

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

IMAB

Institut für Elektrische Maschinen,
Antriebe und Bahnen
Prof. Dr.-Ing. W.-R. Canders



bmb+f FKz.: 13N7541/7
Laufzeit 01.07.1999 - 31.12.2000

**Flüssigwasserstoff-Tank mit HTSL-Lagerung für den
mobilen Einsatz**

Teilprojekt: Flüssigwasserstofftank-Design und Konstruktion

Abschlussbericht

Verfasser:

Dipl.-Ing. S.O. Siems
Dipl.-Ing. H. May

Oktober 2002

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzbeschreibung und Zielsetzung	5
2	Arbeitsschwerpunkte des IMAB	6
2.1	Lageroptimierung für sechs Freiheitsgrade	6
2.1.1	Anforderungen	7
2.1.2	Auslegungsrechnungen	8
2.1.3	Vermessung der HTSL-Formkörper	14
2.1.4	Messungen an den Lagern	15
2.1.5	Ergebnisse und Ausblick.....	17
2.2	Vermessung der Antwortspektren des HTSL-PM-Lagers	18
2.3	Bau eines Aktuators zur thermisch gesteuerten Lageraktivierung	20
2.3.1	Funktionsprinzip des Aktuators	20
2.3.2	Dimensionierung der MM-Feder	21
2.3.3	Gegenfeder	25
2.3.4	Kraft-Weg-Charakteristik des MM-Aktuators	27
2.3.5	Aufbau des MM-Aktuators	27
2.3.6	Funktionstest	28
2.3.7	Beurteilung und Ausblick	29
3	Integration der Komponenten in den Tank	29
3.1	Funktionstest	30
4	Veröffentlichung der Ergebnisse	30

1 Kurzbeschreibung und Zielsetzung

Gegenstand des Forschungsvorhabens war die Herstellung und Erprobung eines LH₂-Fahrzeugtanks, dessen Innenbehälter im Ruhezustand des Fahrzeugs durch eine HTSL-Lagerung berührungsfrei im Außenbehälter gehalten wird. Während im Betriebszustand eine gewisse Wärmeeinkopplung zum Aufbau des notwendigen Drucks zur Kraftstoffentnahme aus dem Speicher wünschenswert ist, werden die Standzeiten konventioneller LH₂-Fahrzeugtanks durch das Maß des Wärmeeintrags im Ruhezustand begrenzt. Bei dem hier verfolgten Konzept, bei dem im Ruhezustand auf jegliche mechanische Stützelemente verzichtet wird, kann der Wärmeeintrag deutlich verringert und damit die Standzeit des Tanks erheblich verlängert werden.

Im vorangegangenen Projekt „Kryobehälter mit HTSL-Lagerung“ ist erstmals eine weitgehend berührungsfreie Aufhängung des Innenbehälters im Außenbehälter durch HTSL-Magnetlager realisiert worden. Das Demonstrationsmodell zeigte eine erhebliche Verminderung des Gesamtwärmeeintrags gegenüber einem konventionell aufgebauten Tank gleichen Fassungsvermögens.

Mit den Projektpartnern Nexans, Messer Griesheim und ZfW Göttingen wurde aufbauend auf den dabei gewonnenen Ergebnissen und Erfahrungen ein neues Konzept zur berührungsfreien Lagerung entwickelt, das weiterhin auf die Verwendung von HTSL setzt. Um dem in Fahrzeugen sehr begrenzten Bauraum gerecht zu werden und gleichzeitig den Materialeinsatz für die Lager zu vermindern, wird jetzt eine rotationssymmetrische Lagergeometrie eingesetzt, bei der zwei Lagereinheiten auf einem Zentralrohr angeordnet sind (Abb. 1.1).

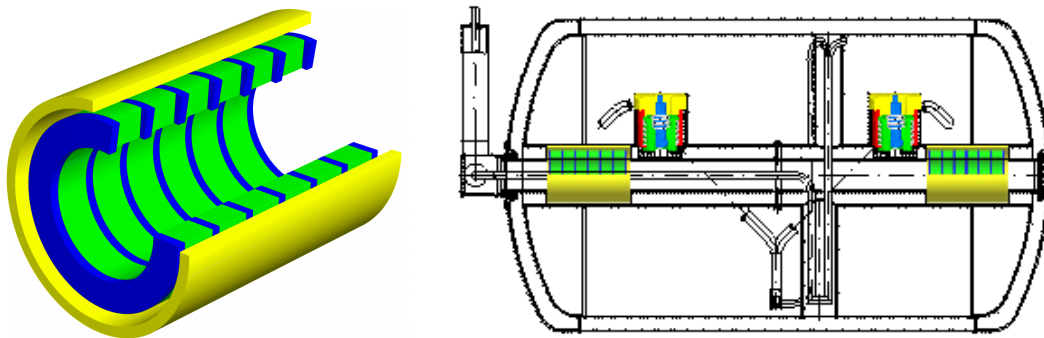


Abb. 1.1: Rotationssymmetrisches HTSL-Magnetlager und Tankgeometrie

Die gewählte Lagergeometrie erfordert die Verwendung von HTSL-Bauteilen in Form von Hohlzylindern. Bei der Entwicklung von Prozessen zur Herstellung solcher Formteile wurden zwei Materialoptionen verfolgt. Zum einen wurden supraleitende Formkörper auf Basis einer Bismut-Strontium-Calcium-Kupferoxid-Verbindung (Bi-2212) in einem patentierten Schmelzgussverfahren hergestellt (Nexans), zum anderen wurde ein Herstellungsverfahren zur Texturierung von multi-kristallinen Formkörpern aus einer Yttrium-Barium-Kupferoxid-Verbindung (Y-123) entwickelt (ZfW) (Abb. 1.2).



Abb. 1.2: HTSL-Ringe – Bi-2212 (links) und Y-123 (rechts)

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt war die Entwicklung eines Aktuators zur automatischen Aktivierung der HTSL-Lagerung, der rein thermisch gesteuert auf Basis von Federn aus einer Memory-Metall-Legierung arbeitet (Abb. 1.3).

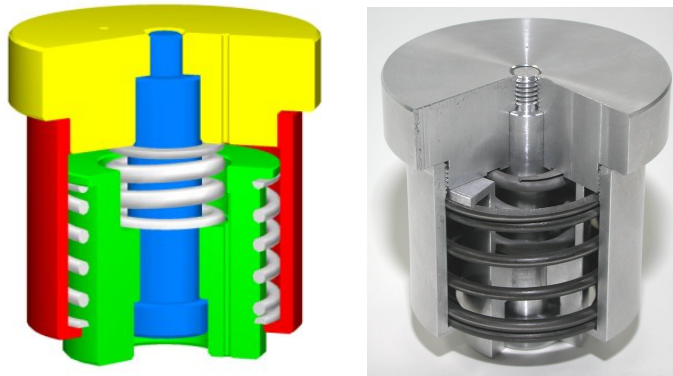


Abb. 1.3: Memory-Metall-Aktuator

2 Arbeitsschwerpunkte des IMAB

Die vom IMAB innerhalb des gemeinsamen Forschungsvorhabens durchzuführenden Arbeiten umfassten folgende Arbeitsschwerpunkte:

- Lageroptimierung für sechs Freiheitsgrade
- Vermessung der Antwortspektren des HTSL-PM-Lagers
- Bau eines Aktuators zur thermisch gesteuerten Lageraktivierung mittels Memory-Metallen

2.1 Lageroptimierung für sechs Freiheitsgrade

Die Wahl der konzentrischen, rotationssymmetrischen Lagerkonfiguration mit in axialer Richtung alternierenden Polen ermöglicht eine Fixierung des Innentanks in fünf von sechs möglichen Freiheitsgraden. Der verbleibende rotatorische Freiheitsgrad könnte durch ein auch in

Umfangsrichtung mit alternierenden Polen ausgestattetes Erregersystem festgelegt werden, allerdings würde dadurch der Aufwand an Material und Fertigung in erheblichem Maße zunehmen. Aus diesem Grund wurde zunächst die Fixierung des rotatorischen Freiheitsgrades durch die für Befüllung und Entnahme notwendigen Zuleitungen angestrebt.

2.1.1 Anforderungen

Für die Auslegung der Lagerung wurden auf Basis eines Modells zur Beschreibung der Fahrzeugdynamik (Abb. 2.1) und von BMW zur Verfügung gestellten Belastungsspektren sowie dem projektierten Tankgewicht die Anforderungen an die Lager ermittelt. Auf der Grundlage dieser Daten wurden Berechnungen durchgeführt, deren Ergebnisse zu der dann auch im Tank verwirklichten Lagergeometrie führten.

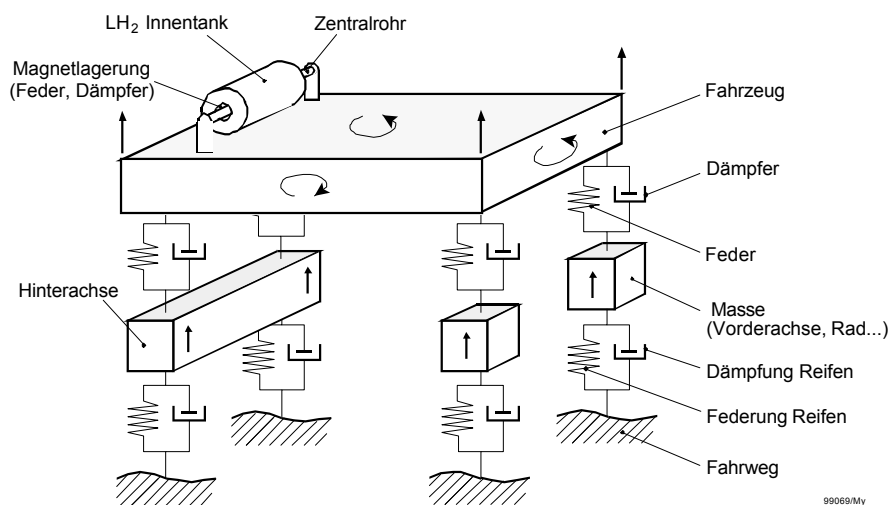


Abb. 2.1: Dynamisches Modell für die Magnetlagerung eines Kryobehälters in einem Fahrzeug

Das voraussichtliche Gewicht des Innentanks wurde von Messer Griesheim durch eine Vorabkonstruktion ermittelt. Die endgültige Konstruktion war erst nach der Auslegung der Lager und der Aktuatoren möglich. Die folgende Tabelle enthält die Auslegungsdaten für die Lager.

Größe	Wert
Masse Innentank	40 kg
Tankbelastung 1	1g, Einfederung 5 mm, 7 Hz
Tankbelastung 2	2g, Einfederung 2,25 mm, 15 Hz
Tankbelastung 3	2g, Einfederung 33,5 mm, 4 Hz

Tabelle 2.1: Auslegungsdaten

2.1.2 Auslegungsrechnungen

2.1.2.1 Berechnung der Kräfte und Steifigkeiten an konzentrischen Radiallagern

Die Kräfte und Steifigkeiten wurden mittels eines FE-Programms berechnet, das am IMAB für die Berechnung von konzentrischen Lagertopologien und speziell für den Fall der OFCo-Aktivierung (Operational-Field-Cooled with offset) entwickelt wurde.

Damit eine möglichst große Schwingungsweite des Kryotanks während der Fahrt gewährleistet wird, sollte das HTSL-Lager den gefüllten Kryotank etwa in konzentrischer Lage von Erreger- und HTSL-Achse fixieren. Hierzu ist es notwendig, dass vor der Lageraktivierungsphase (Abkühlung) der Kryotank und damit der HTSL-Zylinder relativ zum Erregersystem z.B. um ϵ_A nach oben verschoben wird, so dass nach der Lageraktivierung der Kryotank zusammen mit seiner Füllung aufgrund der Schwerkraft und der Lagersteifigkeiten in die konzentrische Position absinkt. Mit dem während des Betriebes abnehmenden Füllgrad des Kryotanks wird sich jedoch diese Achse aufgrund der Lagerkräfte z.B. um ϵ_K nach oben verschieben.

