



1. Einleitung und Struktur der Arbeit

Die aktive Magnetlagerung ist ein exzellentes Beispiel für ein mechatronisches System und erlaubt die Erweiterung der Funktionalität konventioneller Lager. Zum einen kann die berührungslose Lagerung an sich schon das Hauptargument für den Einsatz eines Magnetlagersystems sein. Zum anderen können durch Überwachung der Mess- und Stellgrößen des aktiven Magnetlagers zusätzliche Informationen über den Prozess gewonnen werden und Eingriffe sind sicherer und früher möglich. Die Eigenschaften der Lagerung können per Software auch im laufenden Betrieb verändert werden um das Systemverhalten gezielt zu beeinflussen und nicht zuletzt werden teils vollkommen neue Funktionen ermöglicht, die auf rein konventionellem Wege nicht zu erzielen sind. Das mechanische System, z.B. der zu lagernde Rotor einer Pumpe, wird mit entsprechenden Sensoren zur Erfassung des (Ist-)Systemzustands, sowie geeigneten Aktuatoren (Magnetlager – hier in Form lagerloser Motoren) ausgerüstet. Vervollständigt wird dieses System durch einen Steuerungsrechner, der alle wichtigen Funktionen bereitstellt um das System entsprechend den jeweiligen Zuständen und Zielvorstellungen zu beeinflussen.

Die Begriffe *lagerloser Motor* oder auch synonym *Querkraftmaschine* bezeichnen eine spezielle Bauart einer aktiven magnetischen Lagerung. Der Begriff *lagerlos* bezieht sich hierbei darauf, dass kein separates Magnetlager verwendet wird, sondern die Lagerfunktion über eine zusätzliche Wicklung in der Antriebsmaschine erzeugt wird. Für bestimmte Kombinationen der Wicklungssysteme kann so der Antriebsfluss zur Erzeugung der Lagerkräfte mitgenutzt werden. Typische Vorteile von lagerlosen Motorsystemen gegenüber konventionellen Magnetlagersystemen liegen in der Einsparung von Bauraum und bei geringeren Kosten für die Leistungselektronik.¹ Nachteilig hingegen ist, dass der Magnetkreis eines lagerlosen Motors nicht so hoch ausgenutzt werden darf wie der konventioneller Maschinen, um das für die Funktion wichtige Superpositionsprinzip mit linearen Verhältnissen nicht zu verletzen.

Spaltröhre sind eine Besonderheit bei Antrieben in der Prozessindustrie und werden in Pumpen zur Trennung des Pumpenmediums von bestimmten Komponenten, insbesondere des Antriebssystems, verwendet. Der Name dieser zumeist aus bestimmten Edelstählen gefertigten Röhre rührt daher, dass diese in dem (Luft-) Spalt der Maschine zwischen Rotor und Stator eingesetzt werden, um die den Volumenstrom einschließenden Oberflächen hermetisch zu kapseln.

Für ein Antriebs- und Magnetlagersystem stellen Spaltröhre eine besondere Herausforderung dar. Zum einen erzeugen die jeweiligen Felder in den elektrisch gut leitenden Metallflächen Wirbelströme, die zu teils erheblichen Verlusten führen und den Wirkungsgrad der Maschine reduzieren. Andererseits erschwert diese elektrisch leitfähige

¹Die Lager- oder Tragwicklung einer dreiphasigen Querkraftmaschine kann von einer gewöhnlichen B6-Brücke gespeist werden, wie sie in der elektrischen Antriebstechnik seit vielen Jahren Standard ist. Aufgrund der hohen Stückzahlen in diesem Segment sind die B6-Brücken deutlich günstiger als z.B. zwei H-Brücken, die für eine vollständige Lagerebene benötigt würden. In Summe wären für die H-Brücken nicht nur zwei zusätzliche Schalter erforderlich, sondern jeder Schalter wäre aufgrund geringerer Stückzahlen auch teurer im Vergleich zu den Elementen einer B6-Brücke.



Kapselung vor allem auch den Einsatz von Sensoren zur Bestimmung der Rotorposition. Während der erste Aspekt bereits von Hülsmann [38] abgedeckt wurde, beschäftigt sich diese Arbeit unter anderem mit der Auslegung von Wirbelstrom-Abstandssensoren für ein solches System. Es wurden zwei Prototypen eines permanentmagneterregten lagerlosen Synchronmotors in Spaltrohren mit jeweils unterschiedlichen Wicklungsarten aufgebaut, eine adäquate Regelung der Systeme entworfen und die Ergebnisse experimentell untersucht.

1.1. Struktur der Arbeit

Im Anschluss an die eingangs erfolgten Definitionen der wichtigsten Begriffe wird in Kapitel 1 zunächst das Umfeld der Arbeit sowie die Motivation der durchgeführten Untersuchungen vorgestellt. Anschließend wird der Stand der Forschung der wichtigsten relevanten Bereiche diskutiert.

Die Inhalte der Arbeit gliedern sich im Wesentlichen in die Modellierung der wichtigsten Elemente, die Auslegung der Abstandssensorik, den Entwurf der einzelnen Regelungssysteme sowie die Darstellung der Versuchsaufbauten und erzielten Ergebnisse. Aufgrund des inhaltlichen Umfangs wurden die einzelnen Bereiche in mehrere Kapitel unterteilt.

Kapitel 2 beschreibt das elektromagnetische Basismodell der als stromgespeist angenommenen lagerlosen Motoren. Dieses Modell gilt für einen lagerlosen Synchronmotor mit Permanenterregung und zentriertem Rotor und wurde von Hülsmann [37, 38] erstellt. Exzentrizitätskräfte durch Rotorauslenkung werden linear superponiert. Dieses Modell in Wellendarstellung wird im Folgenden für die Regelung auf die Darstellung mit komplexen Raumzeigern überführt und in Feldkoordinaten beschrieben. Anhand des Modells wird eine Entkopplung der nichtlinearen Kraftgleichungen abgeleitet. Die wichtigsten Messmethoden und -ergebnisse zur Parametrierung des Basismodells werden vorgestellt und diskutiert.

Die Prüfstandsmessungen zeigten bei einer der untersuchten Maschinen ein Verhalten auf, das sich nicht mit dem Basismodell aus Kapitel 2 erklären lässt. In Kapitel 3 wird daraufhin ein erweitertes analytisches Modell hergeleitet und diskutiert, das diese Effekte berücksichtigt. Die Unzulänglichkeiten des Basismodells kommen bei einer exzentrischen Verschiebung des Rotors aus der Mittenposition zum Tragen. Das erweiterte Modell basiert auf einem über dem Statorumfang variablen Luftspalt und verwendet zur Beschreibung Leitwertwellen, eine Fourierreihe der magnetischen Leitfähigkeit als Funktion der Rotorexzentrizität. In mehreren Schritten werden die Einzelergebnisse vorgestellt und das Verhalten des erweiterten Modells diskutiert. Es werden einige Spezialfälle und Erweiterungsmöglichkeiten diskutiert. Das erweiterte Modell wird anhand von Prüfstandsmessungen parametrieren und mit den Ergebnissen des Basismodells verglichen.

In Kapitel 4 werden die unterlagerten Stellglieder für den Betrieb der lagerlosen Motoren vorgestellt. Einerseits wird das für die unterlagerte Stromregelung benötigte

Spannungsmodell von Antriebs- und Tragwicklung beschrieben und eine kurze Wiederholung zur Rotor(feld)orientierung gegeben. Andererseits erfolgt ein Überblick über die wichtigsten Eigenschaften der Leistungselektronik als Stellglied der unterlagerten Stromregelkreise.

