Handbuch elektrische Kleinantriebe, 3. Auflage, Hanser Verlag, München, 2006

- [Vacu02] Vacuumschmelze, Weichmagnetische Werkstoffe und Halbzeuge, Firmenschrift, Hanau, 2002
- [Vacu07] Vacuumschmelze, Selten-Erd-Dauermagnete, Firmenschrift, Hanau, 2007
- [Voge08] Vogel, W., Miniaturisierter Linearantrieb für eine Endoskopkamera, Diplomarbeit am Fachgebiet Mikrotechnik, Technische Universität Berlin, 2009
- [Voge11a] Vogel, W., Linearmotor mit permanentmagnetischer Selbsthaltung, Erfindungsmeldung, Technische Universität Berlin, IPAL GmbH, 2010
- [Voge11b] Vogel, W., Reluktanz- und Lorentzkraftbetriebener Linearantrieb, Erfindungsmeldung, Technische Universität Berlin, IPAL GmbH, 2010
- [Wint09] Wintermantel, E., Ha, S.-W., Medizintechnik - Life Science Engineering: Interdisziplinarität, Biokompatibilität, Technologie, Implantate, Diagnostik, Werkstoffe, Zertifizierung, Business, 5. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009
- [WOM10] W.O.M. World of Medicine AG, <http://www.world-of-medicine.com>, Firmenhomepage, vom September 2010
- [Xion10] XION GmbH, Firmenhomepage, <http://www.xion-medical.com> vom September 2010
- [Zema09] ZEMAX Optical Design Programm, User's Manual, Seattle, USA, 2009