Das hier zum Einsatz kommende Programm integriert die für variable ϵ_K sich am Umfang verändernden Kraftvektoren, und ermittelt so die polaren Lagerkräfte und Lagersteifigkeiten. Basierend auf der Kenntnis dieser Lagereigenschaften kann das Schwingungsverhalten des Kryotanks während der Fahrt ermittelt werden.

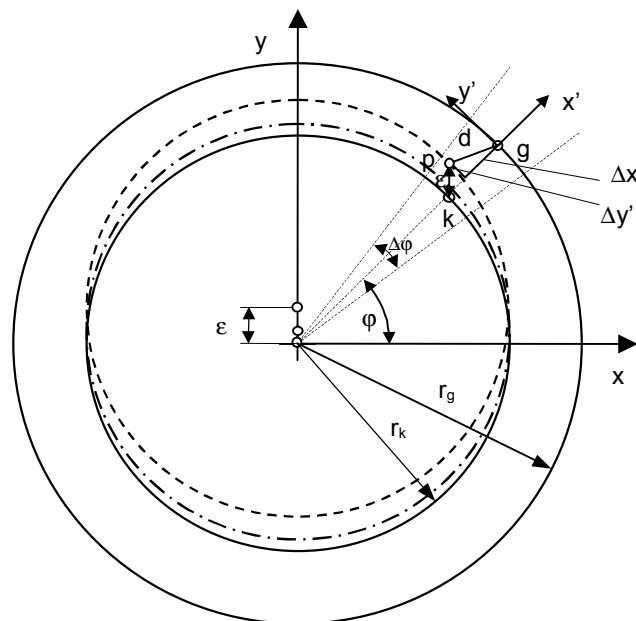


Abb. 2.2: Geometrische Verhältnisse zur Berechnung von Kräften und Steifigkeiten

Den Berechnungen liegen die in Abb. 2.2 dargestellten geometrischen Verhältnisse zugrunde. Der äußere Kreis gibt den Innenradius des Supraleiters an, der innere Kreis den Außenradius des Erregersystems. Der gestrichelte Kreis stellt die Lage des Erregersystems in der Einfrierposition dar. Zur Berechnung der Trag- und Führkräfte sowie der Steifigkeiten wird in der Nennposition (strichpunktiert), d.h. HTSL und PM-System haben einen gemeinsamen Mittelpunkt, die Zylinderanordnung in Umfangsrichtung in $v=1...NT$ Abschnitte unterteilt. Diese NT Lagerteilelemente haben einen Öffnungswinkel $\Delta\phi$ und eine mittlere Länge von $d=\pi(r_g+r_k)/NT$. Beispielhaft wird in dem v -ten Element der Mittelpunkt des Erregerelements k und der Mittelpunkt des HTSL-

Elements g genannt. Für die Arbeiten mit dem numerischen Feldprogramm müssen im gestrichenen Koordinatensystem die Koordinaten der Einfrierposition p und die der Arbeitsposition k bestimmt werden.

Zur Steifigkeitsberechnung, welche aufgrund der exzentrischen Einfrierposition stark vom Winkel φ abhängt, wird der Erregerring nicht nach k sondern nach f verschoben. Dieser Punkt f liegt auf einem Kreis um k mit dem Radius d_{fk} . Für den Sonderfall, dass die Steifigkeit in y -Richtung ($\varphi=90^\circ$) berechnet werden soll, muss das Erregersystem in die als gestrichelter Kreis gekennzeichnete Position verschoben werden. Die Steifigkeit ergibt sich aus der Differenz zwischen den Kräften in konzentrischer und ausgelenkter Position. Für die Kraftberechnung und die daraus ableitbare Berechnung der Steifigkeit des HTSL-PM-Lagers in der konzentrischen Stellung muss der HTSL ebenfalls in der Position p eingefroren und dann in die Position k verschoben werden. Die sich daraus ergebenden Kräfte $F_{x'}$ und $F_{y'}$ müssen anschließend in das x,y -Koordinatensystem transformiert und aufsummiert werden.

2.1.2.2 Auslegung und Dimensionierung des Tanklagers

Die Auslegung des HTSL-PM-Lagers wird als Optimierungsproblem behandelt. Die Zielfunktion ist hierbei eine Minimierung der Kosten des Lagers. Folgende Kosten sind zu unterscheiden und unterschiedlich zu gewichten:

- HTSL-Prozessierung
- HTSL-Ring Herstellung (schleifen)
- Erregermagnete
- Erregerpole

Als Nebenbedingung musste eine bestimmte Kraft und Steifigkeit erreicht werden, damit der Kryotank vom Lager statisch getragen werden kann. Gleichzeitig waren die vom Anwender vorgegebenen Belastungen (Schockdiagramm) zu berücksichtigen damit die Auslenkungen im ebenfalls vorgegebenen Rahmen bleiben.

Als Randbedingung der Optimierungsrechnung mussten gewisse Abmessungen eingehalten werden. Diese Randbedingungen schränkten die Auslegungsmöglichkeiten stark ein. So ist die Innenbohrung des Kryotanks auf 100 mm beschränkt und der Außendurchmesser des inneren Tragrohrs ist aufgrund mechanischer Traganforderungen auf 56 mm festgelegt. Da weiterhin aus Herstellungsgründen die minimale Wandstärke des HTSL-Zylinders auf 5 mm festgelegt ist und ein Lagerluftspalt von $\delta = 4$ mm anzustreben war, ergaben sich als Hauptabmessungen des HTSL-Lagers die in Abb. 2.3 dargestellten Größen. Da dadurch die Magnethöhe h_M (Abb. 2.3) auf 13 mm festgelegt ist, bleibt für die Optimierungsrechnungen also nur noch die Bestimmung der optimalen Polteilung und des optimalen Verhältnisses von Magnetbreite b_M zu Polteilung τ (Abb. 2.3) übrig.

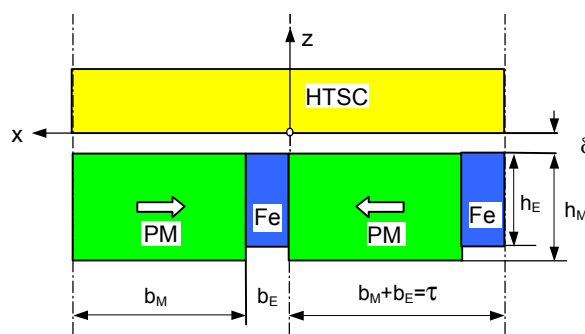


Abb. 2.3: Hauptabmessungen des Lagers und Geometriebezeichnungen

Dabei muss aber auf eine Besonderheit der hier vorgeschlagenen Kraftaktivierung mit einem Memory-Metall-Aktuator hingewiesen werden. Im warmen, d.h. leeren Zustand wird der Innentank vom Aktuator angehoben, sodass sich im Wesentlichen der untere Luftspalt verkleinert und der obere vergrößert. Zieht sich nun das Memory-Metall bei der Abkühlung zusammen, so ergeben sich aufgrund der HTSL-Permantmagnet-Wechselwirkung in der Mitte im unteren Luftspalt reine Zug- und in der Mitte des oberen Luftspaltes reine Druckkräfte. In allen anderen Bereichen gibt es kombinierte Normal- und Tangentialkräfte. Zur Polteilungsoptimierung wurden nur die beiden Bereiche der Normalkraftwirkung herangezogen. Der Abb. 2.4 kann man entnehmen, dass für einen oberen Arbeitluftspalt von 5 mm für die Magnethöhe von 13 mm eine Polteilung von etwa 27 mm optimal ist.

Andererseits kann man den Abb. 2.5 und 2.6 entnehmen, dass für einen unteren Luftspalt von 5 mm und einer Magnethöhe von 13 mm eine Polteilung von ca. 15 mm eine maximale anziehende Normalkraftdichten erzielt. Da das Erregersystem aus einheitlichen Magnetringsen aufgebaut werden muss, wird als Kompromiss für den oberen und unteren Luftspalt eine Polteilung von 20 mm angenommen.

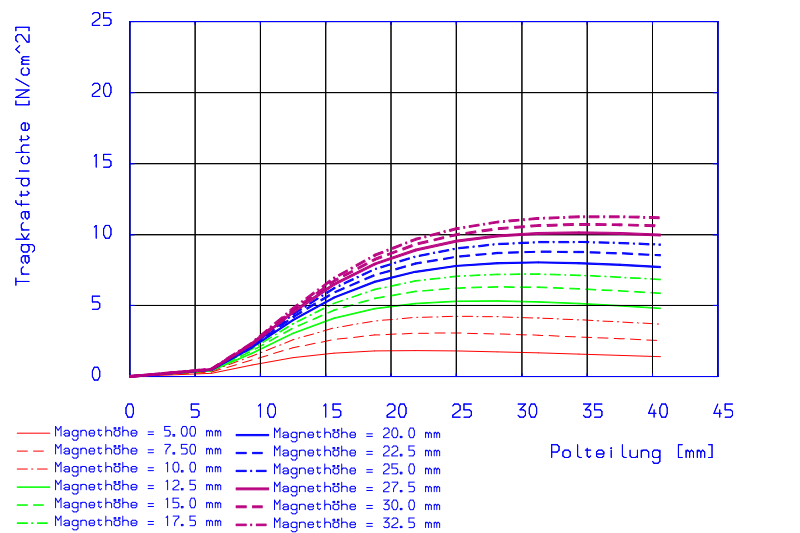


Abb. 2.4: Tragkraftdichte über Polteilung für $\delta = 5$ mm (oben)

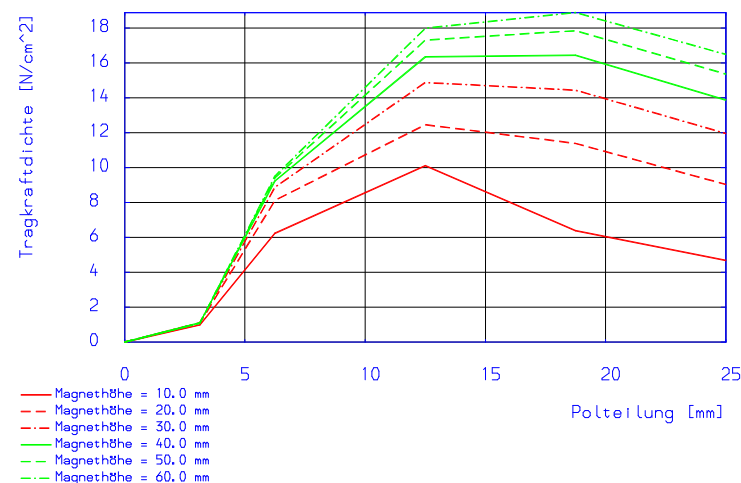


Abb. 2.5: Tragkraftdichte über Polteilung für $\delta = 4$ mm (unten)

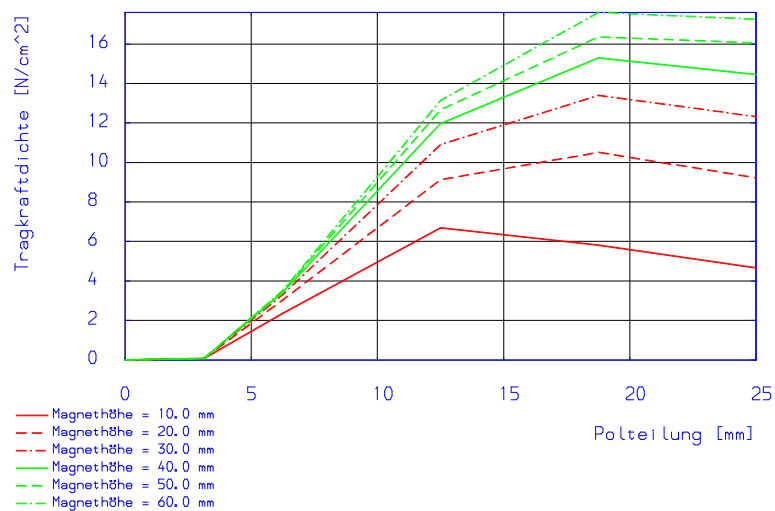


Abb. 2.6: Tragkraftdichte über Polteilung für $\delta = 6$ mm (unten)

Gemäß Abb. 2.7 wählt man als Verhältnis von Magnetbreite zu Magnethöhe einen Wert von $b_M/h_M = 0,8$, sodass sich eine Magnetbreite von $b_M = 16$ mm und eine Polbreite von $b_E = 4$ mm ergibt.