Kapitel 5 beschreibt das mechanische Modell des zu lagernden Rotors. Die Antriebe werden unterhalb ihrer biegekritischen Drehzahlen betrieben, so dass der Rotor als Starrkörper angenommen wird. Zur Diskussion einzelner spezieller Effekte, sowie als Basis für weitere Arbeiten, schließt sich eine Modellierung als elastischer Körper mit der Methode der finiten Elemente an, einschließlich einer modalen Modellreduktion für das hochdimensionale FEM-Modell.

Kapitel 6 beschreibt die Auslegung von Wirbelstromsensoren zur Distanzmessung durch das metallische Spaltrohr. Zunächst werden die wichtigsten Grundlagen dargestellt und die Anforderungen an die Spaltrohrmaterialien sowie die daraus resultierenden Anforderungen an das restliche Sensorsystem diskutiert. Es wird ein hybrider Ansatz zur Optimierung des Sensorsystems vorgestellt, um mit geringem Messaufwand einen größtmöglichen Suchraum abzudecken.

Kapitel 7 präsentiert den Entwurf sowie einige Besonderheiten der unterlagerten Stromregelung. Einzelne Aspekte bei der Reglerauslegung werden diskutiert. Für den zeitdiskreten Reglerentwurf wird ein neues, exaktes Verfahren zur zeitdiskreten Auslegung von PI -Reglern nach dem Dämpfungsoptimum vorgestellt und mit zwei weiteren Verfahren verglichen. Die Implementierung der Regelungsstruktur wird vorgestellt und um einige Details wie Anti-Windup der Reglerintegralanteile, Parameteridentifikation an den Maschinen sowie den Einsatz von Kerbfiltern ergänzt.

Kapitel 8 beschreibt die Regelung der Rotordynamik, bzw. die Positionsregelung des Lagersystems sowie einen zusätzlichen Koppelmechanismus zwischen Antriebs- und Lagerwicklungen, der in Messungen identifiziert wurde.

In Kapitel 9 werden die wichtigsten Prüfstände und Hardwareaufbauten, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, präsentiert.

Abschließend werden die wichtigsten Ergebnisse in Kapitel 10 zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Entwicklungs- und Untersuchungsmöglichkeiten gegeben.

In den Anhängen werden Einzelthemen weiter vertieft, die für eine Darstellung im Hauptteil zu umfangreich erschienen.

1.2. Umfeld

1.2.1. Hermetisch abgedichtete Pumpen

Hermetisch abgedichtete Pumpen werden bei besonders empfindlichen Medien oder bei Medien mit einem hohen Schadenspotenzial zur leakagefreien Förderung von Flüssigkeiten eingesetzt. Entweder werden Umwelt und Anlagen durch die hermetische Abdichtung vor einem aggressiven, respektive toxischen Medium geschützt, oder es wird verhindert, dass ein empfindliches Fördermedium von außen verunreinigt wird. Gegenüber konventionellen Pumpen besitzen hermetische Pumpen den Vorteil, dass sie ohne wartungsintensive (Steril-)Gleitringdichtungen auskommen und dadurch einen besseren Leakage- und Ausfallschutz der Pumpe gewährleisten.

Die Kategorie der hermetisch abgedichteten Pumpen lässt sich in Magnetkupplungspumpen und Spaltrohr(motor)pumpen unterteilen. In beiden Bauformen werden Medium und Anlage durch ein einzelnes, zumeist metallisches Spaltrohr oder einen Spalttopf voneinander getrennt.

Bei einer Magnetkupplungspumpe wird die Pumpe über eine externe Antriebswelle angetrieben. Diese Welle wird konventionell gelagert und ist durch einen Spalttopf von dem Fördermedium und dem Pumpenrotor getrennt. Die Kraftübertragung auf den Pumpenrotor erfolgt berührungslos durch die Spalttopfkapselung hindurch mit einer Permanentmagnetkupplung. Der Pumpenrotor selbst ist typischerweise durch hydrodynamische Gleitlager gelagert.

Der Begriff *Spaltrohrmotorpumpe* wird verwendet, wenn ein Motor als Direktantrieb für den Pumpenrotor in die Pumpe integriert ist. Sowohl Rotor als auch Stator des Motors sind mit einem Spaltrohr umschlossen und der 'Luftspalt' zwischen Rotor und Stator wird von dem Fördermedium durchströmt.

Es existieren verschiedene Bauformen von Spaltrohrmotorpumpen. Im Folgenden werden der grundsätzliche Aufbau und die wichtigsten Eigenschaften dargestellt, wobei sich die Diskussion auf die am häufigsten eingesetzten Kreiselpumpen beschränkt. Abbildung 1.1 zeigt schematisch den Aufbau einer Spaltrohrmotor-Kreiselpumpe mit axialem Eintritt. Die Spaltröhre sind in gelb dargestellt.² Durch Rotation erzeugt das Laufrad³ eine Druckdifferenz zwischen Saugseite und Druckseite der Pumpe, die den Volumenstrom antreibt. Der eigentliche Antrieb befindet sich in der in grau schraffiert dargestellten Antriebs- und Lagerungseinheit. Die konkrete Ausführung der Rotorlagerung wird hier bewusst nicht dargestellt. Klassisch werden Gleitlager verwendet, es wurden aber auch bereits erfolgreich verschiedene Arten von magnetischen Lagerungen eingesetzt. Die Art der Lagerung ist für die Erläuterung des Prinzips

²Hier wurden zunächst vereinfacht alle Oberflächen mit einem Spaltrohr ausgekleidet dargestellt. In der Praxis ist dies nur dort erforderlich, wo bestimmte Oberflächeneigenschaften nicht anderweitig erfüllt werden können, wie z.B. im eigentlichen Pumpengehäuse aus bearbeitetem Edelstahl. Eine detailliertere Unterscheidung erfolgt später. Ebenso wurden die Dimensionen der Spaltröhre und des Luftspalts stark vergrößert dargestellt, zugunsten einer übersichtlicheren Darstellung des Prinzips.

³Für ein intuitiveres Verständnis wurde das Laufrad in Abbildung 1.1 vereinfacht als ein Propeller stilisiert dargestellt.

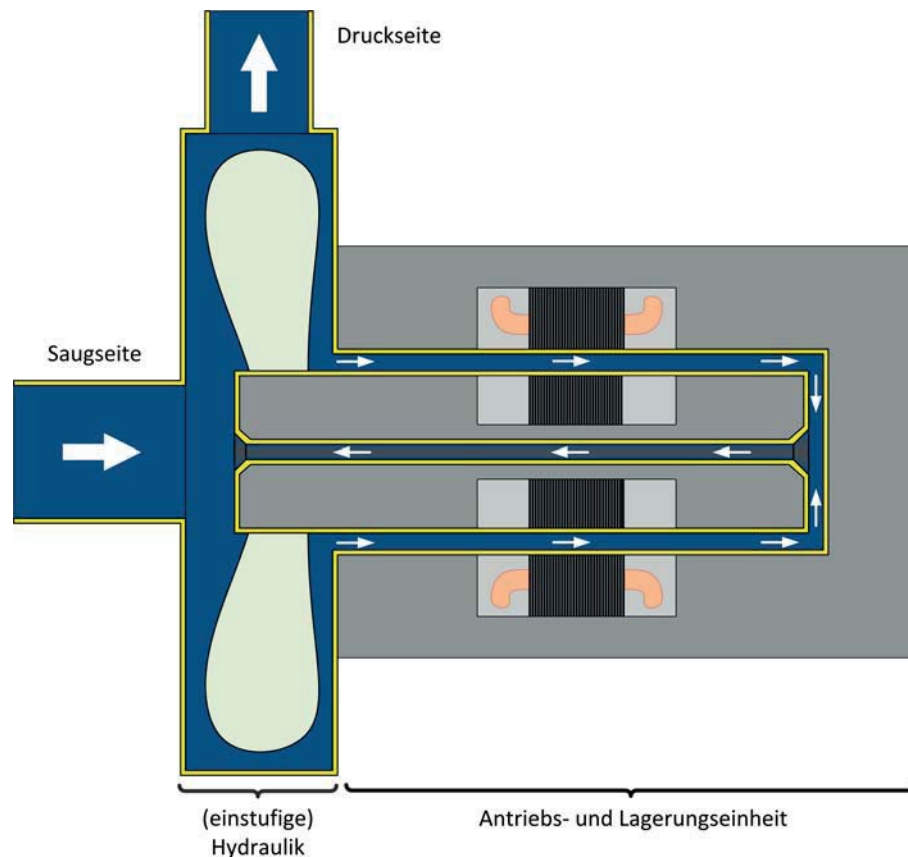


Abbildung 1.1.: Schematische Darstellung einer Spaltrohrmotorpumpe mit axialem Eintritt

zunächst unerheblich – das Hauptaugenmerk der Abbildung und folgenden Diskussion liegt auf den Spaltrohren und Volumenströmen.

Wie eingangs erwähnt wurde, sollen die Spaltrohre eine leakagefreie Förderung sicherstellen. Dies erfordert unter anderem die Korrosionsbeständigkeit der Materialien. Im Bereich der sterilen Prozesstechnik werden darüber hinaus beispielsweise noch hohe Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit gestellt, mit Rautiefen im Mikrometerbereich.⁴ Hier haben sich metallische Spaltrohre aus verschiedenen Edelstahllegierungen etabliert. Da diese elektrisch leitfähig sind, entstehen durch die magnetischen Antriebsfelder Wirbelströme in dem Spaltrohr. Diese Wirbelströme erwärmen das Spaltrohr und führen zu einem reduzierten Wirkungsgrad des Pumpensystems. Zusätzlich erschwert diese elektrisch leitfähige Barriere signifikant die Positionsbestimmung für eine mögliche Magnetlagerung des Rotors.⁵ Hier ist eine möglichst dünnwandige Ausführung der Spaltrohre vorteilhaft. Um auch bei größeren Drücken die notwendige Stabilität der Rohrwände zu gewährleisten, können diese durch einen geeigneten Unterbau des Rotors gestützt werden [68].

Ein zweiter interessanter Aspekt bei Spaltrohrmotorpumpen ist die Aufteilung in einen Haupt- und einen Nebenvolumenstrom. Ein Teil des Mediums füllt den Spalt

⁴Detailliertere Anforderungen der Steriltechnik sind der DIN EN 12462 (Biotechnik – Leistungskriterien für Pumpen) zu entnehmen.

⁵Eine detailliertere Beschreibung dieser Problematik erfolgt in Abschnitt 6.2.



zwischen den beiden Spaltrohren. Bei hinreichender Fließgeschwindigkeit kann das Fördermedium zur Kühlung des Antriebs und der Spaltrohre verwendet werden und für eine Gleitlagerung des Rotors genutzt werden. In der in Abbildung 1.2 skizzierten Anordnung sorgt die Hohlwellenverbindung zwischen Druck- und Saugseite der Pumpe für die notwendige Druckdifferenz für eine hinreichend große Fließgeschwindigkeit. Diese ist bei bestimmten Anwendungsgebieten zwingend erforderlich, um eine vollständige Reinigung oder Sterilisierung der Pumpe mit einem entsprechenden Medium sicherzustellen und zu verhindern, dass das Medium lokal 'absteht' oder sich überhitzt. Bei der Inline-Bauform, einer innendurchströmten Pumpe, wird die erforderliche Druckdifferenz für den Nebenvolumenstrom über so genannte Impeller erbracht. Hierbei handelt es sich um einem zusätzlichen Propeller im Hauptvolumenstrom der Hohlwelle, die die notwendige Druckdifferenz zur Aufrechterhaltung einer konstanten Strömung im Nebenströmungspfad des Luftspalts erzeugt. Abbildung 1.2 illustriert dies und zeigt das Beispiel einer magnetgelagerten, mehrstufigen Inline-Spaltrohrmotorpumpe, wie sie von Hülsmann beschrieben wurde [38].

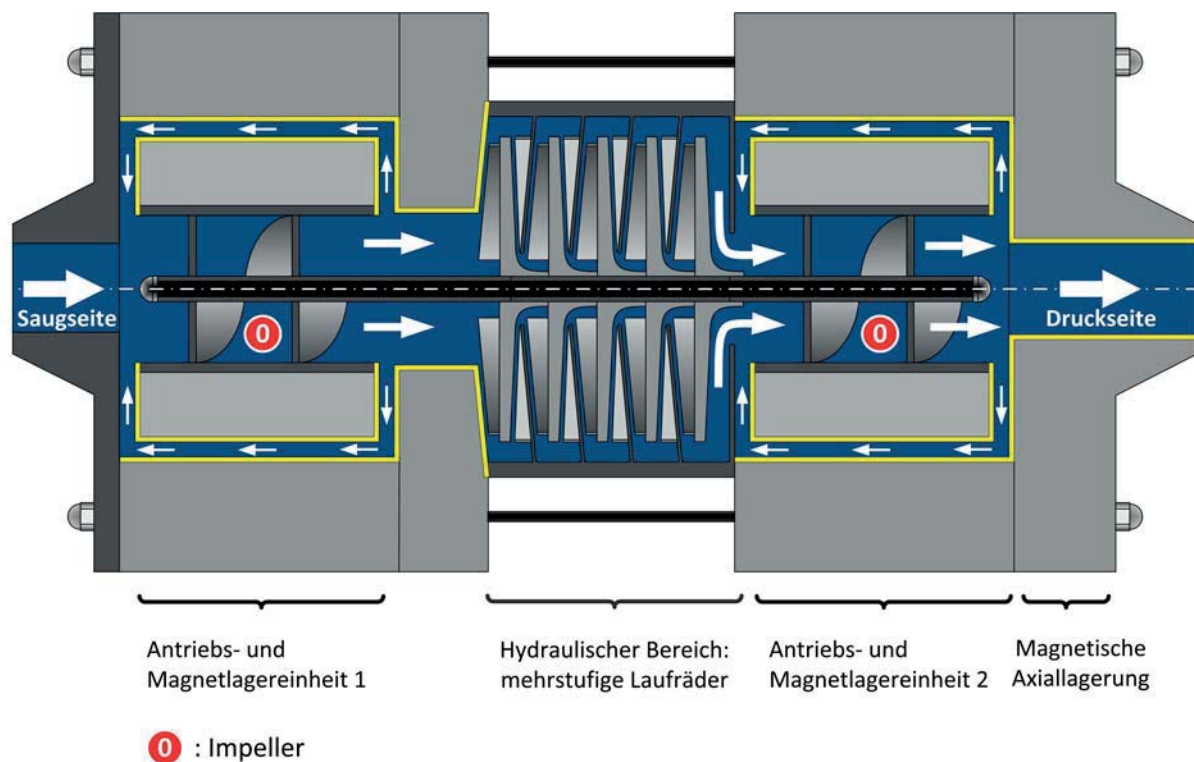


Abbildung 1.2.: magnetgelagerte Inline-Spaltrohrmotorpumpe nach Hülsmann [38]