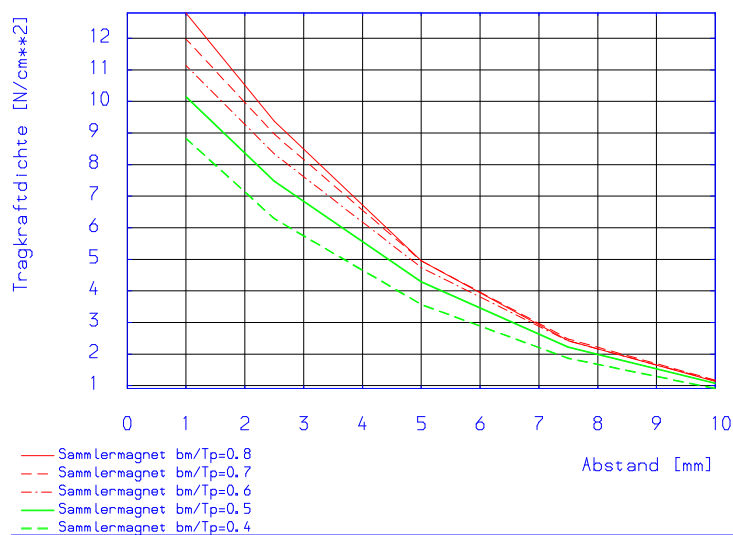


Abb. 2.7: Vergleich der Tragkraftdichten Sammleranordnungen

Beispielhaft sind für eine Verschiebung von $\varepsilon = 1,5$ mm die Feldverhältnisse bei $\varphi = 270^\circ$ (Abb. 2.8), $\varphi = 240^\circ$ bzw. $\varphi = 300^\circ$ (Abb. 2.9) und $\varphi = 0^\circ$ bzw. $\varphi = 180^\circ$ (Abb. 2.10) in der Einfrier- und Kraftposition dargestellt. Das eigentlich 3-dimensionale Feldproblem bei Winkeln $\neq 90^\circ$ bzw. $\neq 270^\circ$ (reine Zug- bzw. Druckkräfte) wird hier dadurch umgangen, dass bei kleinen Auslenkungen die Kraftentwicklung nach dem Einfrieren eines HTSL-PM-Lagers praktisch unabhängig von der Bewegungsrichtung angenommen werden darf.

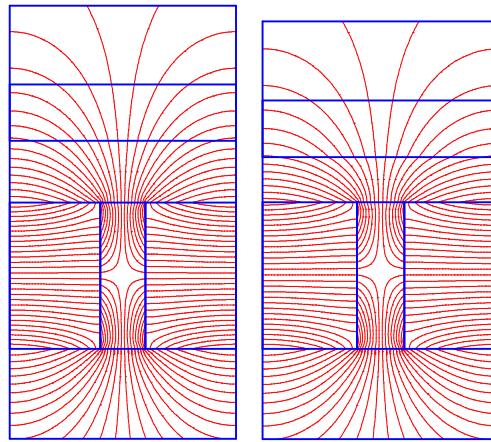


Abb. 2.8: Gegebenheiten bei $\varphi=270^\circ$ (gem Abb. 2.2). Nur Luftspaltveränderung von der Einfrierposition bei $\delta=5.5\text{mm}$ (links) zur Kraftposition $\delta=4.0\text{mm}$ (rechts)

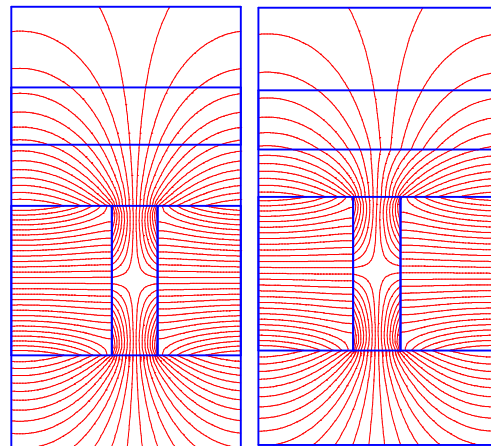


Abb. 2.9: Gegebenheiten bei $\varphi=240^\circ$ und 300° . Luftspaltveränderung von der Einfrierposition bei $\delta=5.3\text{mm}$ (links) zur Kraftposition $\delta=4.0\text{mm}$ (rechts) und gleichzeitiger Horizontalverschiebung nach links um 0.75mm

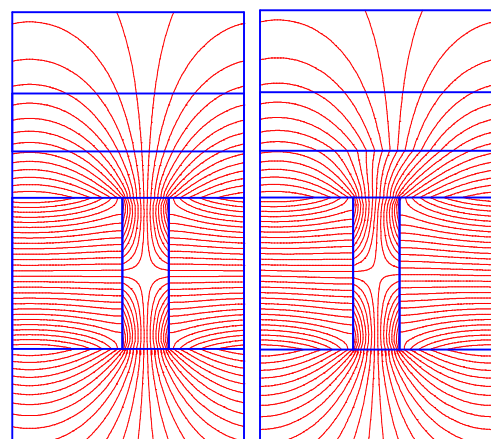


Abb. 2.10: Gegebenheiten bei $\varphi=0^\circ$ und 180° (gem Abb. 2.2). Keine Luftspaltveränderung von der Einfrierposition bei $\delta=4.0\text{mm}$ (links) zur Kraftposition $\delta=4.0\text{mm}$ (rechts) aber Horizontalverschiebung um 1.5mm

Projiziert man die so erhaltenen Normal- und Tangentialkräfte aller Teilelemente auf den Kreis und summiert sie vektoriell auf, dann erhält man bei der gewählten Auslenkung von 1,5 mm aus der Einfrierposition eine Tragkraft von 912 N und damit eine Tragsteifigkeit von 605 N/mm. Für die Erregermagnete wurden eine Remanenzinduktion von $B_r = 1,27$ T und eine permanente Permeabilität von $\mu_{rp} = 1,05$ zugrunde gelegt.

Die Auslegung auf eine statische Tragkraft von mehr als 900 N je Lager bei einer Anforderung von nur 200 N je Lager erfolgte aufgrund der Tatsache, dass reale HTSL-Lageranordnungen immer eine wesentlich geringere Tragkraft aufweisen als theoretisch vorausberechnet. Da die Abweichung der Auslegungsrechnung von der Realität im Wesentlichen von den Supraleitern – Qualität, Formfaktoren, Temperaturabhängigkeit – bestimmt wird, lassen sich nicht ohne weiteres Korrekturfaktoren in die Berechnungen einbauen, um ein genaueres Ergebnis zu bekommen. Eine Nachführung der Ergebnisse ist jedoch möglich, wenn die wirksame Stromdichte $J_{c,eng}$ des Supraleiters aus Messungen bestimmt werden kann, da die Berechnungen ansonsten immer für $J_{c \rightarrow \infty}$ durchgeführt werden.

2.1.2.3 Voruntersuchungen zum dynamischen Verhalten von HTSL-PM-Lagern

Aufgrund der in Abb. 2.1 gezeigten Anordnung, ist das innere Tragrohr des Kryotanks während der Fahrt ständig Rüttelbewegungen ausgesetzt. Die Bewegungen des mit dem Tragrohr verbundenen permanentmagnetischen Erregersystems müssen von dem HTSL-Lager dynamisch, aufgrund seiner Steifigkeitskennlinie, abgefangen werden. Für die nachhaltige Einsatzfähigkeit solcher HTSL-Lager ist also der Nachweis ihrer dynamischen Langzeitstabilität von großer Bedeutung.

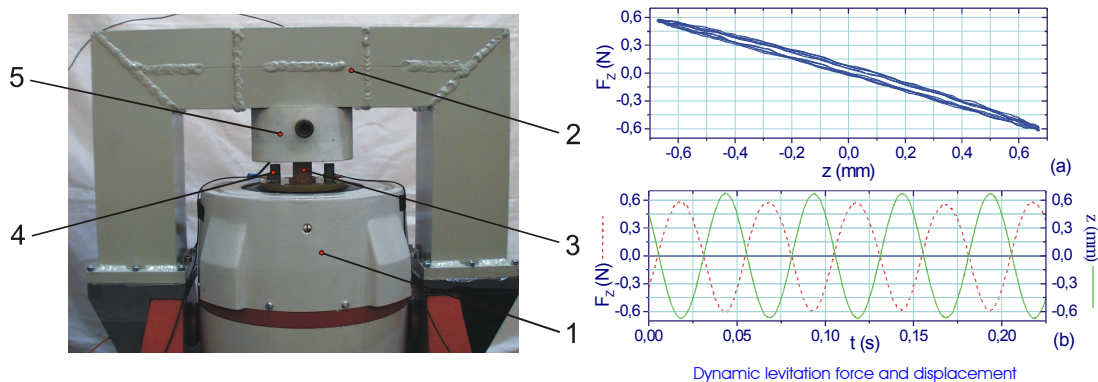


Abb. 2.11: 1: Elektrodynamischer Shaker, 2: Rahmen, 3: PM-Magnet, 4: Beschleunigungssensor, 5: Kryocontainer mit HTSL-Massivkörper

Zur Überprüfung der mit dynamischen Belastungen einhergehenden Lagereigenschaften wurde ein Rüttelmessstand aufgebaut (Abb. 2.11). Hierbei wurde in unmittelbarer Nähe eines LN_2 gekühlten HTSL-Formkörpers (5) ein Permanentmagnet (3) mittels eines elektrodynamischen Shakers in Schwingungen versetzt, dessen Amplituden und Frequenzen in einem weiten Bereich (0,1 - 4 mm; 1 - 500 Hz) variiert werden konnten. Beispielhaft ist in Abb. 2.11 oben eine typische Kraft-Weg-Kurve bei einer Auslenkung von $\pm 0,7$ mm dargestellt. Die zugehörigen Weg- und Kraftverläufe über der Zeit sind in Abb. 2.11 unten wiedergegeben. Aus sehr vielen solcher Messungen folgt, dass nach einer kurzen Einlaufphase folgende langzeitstabile Lagereigenschaften kennzeichnend sind:

- Die Kraft-Wegkurven sind in dem zu erwartenden Auslenkungsbereich linear
- Die Lagersteifigkeit nimmt mit steigender Frequenz besonders auch bei Schockbelastungen etwas zu

- Die Hystereseverluste sind bei dem verwendeten HTSL-Material sehr klein. Sie steigen aber pro Zyklus mit der Frequenz etwas an. Hierbei konnten aber die direkt am Magneten angreifenden Luftverwirbelungen und die damit verbundenen Verluste nicht ganz unterbunden werden. Diese treten aber in der Kryotank-Anwendung nicht auf.
- Wie oben bereits erwähnt, tritt nach einer kurzen „Einlaufphase“ keine weitere Degradation der Lagerkennndaten auf.