Schließlich definiert die Art der Lagerung wichtige Eigenschaften des Pumpensystems. Der Einsatz von Kugellagern verbietet sich durch die Anforderungen der Prozessindustrie, so dass in typischen Spaltrohrmotorpumpen stattdessen Gleitlager eingesetzt werden. Die Lagerkraft wird hierbei durch einen dünnen Flüssigkeitsfilm des Pumpenmediums erbracht. Diese Lagerform besitzt eine hohe Steifigkeit und die Tragkraft nimmt mit geringer werdendem Luftspalt bzw. einem sich verdünnenden

Flüssigkeitsfilm zu. Das größte Problem dieser Bauform ist der Trockenlauf der Pumpe, wenn der Zustrom des Fördermediums unterbrochen wird oder das Medium stark ausgast. In diesem Fall kann sich kein Flüssigkeitsfilm zur Erzeugung der Lagerkraft ausbilden und die Lagerflächen reiben aufeinander und werden beschädigt oder zerstört; der Abrieb verunreinigt das Fördermedium. Ebenfalls problematisch sind der Anlauf der Pumpe, bis sich ein tragfähiger Flüssigkeitsfilm ausgebildet hat, sowie die Einschränkung der Fördermedien⁶ [26].

Eine Alternative zu hydraulischen Gleitlagern stellen Magnetlager dar. Durch die Messung der Rotorposition und die gerichtete Erzeugung von Magnetkräften kann der Pumpenrotor unabhängig von den Eigenschaften des Mediums berührungs- und damit verschleißfrei gelagert werden. Der Luftspalt bzw. Abstand zwischen Rotor und Stator kann in einem größeren Bereich gewählt werden.⁷ Darüber hinaus können durch die Überwachung von Stell- und Regelgrößen der Magnetlagerung zusätzliche Informationen über den Pumpprozess sowie den Zustand der Pumpe gewonnen werden [28]. Hierdurch lassen sich der Wartungsaufwand und die Ausfallwahrscheinlichkeit der Pumpe weiter reduzieren und die Prozesssicherheit erhöhen.⁸ Dem gegenüber stehen jedoch einige Nachteile einer magnetischen Lagerung, primär handelt es sich hier um die zusätzlichen Kosten sowie die erhöhte Komplexität durch die Komponenten der Magnetlagerung und die Abnahme der Lagersteifigkeit bzw. der maximalen Lagerkräfte mit zunehmender Auslenkung. Anders als bei Gleitlagern kann es so bei großen Störkräften⁹ dazu kommen, dass die maximale Tragfähigkeit des Lagers überschritten wird und der Rotor so abstürzen könnte. Für derartige Situationen oder einen Ausfall der Magnetlageransteuerung müssen zusätzlich so genannte Fang- oder Not(lauf)lager vorgesehen werden. Bei einer magnetgelagerten Spaltröhropumpe bieten sich hier zusätzliche Gleitlager an: bei einem Absturz im Fördermedium werden die Vorteile beider Lagertypen kombiniert. Dieses Vorgehen wurde u.a. bereits von Gempp beschrieben [26]. Ein weiterer Nachteil der Magnetlagerung besteht in möglicherweise höheren elektrischen¹⁰ und hydraulischen¹¹ Verlusten des magnetgelagerten Spaltröhropumpensystems.

⁶Es werden Medien mit guten Schmiereigenschaften benötigt, hohe Feststoffanteile oder die bereits beschriebene potenzielle Ausgasung eines Mediums sind problematisch.

⁷Bei hydraulischen Gleitlagern muss der Spalt für ausreichend große Tragkräfte möglichst klein sein, wodurch u.a. die Anforderungen an die Fertigungstoleranzen steigen. Bei der Magnetlagerung begrenzt im Wesentlichen der zum Abstand proportionale magnetische Widerstand die Größe des maximal zulässigen Luftspalts – hier sind deutlich größere Werte zulässig als für Gleitlager.

⁸Durch eine kontinuierliche Prozessüberwachung können zusätzliche Qualitätsinformationen gewonnen werden und die Konformität mit Prozessstandards protokolliert werden. Insbesondere im Premiumsegment mit besonders hohen Anforderungen stellt die durchgängige Protokollierung der Prozesskonformität einen zusätzlichen Mehrwert für das Produkt dar.

⁹Im Pumpenbetrieb sind hier als extremes Beispiel u.a. sogenannte ‘Wasserschläge’ denkbar, bei denen kurzzeitig enorme Kräfte auf die gesamte Pumpe wirken, die die Tragfähigkeit eines Magnetlagers übersteigen können. Durch konstruktive Maßnahmen lässt sich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines solchen Ereignisses in einem Pumpenkreislauf erheblich reduzieren, jedoch nicht vollständig ausschließen.

¹⁰Durch Wirbelströme in den Spaltröhren hervorgerufene Verluste: insbesondere bei hochfrequenter Stellaktivität der Magnetlager steigt dieser Anteil an.

¹¹Insbesondere durch die Wickelköpfe und die Positionssensorik der Magnetlagerung entstehen zusätzliche, nicht aktiv genutzte Flächen, die durch Reibung zusätzliche hydraulische Verluste



1.2.2. Magnetgelagerte Inline-Spaltrohrmotorpumpe (Konzept)

Die Verwendung einer Magnetlagerung für Spaltrohrmotorpumpen ist nicht neu und wurde erstmals von Allaire mit ‘klassischen’ (achtpoligen) aktiven Magnetlagern untersucht [2]. Gempp und Redemann untersuchten bereits Varianten einer magnetgelagerten Spaltrohrmotorpumpe mit einer Kombination aus einem aktiven dreiphasigen Magnetlager sowie einer kombinierten Radiallager- und Antriebseinheit, einem so genannten lagerlosen Motor [26, 68]. In allen Fällen wurde das System als eine Kreiselpumpe mit axialem Eintritt aufgebaut, ebenso bei einem kommerziell vertriebenen Produkt das u.a. von Schöb beschrieben wurde [82]. Letzteres zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass hier eine spezielle Bauform des bereits erwähnten lagerlosen Motors, ein sogenannter lagerloser Scheibenmotor, verwendet wird. Bei dem lagerlosen Scheibenmotor werden drei Freiheitsgrade bereits passiv stabilisiert und die Komplexität des Systems reduziert sich erheblich. Allerdings ist diese Bauform u.a. durch die maximal zulässigen Axialkräfte (bzw. -schübe durch die Hydraulik) begrenzt.

Die nachfolgenden Untersuchungen dieser Arbeit widmen sich einer Vorstudie für ein alternatives Pumpenkonzept einer mehrstufigen, magnetisch gelagerten Inline-Spaltrohrmotorpumpe, das im Folgenden kurz vorgestellt wird. Die Untersuchungen wurden an der TU Braunschweig am Institut für Regelungstechnik (IfR) in Verbindung mit dem Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IMAB) durchgeführt. Die ersten Ergebnisse wurden bereits von Hülsmann veröffentlicht [38].