2.1.3 Vermessung der HTSL-Formkörper

Für eine möglichst homogene Steifigkeit der Lagerung ist es notwendig, dass die aus der Interaktion von Permanentmagneten und Supraleitern hervorgehenden Levitationskräfte homogen entlang des inneren Umfangs sind. Bei den Ringen aus Bi-2212 ist dies materialimmanent bedingt durch die polykristalline Struktur. Durch die multikristalline Struktur der Y-123-Ringe sind aber Abweichungen in der Radialkraft möglich, da die einzelnen Kristalle in ihrer Qualität voneinander abweichen können bzw. die Ausrichtung der c-Achse, die idealerweise senkrecht auf dem Innenradius steht, Schwankungen unterworfen ist.

Um dies festzustellen und ggf. inhomogene Ringe so miteinander kombinieren zu können, dass das Lagerverhalten doch wieder isotrop ist, müssen die Levitationskräfte am inneren Umfang gemessen werden. Nachfolgend werden der dazu verwendete Versuchsaufbau und die damit ermittelten Werte beschrieben und dargestellt.

Zum Scannen der Supraleiter-Ringe wurde als Verfahrenseinheit für die Sensorik ein 3-Achsen-Tisch verwendet. Da es sich bei den Prüflingen um Ringe handelte, wurden an der z-Achse eine zusätzliche Rotationsachse um die z-Koordinate montiert (Abb. 2.12). Die Kraftmessung erfolgte mittels eines Piezo-Kraft-Sensors.

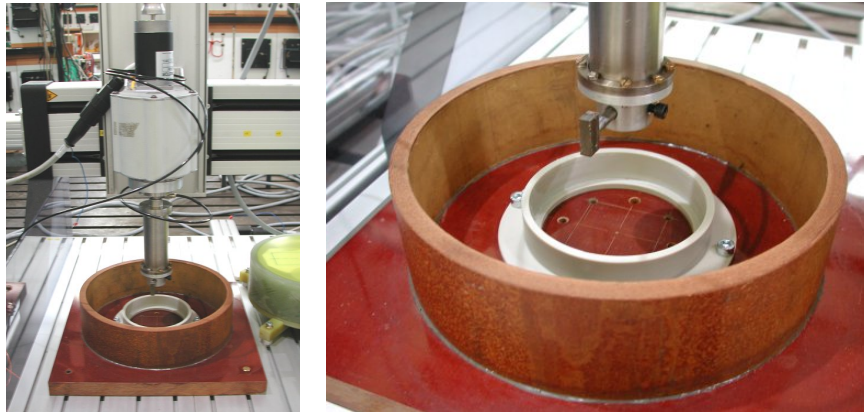


Abb. 2.12: 3-Achsen-Tisch mit zusätzlicher Rotationsachse und Aufnahme für die HTSL-Ringe

Alle HTSL-Ringe wurden unter den gleichen Bedingungen vermessen. Diese waren im einzelnen:

- Luftspalt: $\delta = 1 \text{ mm}$
- Induktion Erregermagnet gegen Luft: $B_{\text{Luft}} = 350 \text{ mT}$
- Temperatur (HTSL und Magnet): $T = 77 \text{ K}$

Als Einkühlverfahren für die Supraleiter wurde ZFC (Zero Field Cooling, Abb. 2.13) gewählt, da nur so eine Messung in einem Durchgang durchgeführt werden konnte. Nach dem Absenken des Magneten erzeugt die Paarung Magnet-Supraleiter eine radiale Kraftkomponente in Richtung der

Mittelachse des HTSL-Rings, die gleichzeitig die Drehachse der Messanordnung ist. Diese Radialkraft wurde für den Winkelbereich von 0° bis 360° aufgezeichnet.

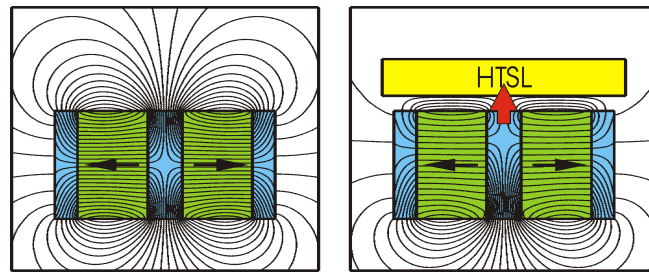


Abb. 2.13: ZFC – Zero Field Cooling bei idealem HTSL

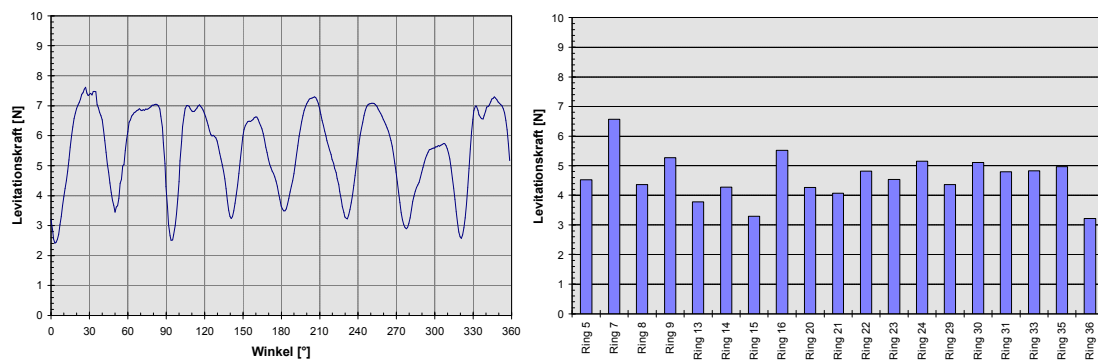


Abb. 2.14: Typische Radialkraftverteilung und mittlere Radialkraft aller Ringe

Die Abb. 2.14 zeigt eine typische Verteilung der Radialkraft am Innenrand der HTSL-Ringe. Es ist zu erkennen, dass nicht alle Domänen die gleiche Kraft erzeugen. Trotzdem zeigen die HTSL-Ringe eine recht gute Homogenität hinsichtlich der Levitationskräfte. Deutlich erkennbar sind die Korngrenzen, an denen die Kraft jeweils ein lokales Minimum hat. Im Mittel liegen die Schwankungen der Levitationskraft zwischen Minimal- und Maximalwert etwa bei einem Faktor zwei. Dabei sind die Maxima in der Breite meist deutlich stärker ausgeprägt als die Minima, sodass die mittlere Levitationskraft bei mehr als 50% des Maximalwertes liegt.

Diese Messungen dienen als erste Qualitätskontrolle der HTSL-Materialien. Das bedeutet auch, dass die bisher dargestellten Messergebnisse nicht auf den realen Tank übertragen werden dürfen, da zum einen der verwendete P-Magnet nicht dem späteren in Sammlerbauweise ausgeführten Erregersystem entsprach und zum anderen ein von der Situation im Tank abweichendes Aktivierungsverfahren zur Anwendung kam.

2.1.4 Messung an den Lagern

Für die Messung der Antwortspektren des HTSL-Lagers bei Schockbelastung wurde am IMAB ein Versuchsaufbau realisiert, der die Messung von Lagerkräften in allen drei Raumrichtungen erlaubt, die durch Störkräfte in diesen hervorgerufen werden. Die Erzeugung der Störkräfte erfolgt durch elektromagnetische Aktuatoren, die eigens für diesen Versuchsaufbau am IMAB entwickelt wurden. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, vorgegebene Lastspektren auf die Lageranordnung einwirken zu lassen und deren Reaktion zu messen. Die Abb. 2.15 zeigt den Messaufbau im Labor.

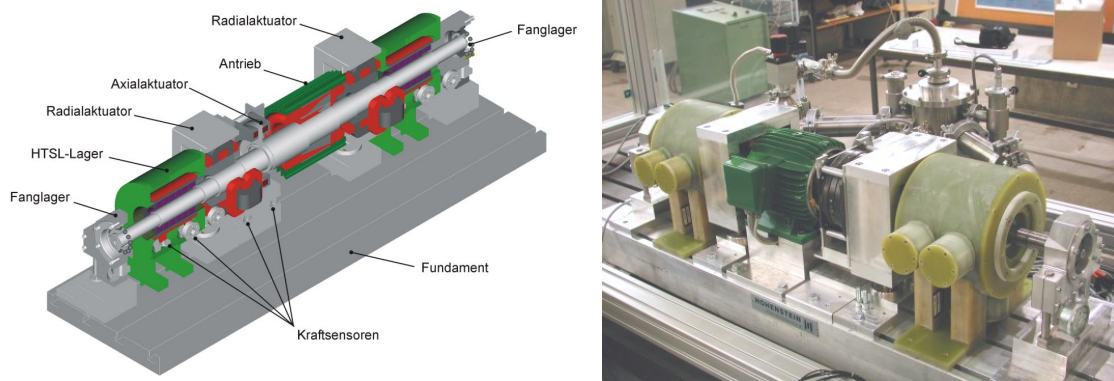


Abb. 2.15: Versuchsaufbau zur Messung der Antwortspektren

Als besonders schwierig erwiesen sich dabei Realisierung der Gehäuse für die Supraleiter und die Bereitstellung der benötigten Kühlleistung für Temperaturen unterhalb der Sprungtemperatur der verwendeten YBCO-Supraleiter. Das gesamte Kryosystem und damit die Konstruktion und Fertigung der Lagergehäuse, das in einem Unterauftrag ausgeführt wurde, erreichte erst nach diversen Iterationsschritten und der damit verbundenen erheblichen Ausdehnung der veranschlagten Zeit einen Stand, der den Einsatz im Versuchsaufbau ermöglichte. Parallel dazu musste bei der Bereitstellung der Kühlleistung umdisponiert werden, da die zuerst gelieferten Kältemaschinen, die nach dem Stirling-Prinzip arbeiteten, bei weitem nicht die erforderliche Leistung erbrachten. Zusätzlich war der Leistungsbedarf aufgrund von Auslegungsfehlern viel zu gering eingeschätzt worden.

Der aktuelle Stand ist in Abb. 2.15 (rechts) dargestellt. Sie zeigt die modifizierten Lager-Dewars und im Hintergrund das Dewar der neuen Kältemaschine mit den Anbindungen an die Lager-Dewar. Die Kälteleistung wird jetzt durch eine starke Gifford-McMahon-Kältemaschine bereitgestellt. Damit sind Temperaturen an den Supraleiteranordnungen bis 50 K möglich.

Mit Teilen dieses Systems – Kältemaschine und ein Lager-Dewar – wurden Messungen auf dem oben schon erwähnten 3-Achsen-Tisch durchgeführt (Abb. 2.16). Auf diese Weise konnten die statischen Daten des Lagers, also Kraft und Steifigkeit, in den drei Achsen vermessen und mit den berechneten Daten als auch mit vorangegangenen Messungen, die bei Nexans durchgeführt wurden, verglichen werden.

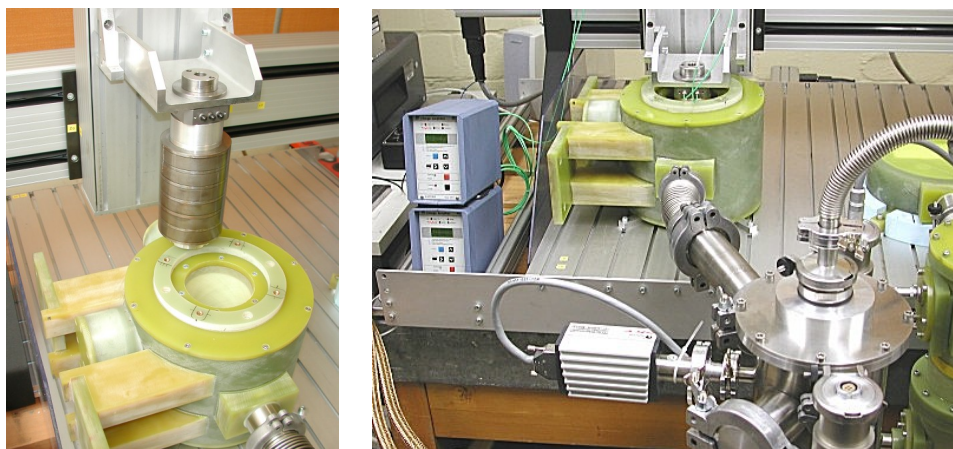


Abb. 2.16: Vermessung des rotationssymmetrischen HTSL-Lagers

2.1.5 Messergebnisse und Ausblick

Die Messungen zeigen eine nahezu isotrope Lagercharakteristik, bei einer OFC-Aktivierung (Abb. 2.17). In einer zweiten Messreihe wurde die Situation im Tank nachgebildet, wo die Lager bei maximaler Auslenkung entgegen der Belastungsrichtung aktiviert werden (Abb. 2.18). Zwar konnte bedingt durch den Versuchsaufbau nicht die später mögliche Maximalauslenkung realisiert werden, aber der Verlauf der gemessenen Kennlinien lässt eine Extrapolation mit guter Genauigkeit zu.