Je nach Gestaltung der Hydraulik treten erhebliche Axialkräfte auf, die an den Laufrädern der Pumpe angreifen. Bei dem untersuchten, mehrstufigen Konzept liegen diese in der Größenordnung einiger Kilonewton. Eine rein passive Stabilisierung wie bei Barletta [6] oder Schöb [82] scheidet daher aus – stattdessen werden je nach Kraftbedarf ein oder mehrere dedizierte magnetische Axiallager eingesetzt. Da der Axialschub im Betrieb nur in einer Richtung wirkt, die bei vertikalem Einbau zusätzlich mit der Wirkungsrichtung der Schwerkraft übereinstimmt, genügt jedoch eine einseitige Ausführung der Magnetlagerung. Abbildung 1.3 illustriert das vorgestellte Pumpenkonzept.

Abbildung 1.3 ist eine detailliertere Darstellung von Abbildung 1.2. Die beiden lagerlosen Motoren (1, 2) sowie die Wirbelstromsensoren (5) und axialen Magnetlager (3, 4) sind durch metallische Spaltrohre aus einer speziellen Edelstahllegierung¹² mit einem hohen Nickel- und Chromgehalt hermetisch gekapselt. Diese Edelstahllegierung zeichnet sich durch eine Reihe sehr positiver Eigenschaften aus, die im Zusammenhang mit der Sensorik in Abschnitt 6.2 ausführlicher behandelt werden. Das elektrisch gut

verursachen. Optimierungsansätze zur Adressierung dieser Problematik wurden von Hülsmann [38] vorgestellt.

¹²Verwendet wurde Hastelloy C-276. Hastelloy ist ein Markenname der Firma Haynes International und bezeichnet eine Reihe von austenitischen Edelstahllegierungen, die u.a. besonders korrosionsbeständig sind und auch bei Gefügeänderungen, z.B. durch Kaltverformung, nicht zu Martensitbildung neigen und praktisch nicht magnetisierbar sind. Darüber hinaus besitzen sie eine geringere elektrische Leitfähigkeit als konventionelle Edelstähle, so dass auch die Wirbelstromverluste in den Spaltrohren reduziert werden. Nachteilig sind vor allem die relativ hohen Materialkosten.

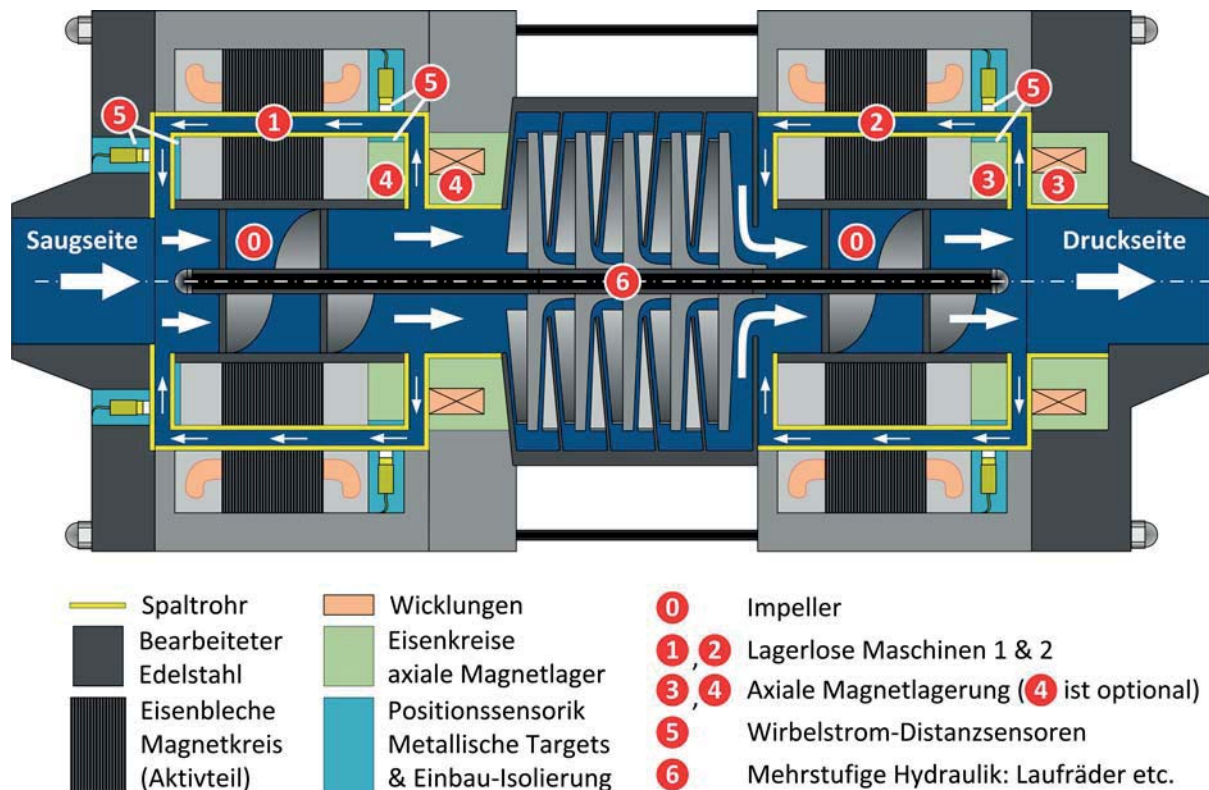


Abbildung 1.3.: Konzept der mit zwei lagerlosen Motoren magnetisch gelagerten, mehrstufigen Inline-Spaltrohrmotorpumpe

leitfähige Material führt zu einem geringeren Wirkungsgrad des Antriebssystems durch Wirbelstromverluste in den Spaltröhren. Darüber hinaus stellt es insbesondere auch eine große Herausforderung für die Positionssensorik dar, die die Lage des Rotors durch die Spaltröhre hindurch ermitteln muss (vgl. Kapitel 6).

Im Rahmen der Vorstudie sollen die Antriebs- und radiale Lagerungseinheit untersucht werden. Konkret werden zwei unterschiedliche Motorkonzepte mit identischen Nenndaten bezüglich Tragkraft und Drehmoment sowie Leistung des Antriebs untersucht. Ein Hauptaugenmerk lag auf der Untersuchung unterschiedlicher Wicklungskonzepte, konkret dem einer verteilten Wicklung und dem von konzentrierten Wicklungen, sogenannten Zahnspulenwicklungen.

Unabhängig von einigen Vorteilen der Zahnspulenwicklungen aus Sicht der Fertigung oder Montage, lassen sich hiermit erheblich kürzere Wickelköpfe erzielen, so dass Bauraum gespart werden kann. Dies führt einerseits zu geringeren hydraulischen Verlusten und ist andererseits auch für die Rotordynamik vorteilhaft, da sich bei einem kürzeren und damit leichteren Rotor die Eigenfrequenzen und biegekritischen Drehzahlen erhöhen. Dem gegenüber ist das Frequenzspektrum der Zahnspulenwicklungen üblicherweise erheblich höher, da hier höhere Harmonische maßgeblich an der Drehmomenterzeugung beteiligt sind. Höhere Frequenzen führen wiederum zu höheren Wirbelstromverlusten im Spaltrohr. Die Optimierung der Maschinen je eines Wicklungstyps wurde von Hülsmann durchgeführt [38]. In einer gemeinsamen Vorstudie des IMAB und IfR sollten die wichtigsten Eigenschaften der zwei unterschiedlichen, in metallischen Spaltröhren gekapselten lagerlosen Motoren untersucht werden. Ziel



war ihre Vermessung, Modellierung, die Validierung der Modelle, sowie der Entwurf und die Erprobung einer Regelung für den Betrieb von zwei Teilprototypen mit unterschiedlicher Wicklungstopologie. Hieraus lässt sich als weiteres Ziel der Entwurf und Test der Abstandssensorik zum Messen durch die metallischen Spaltrohre sowie ihre Validierung im geregelten Betrieb ableiten. Der Aufbau der Teilprototypen wird im folgenden Unterabschnitt näher erläutert.