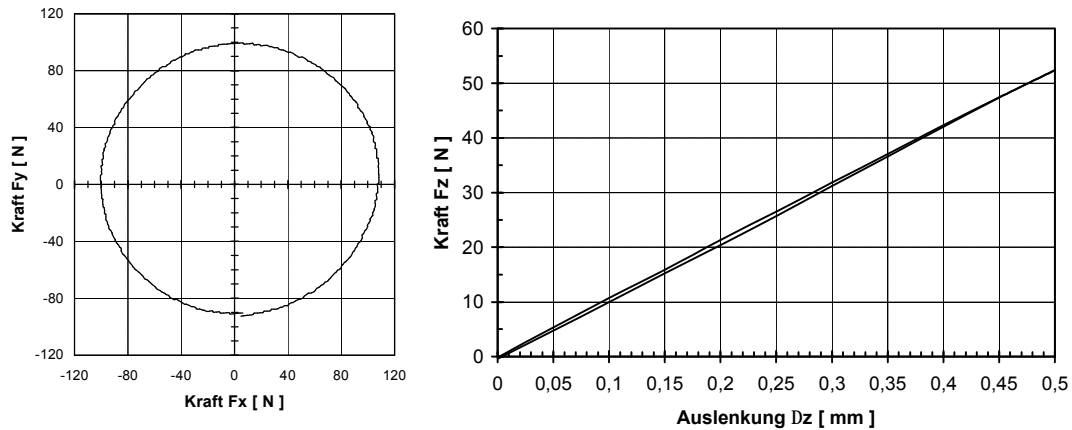


Abb. 2.17: Messergebnisse für eine OFC-Aktivierung

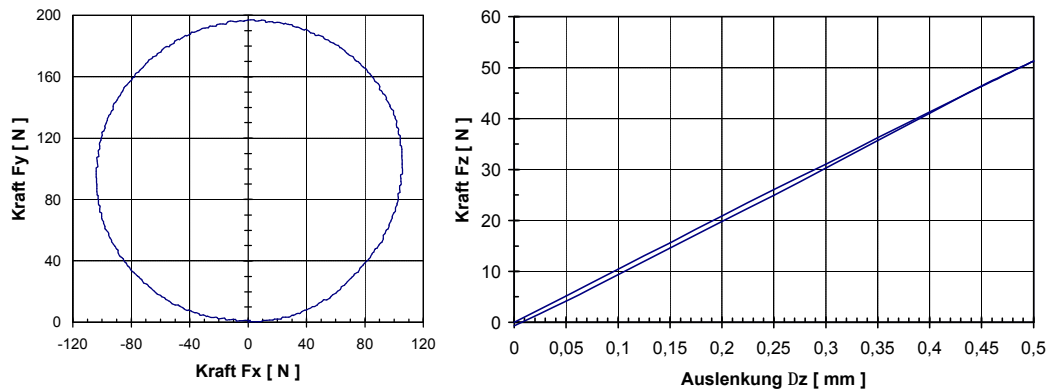


Abb. 2.18: Messergebnisse für eine OFCo-Aktivierung

Die Abb. 2.19 zeigt links eine frühere Messung an einem rotationssymmetrischen HTSL-Lager bei Nexans und rechts eine aktuelle Messung am IMAB. Deutlich ist der Fortschritt der Lagerentwicklung zum Projektende hin erkennbar. Während die ersten Messungen bei einer Auslenkung von einem Millimeter nur eine Kraft von etwa 40 N ergaben, werden jetzt bei gleicher Auslenkung mehr als 90 N erzielt. Die Steifigkeit beträgt demzufolge derzeit >90 N/mm im Gegensatz zu 40 N/mm. Dies ist zum einen zurückzuführen auf ein stärkeres Erregersystem zum anderen auf die Weiterentwicklung der Supraleiter. Messungen an einem linearen HTSL-Lager lassen ein Potenzial von etwa 50% mehr Steifigkeit bei Verwendung von weiter verbesserten HTSL-Materialien und einem weiter optimierten Erregersystem erwarten.

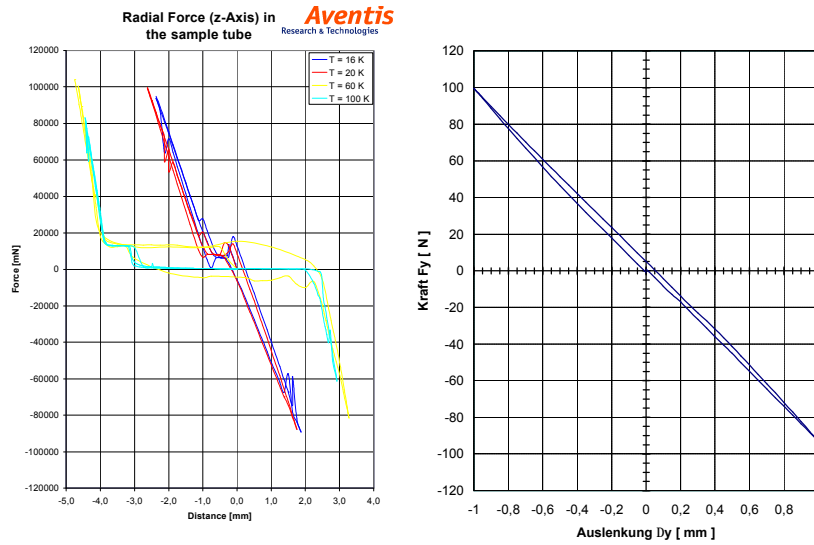


Abb. 2.19: Messungen der Radialkraft bei Nexans (links) und am IMAB (rechts)

Die jetzt erreichte Steifigkeit des HTSL-Lagers von $>90 \text{ N/mm}$ ist für den Einsatz im LH_2 -Tank mehr als ausreichend, da hier ein Aktivierungs-Offset von 5 mm zur Verfügung steht. Damit wäre ein Lager in der Lage ein Gewicht entsprechend etwa 450 N , also etwa 46 kg zu tragen, was dem projektierten Gesamtgewicht des Innentanks entspricht.

2.2 Vermessung der Antwortspektren des HTSL-PM-Lagers

Die Antworten der HTSL-PM-Lagerung auf stoßartige Anregungen wurden mit Hilfe des Schockdiagramms (Abb. 2.20) auf Basis der im vorangegangenen Abschnitt gemessenen Steifigkeitswerte ermittelt. Das angewendete Verfahren ist ein Näherungsverfahren, bei dem das zu untersuchende System durch einen Ein-Massen-Schwinger nachgebildet wird.

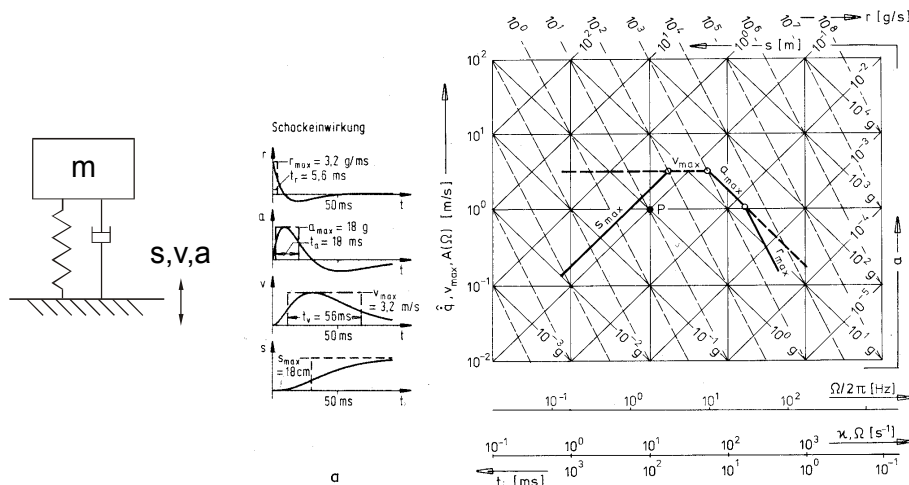


Abb. 2.20: Schockdiagramm (Beispiel), Ein-Massen-Schwinger

Bei stoßartigen Erregungen geht man stets davon aus, dass kein Aufschwingen des Systems in die Resonanz erfolgt. Die Betrachtungen erfolgen alle im Frequenzbereich, d.h. sowohl die Erregung als

auch die Stoßantwort werden durch die einhüllenden Grenzkurven des Frequenzspektrums dargestellt. Dies sind im einzelnen der Schwingweg, die Schwinggeschwindigkeit und die Schwingbeschleunigung.

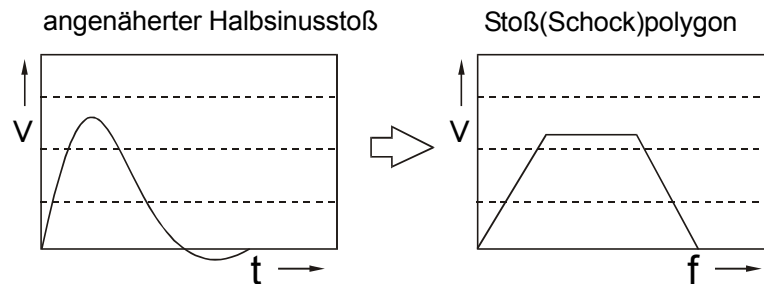


Abb. 2.21: Schwinggeschwindigkeit im Zeit- und Frequenzbereich

Die drei Größen werden in doppeltlogarithmischer Darstellung aufgetragen:

$$s_{\max} - \text{Steigung } +1 \quad v_{\max} - \text{Steigung } 0 \quad a_{\max} - \text{Steigung } -1$$

Die Eigenfrequenz des Systems wird aus den bekannten Größen Masse und Lagersteifigkeit gemäß

$$n = \sqrt{\frac{c}{m}} \quad \text{und} \quad f = \frac{n}{2\pi} \quad \text{ermittelt.}$$

Liegt der Schwinger mit seiner Eigenfrequenz außerhalb des Erregungsbereichs, ist die Struktur steif (Punkt 1 in Abb. 2.22). Liegt die Eigenfrequenz des Schwingers innerhalb des Erregungsbereichs, ist die maximale Beschleunigung deutlich reduziert, die Amplitude des Schwingwegs jedoch deutlich vergrößert (Punkt 2 in Abb. 2.22).

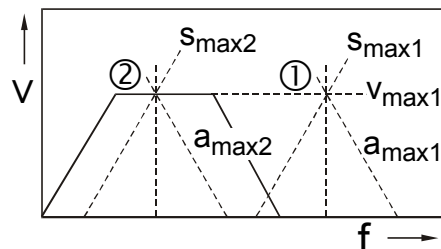


Abb. 2.22: Prinzipdarstellung Schockdiagramm

Für den Tankprototypen ergibt sich mit den Daten des vorigen Kapitels folgende Eigenfrequenz:

$$n = \sqrt{\frac{200 \frac{N}{m} \cdot 10^3}{40 \text{ kg}}} = 70,71 \text{ s}^{-1} \rightarrow f = 11,25 \text{ Hz}$$

Geht man mit diesem Wert und den vorgegebenen Anregungen in das Schockdiagramm (Abb. 2.23) lässt sich ablesen, dass die vorgegebenen Anregungen den verfügbaren Bewegungsspielraum im Lager nicht überschreiten. Die Schwingwege bleiben immer kleiner als 5 mm.

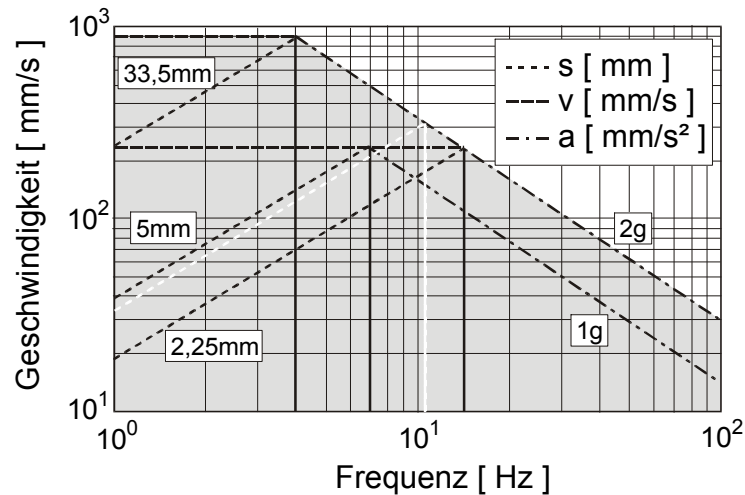


Abb. 2.23: Schockdiagramm für den Tankprototypen

2.3 Bau eines Aktuators zur thermisch gesteuerten Lageraktivierung mittels Memory-Metallen

HTSL-Lager werden durch spezielle Verfahren aktiviert, die sich durch die Positionierung der HTSL relativ zu den PM, also zum Erregerfeld, vor und nach dem Einkühlvorgang unterscheiden. Das bedeutet, dass die Interaktionspartner eines Lagers relativ zueinander bewegt werden müssen, um das Lager zu aktivieren. Im Fall des LH₂-Tanks werden die HTSL gegenüber dem Erregersystem bewegt. Da sie zwecks Kühlung fest mit dem Innentank verbunden sind, muss also der gesamte Innentank relativ zum Außentank bewegt werden.

Die für die Lageraktivierung geforderte Relativbewegung muss durch ein Stellglied oder Aktuator zur Verfügung gestellt werden. Dieser kann zum einen aktiv ausgeführt werden, also elektrisch/elektromagnetisch, hydraulisch oder pneumatisch. Andererseits ist eine passive Erzeugung des Stellweges sehr attraktiv, da keine zusätzlichen Energiequellen und Regelungseinrichtungen benötigt werden.

Im folgenden wird ein Aktuator beschrieben, der den Memory-Effekt von speziellen Metall-Legierungen nutzt. Die Längenänderung einer Memory-Metall-Spiralfeder (MM-Feder) wird über die von der Temperatur abhängigen Eigenschaften und dem Zusammenspiel mit einer konventionellen Stahlfeder beim Abkühlvorgang – beim Betanken – erreicht. Der Vorgang und damit die Aktivierung der Lager geschieht dabei autonom und nur durch T_{zemperatur} gesteuert.

2.3.1 Funktionsprinzip des Aktuators

Das Funktionsprinzip des Aktuators beruht auf der Interaktion von zwei gegeneinander verspannten Federn, einer Memory-Metall-Feder und einer konventionellen Stahlfeder, die in der in Abschnitt 4 beschriebenen Weise angeordnet sind. Die Längenänderung des Aktuators in dieser auf den ersten Blick statischen Anordnung ergibt sich aus den unterschiedlichen Eigenschaften der MM-Feder bei unterschiedlichen Temperaturen. So ist die Federrate unterhalb der kritischen Temperatur kleiner als oberhalb.

An dieser Stelle sei nur kurz darauf hingewiesen, dass sich die Veränderung der Federrate durch eine Änderung der Kristallstruktur des Memory-Metalls ergibt. Im warmen Zustand liegt ein austenitisches Gefüge vor, im kalten Zustand ein martensitisches.

Der Ablauf der Aktuatorfunktion sieht nun folgendermaßen aus:

- Die MM-Feder ist in der Weise vorgespannt, dass sie den Tank trägt, ohne weiter einzufedern, und gleichzeitig noch eine gewisse Vorspannung der Gegenfeder kompensiert, ebenfalls ohne weiter einzufedern. D.h. der Aktuator ist auf seine maximale Länge ausgefahren, gegen den Endanschlag.
- Wird der gesamte Aktuator abgekühlt, sinkt die Steifigkeit der MM-Feder und die Stahlfeder kann aufgrund ihrer jetzt größeren Kraft die MM-Feder zusammendrücken und damit den Aktuator verkürzen. Dabei sind die Federsteifigkeiten so bemessen, dass die Kraft durch das Tankgewicht für die Aktuatorfunktion nicht erforderlich ist. Dies wird noch dadurch begünstigt, dass sich die Vorspannung der MM-Feder beim Abkühlen fast vollständig abbaut (s. Abschnitt 2.3.2.2). Der Aktuator wird von der Stahlfeder bis an den oberen Endanschlag zusammengezogen.
- Bei der Erwärmung wird der Vorgang umgekehrt. Die MM-Feder „erinnert“ sich durch das Umklappen des Kristallgitters an ihre ursprüngliche Form und gewinnt dadurch auch ihre anfängliche Federsteifigkeit zurück. Damit ist sie wieder stärker als ihre Gegenfeder inklusive des Tankgewichts und kann den Aktuator wieder auf die volle Länge ausfahren und den Tank abstützen.

Essentiell für das Funktionieren des Gesamtsystems ist, dass die Umwandlungstemperatur der MM-Feder erst erreicht wird und damit die Funktion des Aktuators erst dann einsetzt, wenn die HTSL-Lager schon abgekühlt sind und die Tragfunktion übernehmen können. Das bedeutet für den Aktuator, dass er entweder thermisch isoliert sein muss oder aber eine so große Wärmekapazität aufweist, dass die verzögerte Abkühlung sichergestellt ist. Das Prinzip des Aktuators ist durch das Patent Nr. DE19806143 geschützt.

2.3.2 Dimensionierung der MM-Feder

Um den eben beschriebenen Vorgang durchzuführen, bedarf es einer genauen Abstimmung der beiden Federn. Dazu müssen die Eigenschaften der MM-Feder genau bekannt sein oder – wie in unserem Fall – experimentell ermittelt werden. Sind die Daten dann bekannt, kann eine passende Stahlfeder aus einem Standardsortiment eines Zulieferers herausgesucht werden.

Die MM-Federn bestehen aus der Legierung NiTi-CC; etwa je zur Hälfte aus Nickel und Titan mit geringen Mengen anderer Legierungsbestandteile. Das Ausgangsmaterial für die Federn, der Draht, wurde durch Strangpressen hergestellt und im letzten Umformschritt durch Ziehen auf das endgültige Maß gebracht. Die Herstellung der Federn erfolgte durch Warmwickeln auf einen beheizbaren Dorn, der nach Unterlagen des Federherstellers am IMAB gefertigt wurde. Die Abb. 2.24 zeigt eine der verwendeten MM-Federn in Originalgröße.



Abb. 2.24: Memory-Metall-Feder (Originalgröße)

Laut den Datenblättern findet die Gefügeumwandlung vom Austenit zum Martensit bei einer Temperatur von unter 100 K statt. Dieser tiefe Umwandelungspunkt passt sehr gut zu den gewünschten Eigenschaften des Systems aus HTSL-Lager und MM-Aktuator, da die Aktuatoren erst dann eine Wegänderung ausführen sollen, wenn die Supraleiter bereits kalt sind und damit die Lager die Tragfunktion übernehmen können.

Die verwendeten Federn haben folgende Daten:

Größe	Wert
Drahtdurchmesser	$d = 5 \text{ mm}$
Außendurchmesser	$D_e = 32 \text{ mm}$
Mittlerer Windungsdurchmesser	$D = 27 \text{ mm}$
Innendurchmesser	$D_i = 22 \text{ mm}$
Zahl der aktiven Windungen	$n = 1,5$
Entspannte Länge	$L_0 = 31,75 \text{ mm}$
Federrate	$c = 49,4 \text{ N/mm}$
Nennfederweg (auf Block)	$s = 14 \text{ mm}$

Tabelle 2.2: Daten der MM-Federn

2.3.2.1 Messaufbau

Um die Eigenschaften der MM-Federn, vor allem ihr Verhalten während des Abkühlvorgangs bzw. während der Gefügeumwandlung, zu untersuchen, wurde im Rahmen einer Studienarbeit ein Messaufbau (s. Abb. 2.25) realisiert, in den zunächst die Federn später auch der fertige Aktuator zu Testzwecken eingebaut und vermessen werden können. Der Messaufbau erlaubt die PC-gestützte Messung von Kraft, Weg und Temperaturen.

Die Kraftmessung erfolgt mittels eines Piezo-Kraft-Sensors von Kistler und einem nachgeschalteten Verstärker (Eigenbau IMAB). Die Wegmessung ist mit einem Linearwiderstand realisiert. Für die Temperaturmessung ist an der oberen Einspannung der Feder und an der unteren jeweils ein PT-100 Temperatursensor angebracht.

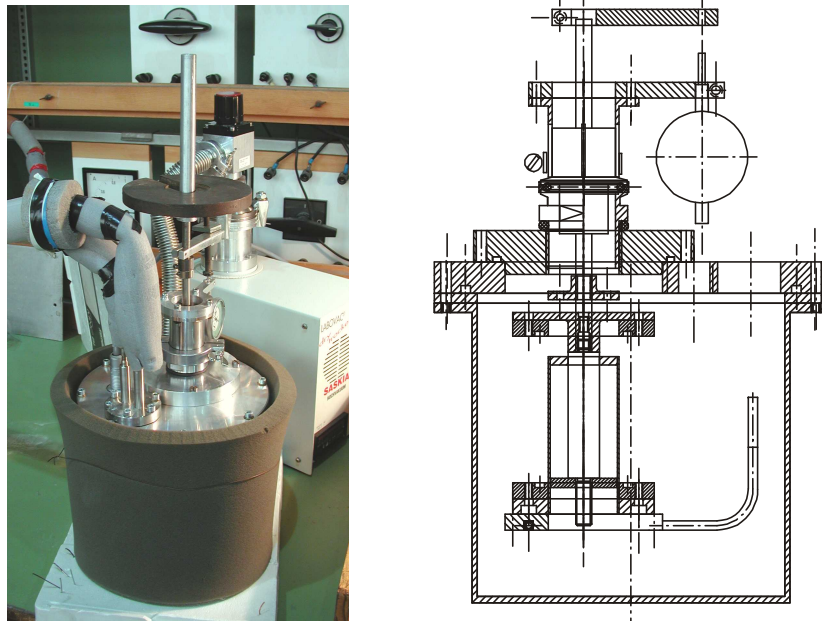


Abb. 2.25: Messaufbau zur Vermessung der MM-Federn

2.3.2.2 Messungen

Um die Eigenschaften der MM-Feder im Bereich der Gefügeumwandlung zu erfassen, wurden zwei Lastzyklen durchfahren, die sich wesentlich dadurch unterscheiden, wann die Feder belastet und wann sie abgekühlt wurde. Daraus ergaben sich folgende Versuchsdurchführungen:

1. Die MM-Feder wird zuerst mit flüssigem Stickstoff auf 77 K abgekühlt, d.h. die vollständige Gefügeumwandlung findet im unbelasteten Zustand statt. Danach wird sukzessive eine Belastung von 20 kg mittels Gewichten zu je 5 kg aufgebaut und wieder zurückgenommen. Abschließend wird die Feder wieder auf Umgebungstemperatur erwärmt.
2. Die MM-Feder wird wie beim ersten Versuch mit den Gewichtsstücken belastet – diesmal jedoch noch im warmen Zustand. Danach erfolgt die Einkühlung mittels LN₂ unterhalb der Gefügeumwandlungstemperatur. Nach einer kurzen „Kaltphase“ wird die Erwärmung eingeleitet und dann im warmen Zustand die Belastung abgebaut.