1.2.3. Vorstudie: Teilprototypen

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit beschränken sich auf Teilprototypen zur Verifikation des elektromagnetischen und elektromechanischen Verhaltens im Trockenlauf. Für eine möglichst rasche Erprobung trotz einer vollständigen Neuentwicklung von Aktorik und Sensorik wurde auf den Aufbau eines vollständigen Pumpenprototyps verzichtet. Die wesentlichen Aspekte hinsichtlich der Eigenschaften von Antrieb und Lagerung lassen sich auch an einem Teilprototypen untersuchen, ohne dass bereits die gesamte, sehr komplexe mechanische und hydraulische¹³ Konstruktion unter Berücksichtigung aller Anforderungen des Hygienic Designs erfolgen muss.¹⁴ Da bereits die Fertigung einiger Komponenten sehr anspruchsvoll ist und teils spezielle Werkzeuge benötigt, wäre dies mit erheblichen Zusatzkosten, sowie das finale Design mit zusätzlichen Iterationen verbunden gewesen. Dementsprechend wurde der Entwicklungsprozess modularisiert und auf zwei Teilprototypen mit unterschiedlichen Wicklungstopologien reduziert.

¹³Hier ist besonders der Entwurf und die Anordnung der Notlauflager in Form von Gleitlagern bei der gewählten Rotorkonstruktion nicht trivial.

¹⁴Die Kapselung von Rotor und Stator durch Spaltrohre wurde auf die Mantelflächen beschränkt, auf eine Abstützung des Rohrs oder Verschweißen und Nachbehandeln der Oberfläche an den Stirnseiten konnte ohne Einschränkung der Gültigkeit der Untersuchungen verzichtet werden.

Zielsetzung Teilprototypen

In der Vorstudie für das Pumpenkonzept sollen für eine Trennung der Einflussgrößen hydraulische Effekte zunächst ausgeklammert werden. Ziel der Untersuchung sind

- die Vermessung der in Spaltröhren gekapselten lagerlosen Motoren:
 - Verifikation bestehender Modelle
 - Identifikation relevanter Störgrößen
 - Anpassung und Erweiterung der Modelle
 - Wirkungsgradmessungen
- der Entwurf geeigneter Radialpositionssensoren (Abstandssensoren) und
- die Demonstration und Betrieb einer aktiven Magnetlagerung am Beispiel der Teilprototypen zur aktiven Stabilisierung von drei Freiheitsgraden.¹⁵

Der Entwurf der Abstandssensoren wird durch die metallische Kapselung der Spaltröhre erschwert – diese Thematik wird ausführlich in Kapitel 6 erörtert.

Für die Vermessung der Versuchsmotoren wurden dedizierte Kraft- und Momentensensoren vorgesehen.¹⁶ Für die Bestimmung des Wirkungsgrads respektive der Spaltröhreverluste müssen die statorseitigen Spaltröhre entfernt werden können.¹⁷ Um Antrieb und Magnetlagerfunktion und ihre Einflüsse z.B. auf den Wirkungsgrad separat voneinander untersuchen zu können, besteht die Möglichkeit, die radialen Freiheitsgrade des Rotors durch ein konventionelles mechanisches Kugellager festzulegen. Dies ist auch für einige Verfahren zur Parameteridentifikation vorteilhaft. In der Praxis wird dies mit dem mechanischen Notlauf- oder Fanglager kombiniert. In beiden Fällen wird ein Kugellager verwendet. Für das Notlauflager wird ein definierter Luftspalt zwischen dem Innenring des Lagers und der Welle vorgegeben. Für den Betrieb als Festlager kann dieser Luftspalt durch eine eingepasste Hülse eliminiert werden. Die Teilprototypen erlauben entweder eine Höhenverstellung des Rotors oder der Statoraufhängungen, so dass Messungen mit zentriertem oder exzentrischem Rotor durchgeführt werden können. Es besteht die Möglichkeit, den Rotor für einzelne Messungen mechanisch festzubremmen und es wird je ein konventioneller elektrischer Antrieb als Lastmaschine für jeden Prüfling vorgesehen. Schließlich können sowohl die bis dahin einzeln betrachteten Ergebnisse der Vermessung der Motoren und abgeleiteten Maßnahmen, die mechanische Modellbildung (Kapitel 5) sowie die entworfenen Distanzsensoren (Kapitel 6) durch die Magnetlagerung des Teilprototypenrotors im Zusammenspiel als Gesamtsystem demonstriert werden.

¹⁵Der vollständige Pumpenrotor besitzt sechs Freiheitsgrade. Da durch einen einzelnen lagerlosen Motor maximal drei Freiheitsgrade stabilisiert werden können, werden die restlichen Freiheitsgrade mechanisch stabilisiert.

¹⁶Für beide Prüfstände werden dieselben mehrachsigen piezo-elektrischen Kraftsensoren verwendet, um die mit den Maschinen erzeugten Lateralkräfte sowohl statisch als auch dynamisch untersuchen zu können. Die Messung des Drehmoments erfolgt je nach Prüfstand über eine kalibrierte Pendel-Gleichstrommaschine mit integrierter Kraftmessdose oder direkt über eine Drehmomentmesswelle.

¹⁷Durch die feldorientierte Regelung der Antriebe 'sieht' das Rotorspaltröhre nur in geringem Maße höherfrequente Feldanteile, so dass die im Rotorspaltröhre induzierten Wirbelstromverluste gegenüber denen im Statorspaltröhre vernachlässigbar gering sind.

Einige Aspekte werden a priori von der Untersuchung ausgeschlossen und werden über die Teilprototypen *nicht* abgedeckt – es gelten die folgenden Einschränkungen:

- Keine *vollständige* Magnetlagerung des Rotors
 - Mechanische Stabilisierung von drei Freiheitsgraden, d.h. Verzicht auf ein weiteres magnetisches Radial- und Axiallager
 - Die Auslegung und Regelung entsprechender Magnetlager entspricht dem Stand der Technik und ist hinreichend in der Fachliteratur beschrieben. Die Problematik der Distanzsensoren für die Messung durch die metallenen Spaltrohre wird mit den beschriebenen Teilprototypen bereits abgedeckt.
- Verwendung eines konventionellen Drehgebers für die Winkelerfassung
 - Dieser Geber ist nicht für eine berührungslose Messung durch Spaltrohre geeignet und muss bei der vollständigen Realisierung des Konzepts ersetzt werden.
 - Es existieren bereits Arbeiten für magnetgelagerte Spaltrohrmotorpumpen [26, 68] – hier wurden Hall-Sensoren zur direkten Messung des Antriebsfeldes verwendet. Eine Alternative sind Sensoren basierend auf dem Wirbelstromprinzip, so dass diese Vereinfachung keine zu starke Einschränkung darstellt. Denkbar ist später auch ein (Drehzahl-)sensorloses Regelungsverfahren.
- Keine hydraulischen Untersuchungen
 - Mögliche hydraulische Störgrößen werden hier bewusst nicht betrachtet.
 - In der Fachliteratur sind bereits verschiedene Arbeiten mit magnetgelagerten Spaltrohrpumpen bekannt
- Abweichende Geometrie und Fanglager zum späteren Konzept
 - Die Prüflinge werden mit massiven Wellen aufgebaut, so dass der Betrieb unterhalb der ersten biegekritischen Drehzahl sichergestellt ist. Für das Konzept der innendurchströmten ‘Inline’-Pumpe wird eine sorgfältige Modalanalyse notwendig sein, insbesondere da beim lagerlosen Motor Krafteinleitungs- und (Positions-)Messpunkte nicht zusammenfallen. Bei einem als elastisch zu betrachtenden Rotor ist dies sehr problematisch.
 - Die (hydraulischen) Notlauflager sind später eine sicherheitskritische Komponente und müssen vorab zwingend getestet werden. Allerdings ist dies hauptsächlich ein konstruktives Problem, bei dem das genaue Rotordesign (s. auch vorheriger Aufzählungspunkt) entscheidenden Einfluss hat. Grundsätzlich ist der Entwurf und Einsatz entsprechender Gleitlager Stand der Technik.

Aufbau der Teilprototypenprüfstände

Abbildung 1.4 skizziert den grundsätzlichen Aufbau der Prüfstände. In einigen Details unterscheiden sich die beiden Prüfstände – alle für die Modellierung wichtigen Aspekte sind identisch. Da nur drei der sechs Freiheitsgrade über den Prototypen aktiv geregelt stabilisiert werden können, werden die restlichen drei Freiheitsgrade

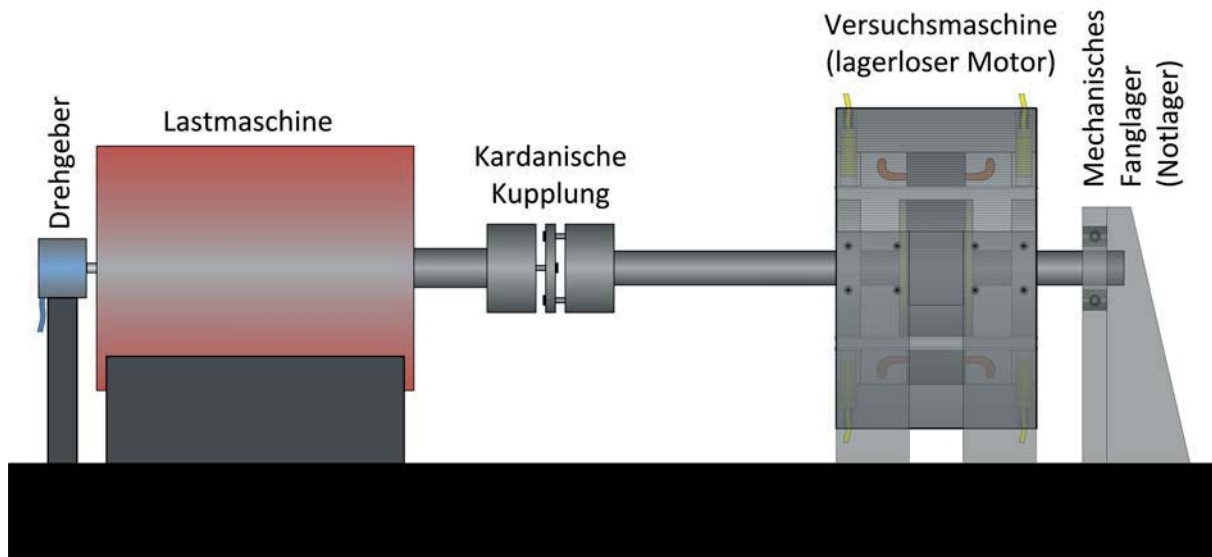


Abbildung 1.4.: Schematischer mechanischer Aufbau der Teilprototypen

über eine einfach kardanische Kupplung passiv stabilisiert. Diese Kupplung ist sehr torsionssteif, so dass der Rotationsfreiheitsgrad um die Symmetrieachse direkt übertragen wird – diese Lagerung lässt sich in guter Näherung durch drei rotatorische Freiheitsgrade beschreiben. Abbildung 1.5 zeigt den für die weitere Modellbildung stilisiert dargestellten Rotor des Teilprototyps mit einseitiger mechanischer Lagerung. Das gewählte Koordinatensystem sowie relevante Größen¹⁸ bzw. Positionen z. B. der Messflächenringe (sogenannter ‘Targets’¹⁹), des Schwerpunkts und des Blechpakets auf der Welle wurden ebenfalls eingezeichnet.

Die kardanische Kupplung besitzt zwei Freiheitsgrade für rotatorische Auslenkungen der Symmetrieachse des Rotors um die Kupplungsmittelpunkte. Die Federsteifigkeit der Kupplung in diesen Freiheitsgraden ist so gering, dass sie nicht für die Modellbildung berücksichtigt werden muss.

Der sechste Freiheitsgrad, die Translation entlang der Wellenachse, wird strenggenommen nicht vollständig stabilisiert. Die Blattfedern der kardanischen Kupplung erlauben eine geringe Auslenkung entlang der z -Achse, verhindern jedoch größere Auslenkungen. Der Rotor wird über Reluktanzkräfte des Eisenkreises in z -Richtung passiv stabilisiert. Da keine externen Störungen den Rotor in z -Achse auslenken, kann auf ein zusätzliches Axiallager zur Stabilisierung verzichtet werden.

In verschiedenen Arbeiten (z.B. von Gempp [26] und Redemann [68]) wurde anstelle einer einseitigen mechanischen Aufhängung eine Lagerung durch ein “klassisches” (radiales) aktives Magnetlager in Kombination mit einem axialen Magnetlager gewählt. Dies entsprach in beiden Fällen allerdings auch der späteren Systemtopologie. Da dies

¹⁸Bedeutung der Abkürzungen: L : Länge des Rotors; L_{S1} : (axiale) Position des 1. Messflächenrings für die (radiale) Positionssensorik, L_{SP} : Position des Rotorschwerpunkts, L_{LM} : Position der Lagermitte bzw. des Krafteinleitungspunkts des lagerlosen Motors, L_{S2} : Position des 2. Messflächenrings, L_{FL} : Position des Fanglagers bzw. Notlaufagers

¹⁹Im folgenden wird für die Messflächen bzw. -ringe der Begriff ‘Target’ verwendet.