Wie die Diagramme auf der folgenden Seite zeigen, wirken sich die beschriebenen Verfahrensweisen sehr unterschiedlich auf das Verhalten der MM-Federn aus. Zunächst wurde jedoch die Federsteifigkeit beider Federn im warmen Zustand gemessen (Abb. 2.26).

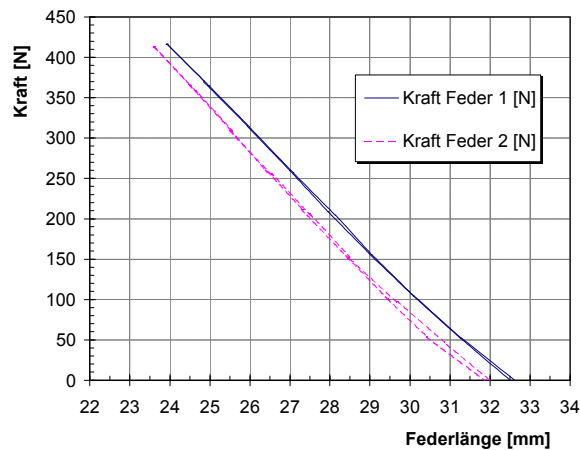


Abb. 2.26: Federsteifigkeit der MM-Federn im warmen Zustand

Während der weiteren Messungen (Abb. 2.26) wurde für den Piezo-Kraft-Sensor zweimal ein Reset durchgeführt, da es auf Grund der großen Temperaturänderungen im Messaufbau zu einer starken Drift infolge von thermischen Dehnungen kam. Die relevanten Messdaten konnten aber trotzdem gewonnen werden, da lediglich ein bekannter Offset abgezogen werden musste.

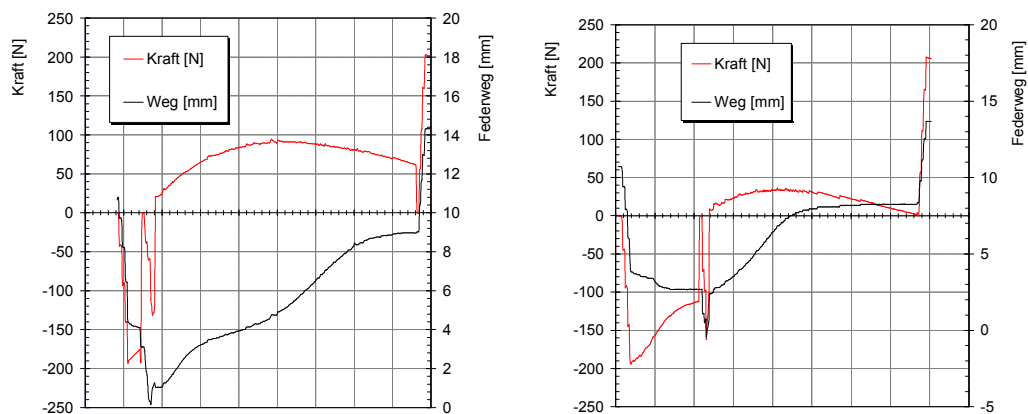


Abb. 2.27: Verläufe für Kraft und Weg der Federn 1 und 2 bei Versuchsschema 1

Wie man der Kraftkurve entnehmen kann, wurden – wie oben bereits beschrieben – nacheinander Gewichte zu je 5 kg aufgelegt, die gemäß der Federkennlinie zu den dargestellten Auslenkungen der Federn führten. Um die Federn bis auf Blocklänge zu verkürzen und damit den maximalen Federweg auszunutzen waren bei beiden Federn weitere 150 N aufzubringen. Für einen vollständigen Hub im kalten Zustand sind also etwa 350 N notwendig.

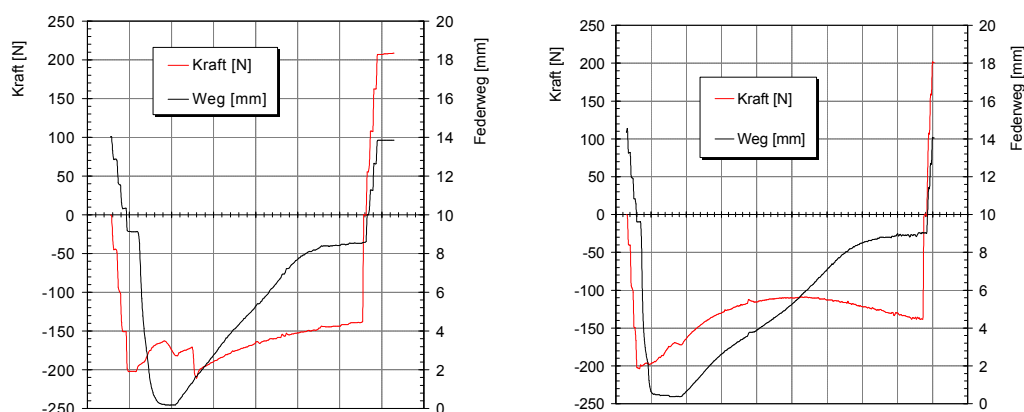


Abb. 2.28: Verläufe für Kraft und Weg der Federn 1 und 2 bei Versuchsschema 2

Im Belastungsschema 2 führen die Federn bei der Grundbelastung von 20 kg einen größeren Hub aus, sogar bis auf Blocklänge (Abb. 2.28). Es ist also keine weitere Belastung erforderlich. Dieses Verhalten begünstigt die Aktuatorfunktion, da in der realen Konfiguration durch die Gegenfeder auch eine permanente Gegenkraft vorhanden sein wird. Nach der Erwärmung und der erfolgten Entlastung nahmen die Federn wieder ihre Ausgangslänge an. Auch bei dieser Messung wurde vor der Entlastung ein Reset für das Kraftsignal durchgeführt.

2.3.3 Gegenfeder

Zur Auslegung der Gegenfeder wird das Kraft-Weg-Diagramm der MM-Feder im warmen Zustand aufgezeichnet. Trägt man hier die Kraft ab, die ein Aktuator erzeugen muss, um das halbe Tankgewicht zu tragen ohne einzufedern, erhält man den ersten Teil des Vorspannweges. Aus den Versuchen mit den MM-Federn ist bekannt, dass man für die Einfederung auf Blocklänge während der Abkühlung (Belastungsschema 2) eine Kraft von 200 N benötigt. D.h., die Gegenfeder muss bei maximaler Ausfederung (Aktuator vollständig eingefahren → Blocklänge der MM-Feder) genau diese Kraft bereitstellen (Punkt ⑤ in Abb. 2.29). Da die Federkennlinie der Gegenfeder eine der MM-Feder entgegengesetzte Steigung aufweist, muss die durch sie erzeugte Kraft bei Ausdehnung der MM-Feder zu deren Vorspannung hinzu addiert werden. Um die benötigte Vorspannung möglichst gering zu halten und damit einen möglichst großen Arbeitshub des Aktuators zu erhalten, sollte die Gegenfeder eine flache Kennlinie aufweisen. Diese Kennlinie trägt man nun vom Punkt des unteren Endanschlages aus ab. Wenn man jetzt die Erkenntnis aus der ergänzenden Messung heranzieht und annimmt, dass die MM-Feder bei einem idealisierten Abkühlvorgang die gesamte Vorspannung für die Tanklast abbaut, ohne dass sich ihre Länge ändert, kann man von ihrer Federkennlinie den Betrag der Tanklast als konstanten Offset abziehen. Das Lot des Schnittpunkts von Gegenfederkennlinie und verschobener MM-Federkennlinie auf die Abszisse zeigt dann den benötigten Gesamtvorspannweg für den warmen Zustand (Punkt ② in Abb. 2.29). Der Schnittpunkt des gleichen Lots mit der ursprünglichen Federkennlinie der MM-Feder ergibt die dazugehörige Vorspannkraft (Punkt ① in Abb. 2.29).

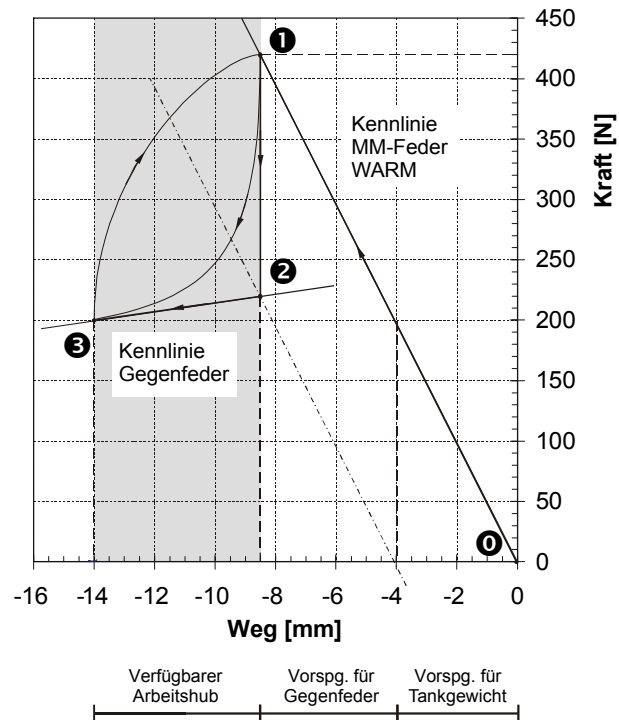


Abb. 2.29: Kraft-Weg-Diagramm des MM-Aktuators

2.3.3.1 Daten der Gegenfeder

Als Gegenfeder wurde eine Edelstahl Spiralfeder mit angelegten und geschliffenen Enden gewählt. Die Feder stammt aus dem Sortiment eines Federherstellers und ist als Lagerware erhältlich. Sie hat folgende Daten:

Größe	Wert
Drahtdurchmesser	$d = 4 \text{ mm}$
Außendurchmesser	$D_e = 64 \text{ mm}$
Mittlerer Windungsdurchmesser	$D = 60 \text{ mm}$
Innendurchmesser	$D_i = 56 \text{ mm}$
Durchmesser Führungsdorn	$D_d = 54,8 \text{ mm}$
Durchmesser Bohrung	$D_h = 66,5 \text{ mm}$
Zahl der aktiven Windungen	$n = 3,5$
Entspannte Länge	$L_0 = 112 \text{ mm}$
Federrate	$c = 3,03 \text{ N/mm}$
Federlänge bei Nennkraft	$L_n = 28,3 \text{ mm}$
Nennfederweg	$s_n = 83,7 \text{ mm}$
Nennfederkraft	$F_n = 254,1 \text{ N}$
Dynamische Nennfederkraft	$F_{n,dyn} = 244,8 \text{ N}$
Masse	$m = 103,8 \text{ g}$

Tabelle 2.3: Daten der Gegenfeder

2.3.4 Kraft-Weg-Charakteristik des MM-Aktuators

Gemäß Abb. 2.29 kann der Aktuator einen Stellweg innerhalb des grau unterlegten Bereichs ausführen. Im warmen Zustand ist er voll ausgefahren und drückt mit der Vorspannung für das Tankgewicht von 200 N gegen den Endanschlag (Kraftdifferenz zwischen ❶ und ❷). Wird die MM-Feder beim Befüllendes Tank unter die Umwandlungstemperatur abgekühlt, verliert sie diese Vorspannung vollständig (❶ → ❷) und wird von der Gegenfeder zusammengedrückt (Punkt ❸). Da der Abbau der Vorspannung und das Zusammendrücken durch die Gegenfeder nicht – wie idealisiert dargestellt – nacheinander sondern parallel verlaufen, folgt die Kraft-Weg-Kennlinie einer Kurve.