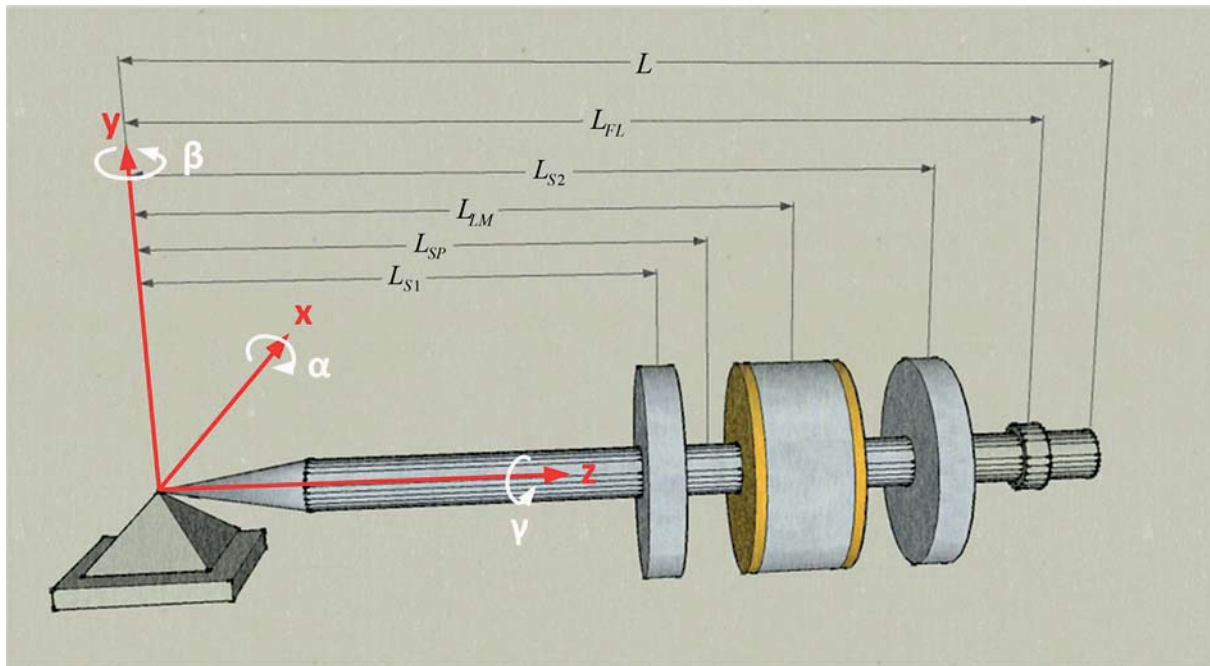


Abbildung 1.5.: Prinzipskizze des Teilprototypenrotors, Definition wichtiger Größen

hier nicht der Fall ist,²⁰ hätte für die Voruntersuchungen ein weiteres Magnetlager inklusive Positionssensorik beschafft oder konstruiert und erprobt werden müssen. Stattdessen wurde ähnlich wie bei Schöb [80] eine mechanische Lagerung gewählt.²¹ Gleiches gilt für das Axiallager – dieses ist zwar für das finale Design eines Pumpenprototypen vorgesehen, allerdings handelt es sich hierbei ebenfalls um eine Neuentwicklung, die noch nicht realisiert und getestet wurde. Darüber hinaus wäre dieses Lager, das für die Abstützung hoher hydraulischer Kräfte durch den Pumpenbetrieb ausgelegt und optimiert wurde, für den Teilprototypenbetrieb erheblich überdimensioniert. Die wichtigsten statischen Untersuchungen der Teilprototypen können mit einem mechanischen Aufbau untersucht werden und auch die Untersuchung des dynamischen Verhaltens ist möglich. Zwar ist der Aufwand zur korrekten Ausrichtung der Prüfstände erheblich größer, aber aufgrund der geringeren Kosten bzw. zusätzlichen Entwicklungsarbeiten, die später nicht genutzt werden könnten, fiel die Wahl auf einen einfacheren, mechanischen Aufbau. Die Rotorwelle wurde anhand einiger Abschätzungen im Vorfeld entsprechend konservativ dimensioniert, so dass sie im gesamten Drehzahlbereich der Maschine als Starrkörper²² angesehen werden kann.

²⁰Wie eingangs erwähnt wurde, sieht das Konzept eine gleichmäßige Aufteilung der Antriebsleistung auf zwei baugleiche lagerlose Motoren vor [38].

²¹Schöb verwendete ein Pendelrollenlager für die einseitige Stabilisierung der drei Freiheitsgrade. Da im Rahmen dieser Arbeit ein elektrischer Antrieb zur Belastung des Pumpenantriebs eingesetzt wird, ist das Vorgehen von Schöb hier nicht anwendbar.

²²Die Versuchsmaschinen werden klar unterhalb ihrer biegekritischen Drehzahlen betrieben. Im Rahmen einer etwas genaueren Betrachtung werden in Abschnitt 5.2 noch einige Einschränkungen diskutiert.

1.3. Stand der Forschung

1.3.1. Lagerloser Motor

Das Entstehen von einseitigen magnetischen Kräften in einem Antriebssystem mit mehreren Wicklungen durch eine Polpaardifferenz von eins wurde erstmals 1950 von Sequenz [93] beschrieben. 1968 untersuchte Frohne [24] den einseitig magnetischen Zug in Drehfeldmaschinen und beschrieb dabei allgemein das Prinzip der (meisten²³) lagerlosen Motoren: “Als einseitiger magnetischer Zug sind die zweipoligen Kraftwellen wirksam, die durch die Multiplikation zweier Induktionsdrehwellen beschrieben werden, die sich in ihrer Polpaarzahl um eins unterscheiden.” [24, S.304]. Die Untersuchungen zielten nicht auf eine technische Ausnutzung sondern vielmehr die systematische Beschreibung eines für den Betrieb unerwünschten Phänomens aufgrund von Rotor-exzentrizität. Bislang wurde diese Arbeit nicht im Zusammenhang mit lagerlosen Motoren erwähnt, jedoch wurde hier bereits früh der fundamentale Wirkmechanismus allgemein beschrieben.

Wurde die Kraftentstehung bei Sequenz und Frohne noch als unerwünschte Störung behandelt, erlangte Hermann Anfang der siebziger Jahre mehrere Patente [30, 32, 31, 33] auf einen Asynchronantrieb mit einer zusätzlichen Wicklung. Dieser sollte den Effekt als selbstangetriebenes Magnetlager ausnutzen. In den folgenden Jahren folgten weitere Patente anderer Autoren in verschiedenen Ländern – für eine detailliertere Aufschlüsselung dieser Patente sei auf Chiba et al. [18] verwiesen. Zu dieser Zeit fehlten jedoch wichtige technische und theoretische Voraussetzungen für eine systematische Ausnutzung und Verbreitung dieses neuen Konzepts [73].

In den späten Achtzigern und zu Beginn der Neunziger Jahre begannen verschiedene Forschergruppen in mehreren Ländern das Thema systematisch zu erforschen. Besonders in der Anfangszeit hervorzuheben sind hier die Arbeitsgruppen an der ETH Zürich um Professor Hugel sowie japanischen Forschungsgruppen um Chiba, Chida, Fukao und Okada. Nach Salazar et al. [73] wurde der Begriff des *lagerlosen Motors* (‘bearingless motor’) erstmals 1988 von Bosch verwendet [13]. Im Englischen wird teils auch synonym der Begriff ‘self(-)bearing motor’ verwendet.²⁴ Im Deutschen wird häufig alternativ der Begriff Querkraftmaschine synonym verwendet, da der Begriff des lagerlosen Motors von einigen Autoren wie z.B. Bikle [10] als “irreführend” [10, S.1] bezeichnet wird. In dieser Arbeit wird dennoch hauptsächlich der Begriff ‘lagerloser’ Motor verwendet, da sowohl in der deutschen wie auch internationalen Literatur dieser Begriff am Gebräuchlichsten ist.

Im Folgenden werden nur einige wichtige Meilensteine umrissen; für eine detaillierte Darstellung der weltweiten Forschungsaktivitäten bis zum Jahr 2000 sei auf die Ausführungen von Salazar et al. [73] verwiesen. Während dort die Beiträge auf

²³Üblicherweise bezeichnet der Begriff *lagerloser Motor* ein System, dass Flussdichtewellen überlagert, die sich in Ihrer Polpaarzahl um eins unterscheiden. Einige wenige Veröffentlichungen verwenden den gleichen Namen für andere Konzepte – auf diese Ausnahmen soll hier jedoch nicht im Detail eingegangen werden.

²⁴Seltener werden auch die Begriffe ‘combined motor bearing’, ‘bearing motor’, ‘bearing and drive’, ‘levitated motor’, ‘lateral force motor’ oder ‘integrated motor bearing’ verwendet [18].