Bei der Erwärmung bei leerem Tank läuft der Vorgang in entgegengesetzter Richtung ab. Durch den Memory-Effekt gewinnt die MM-Feder ihre Vorspannung wieder zurück und kann den Aktuator gegen die Kraft aus Gegenfeder und Tankgewicht wieder bis auf die Ausgangslänge ausfahren.

Der Stellweg beträgt bedingt durch die Daten der MM-Federn 5,5 mm. Um einen größeren Hub zu realisieren, müssten die MM-Federn bei gleicher Federrate eine größere Länge haben, also mehr Windungen aufweisen.

2.3.5 Aufbau des Memory-Metall-Aktuators

Wie oben beschrieben, besteht der Aktuator im wesentlichen aus zwei Spiralfedern – der MM-Feder und einer Stahlfeder –, die beide der Einfachheit halber als Druckfedern ausgeführt sind und einer Trag- und Führungsstruktur, die auch den Stellweg in beiden Endlagen begrenzt. Der Aktuator ist als kompakte Einheit konstruiert, die als komplette Baugruppe in den Tank eingebaut werden kann. Der Aktuator wird in Rohrstützen eingesetzt die auf das zentrale Rohr des Innentanks geschweißt sind (s. Abschnitt 3).

Er besteht aus vier einfach zu fertigenden Drehteilen, die fast ohne Werkzeug montiert werden können. Der bewegliche Teil wird zwischen den beiden Federn gehalten und je nach Temperatur an den oberen oder unteren Anschlag gedrückt. Er wird geführt über den Mitteldorn, der in die Deckplatte geschraubt ist. Die Stahlfeder wird über den äußeren Gehäuseteil vorgespannt, der ebenfalls mit der Deckplatte verschraubt ist (Abb. 2.30 bis 2.32).

Wie in Abschnitt 2 beschrieben wurde, muss gewährleistet werden, dass sich die MM-Feder erst abkühlt, wenn die HTSL bereits abgekühlt sind. Bedingt durch die Konstruktion ist die MM-Feder von großen Wärmekapazitäten umgeben, so dass eine verzögerte Abkühlung erreicht wird.

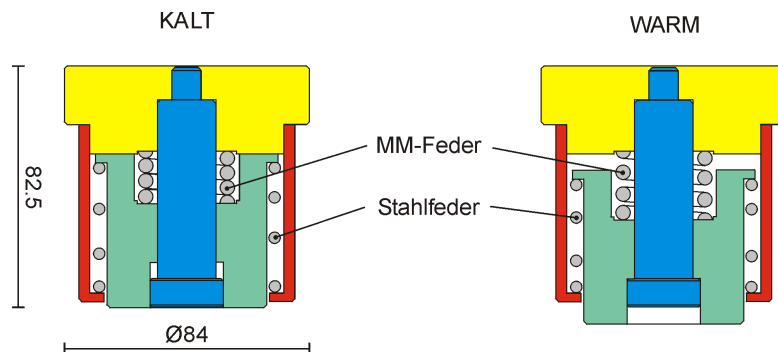


Abb. 2.30: Schnittbild des Aktuators in beiden Endlagen

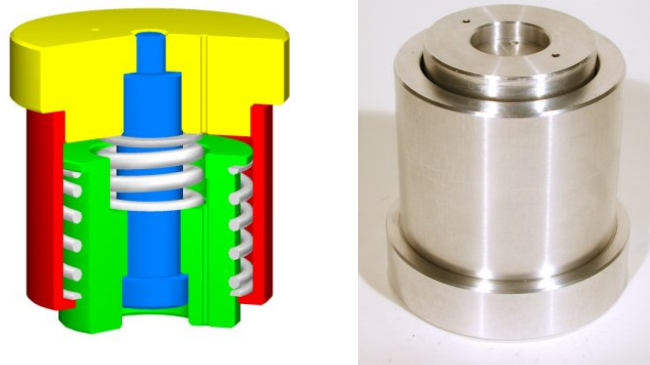


Abb. 2.31: MM-Aktuator



Abb. 2.32: Bauteilreihenfolge

2.3.6 Funktionstest

Der Funktionstest mit den fertiggestellten Aktuatoren zeigt zunächst, ob die angestrebte Funktionsweise gegeben ist. Dazu werden die Aktuatoren mittels flüssigem Stickstoff abgekühlt. Überprüft wird zum einen die Funktion ohne äußere Last und zum anderen das Funktionieren mit maximaler Belastung.

2.3.6.1 Funktionstest ohne Belastung

Die Aktuatoren werden in ein Behältnis gestellt und mit LN_2 begossen. Die Aktuatoren verkürzen sich wie geplant von maximaler auf minimale Länge (Stellweg 5,5 mm). Jetzt werden sie mit einem Gewicht von 20 kg belastet. Während der Erwärmung wird der Stempel des Aktuators ausgefahren und die Gewichte angehoben. Allerdings wird der maximale Stellweg und damit der Endanschlag nicht ganz erreicht: Es fehlt ca. 1 mm. Die MM-Feder müsste demnach eine noch höhere Vorspannung bekommen, was allerdings den Stellweg noch weiter einschränken würde.

2.3.6.2 Funktionstest mit Belastung

Bei diesem Versuch werden die Aktuatoren schon vor dem Einkühlen mit 20 kg belastet. Dabei zeigt sich wie im vorherigen Versuch schon eine leichte Einfederung von ca. 1 mm. Beim Abkühlen

verkürzt sich der Aktuator wie erwartet auf seine minimale Länge. Beim Erwärmen wird der gleiche Stellweg erreicht wie im ersten Versuch, d.h. die Aktuatoren funktionieren mit und ohne Belastung.

2.3.7 Abschließende Beurteilung und Ausblick

Wie die Tests gezeigt haben, kann die angestrebte Funktion des temperaturgesteuerten Anhebens und Absenkens einer Masse mittels Memory-Metall-Federn dargestellt werden.

Bedingt durch die notwendige Vorspannung, die aus den in den Vorversuchen ermittelten Daten berechnet wurde, lässt sich nicht der angestrebte maximale Stellweg von 7 mm realisieren sondern nur 5,5 mm. Das könnte für den ersten Versuchstank evtl. bedeuten, dass er nicht ganz gefüllt werden kann, wenn die HTSL-Lager zur Aktivierung den vollen Stellweg benötigen. Dies ist zwar nicht zu erwarten, muss aber noch durch Versuche bestätigt werden.

Der Umstand, dass die Aktuatoren bei einer Belastung mit 20 kg doch etwas einfedern, obwohl sie diese Last eigentlich ohne Wegänderung tragen sollten, lässt sich dadurch erklären, dass sich die Vorspannung bei den Versuchsmodellen nicht so genau auf die Auslegungswerte einstellen lässt. Bedingt wird dies auch durch Längen- und Steifigkeitstoleranzen bei den MM-Federn. Das Nichterreichen des vollen Hubs bei maximaler Belastung stellt allerdings kein Problem dar, da die Aktuatoren nur den leeren Tank heben müssen. Beim Befüllen übernehmen die HTSL-Lager die Tragfunktion bevor die maximale Füllmenge und damit das maximale Gesamtgewicht erreicht werden.

3 Integration der Komponenten in den Tank

Beim Projektpartner Messer Griesheim wurden die am IMAB entwickelten und gebauten Komponenten – PM-Erregersystem, endbearbeitete HTSL-Ringe sowie MM-Aktuatoren – in einen dort gebauten Tank integriert. Die realisierte Konfiguration ist in Abb. 3.1 dargestellt.

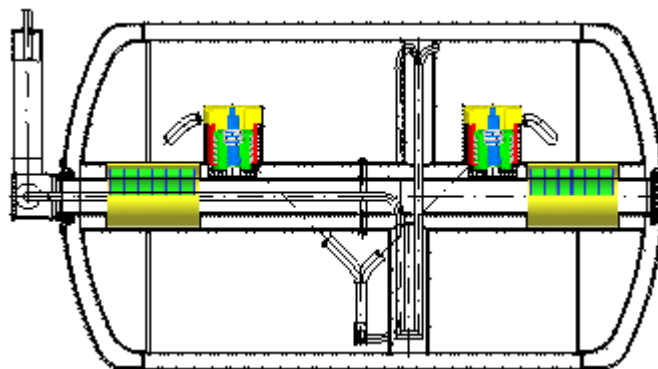


Abb. 3.1: LH₂-Tank mit MM-Aktuatoren und HTSL-Lagern

3.1 Funktionstest

Der erste Funktionstest erfolgte im Wasserstoff-Labor von Messer Griesheim. Dort wurde der Tank aufgestellt und die Versorgung mit flüssigem Wasserstoff angeschlossen (Abb. 3.2 links). Um die Funktion der Lager und der Aktuatoren überwachen zu können, wurde der Tank mit mechanischen Anzeigen ausgestattet, die ähnlich einer Füllstandsanzeige die Positionierung vom Innentank zum Außentank anzeigen (Abb. 3.2 rechts). Wie mit den Füllversuchen gezeigt werden konnte, funktioniert das Zusammenspiel von MM-Aktuatoren und HTSL-Lagern während des Befüllens, sodass der Innentank wie geplant eine freischwebende Position innerhalb des Außentanks einnehmen konnte.

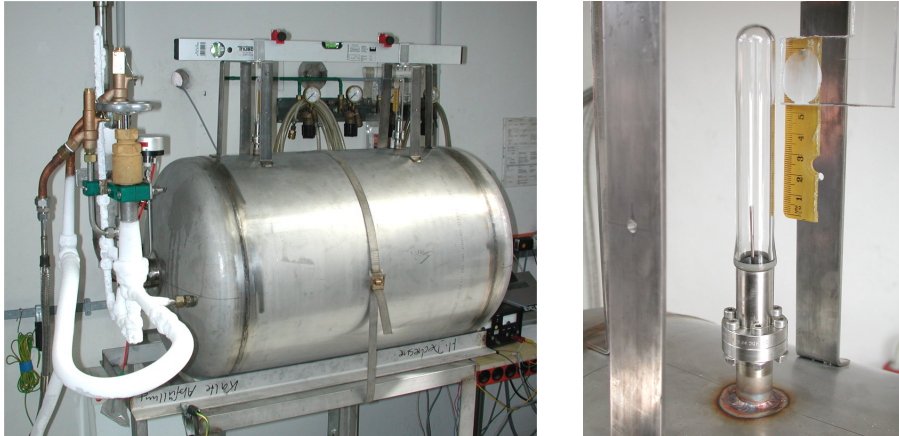


Abb. 3.2: LH₂-Tank mit Versorgungsanschlüssen und Schwebhöhenanzeige

4 Veröffentlichungen

J. Bock, M. Baecker, G. Brommer, L. Cowey, M. Kesten, H. Fieseler, W.-R. Canders, H. May, H.C.Freyhardt, A.Leenders, *Levitated liquid hydrogen cryotank for automotive application*, Proc. EUCAS'99, "4th European Conference on Applied Superconductivity", 14.-17. Sept. 1999, Sitges, Spain

H. May, S.-O. Siems, E. Portabella, R. Palka, W.-R. Canders, *Supraleitende Lager für Flüssigwasserstofftanks*, Dresdner Kolloquium "Kühltechnik für elektronische und supraleitende Bauelemente", 26. Nov. 1999, ILK Dresden

S.-O. Siems, H. May, W.-R. Canders, *Levitation forces and stiffness of model arrangements of magnetic HTSC bearings*, ISMB-8, 8th Int. Symposium on Magnetic Bearings, 26.-28. Aug. 2002, Moto, Japan