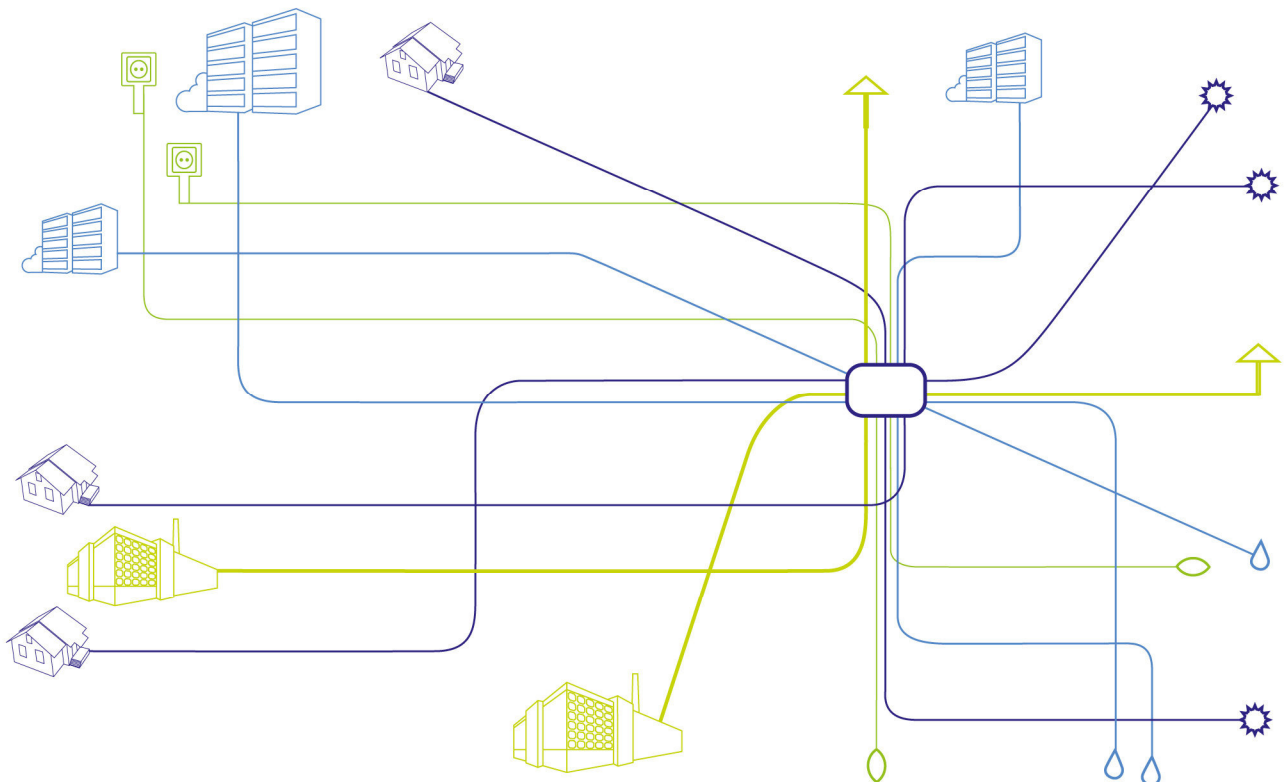




Flywheel als Energiespeicher in Hybrid- und Elektrofahrzeugen für den Individualverkehr



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, reading 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, reading 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

1 Einleitung

Ausgangssituation:

Aktuell verursacht der Straßenverkehr etwa 20% der CO₂-Emissionen der Europäischen Union, rund zwei Drittel stammen dabei von PKWs. Gerade in diesem Bereich ist aufgrund des geringen Gesamtwirkungsgrades konventioneller PKWs (etwa 18% für den NEFZ) eine deutliche Reduktion der Emissionen möglich. Ein Ansatz dafür ist die Hybridisierung von Fahrzeugen, womit theoretisch der optimale Wirkungsgrad aktueller Verbrennungskraftmaschinen (ca. 40%) erreicht werden kann. Verglichen mit konventionellen Fahrzeugen sind aktuell verfügbare Hybridfahrzeuge jedoch nicht konkurrenzfähig, primär da die verwendeten elektrochemischen Energiespeicher (Batterie, Supercap) die Anforderungen in Bezug auf Leistungs- und Energiedichte, Wirkungsgrad, Lebensdauer und Preis nicht erfüllen können. Trotz intensiver Forschungsaktivitäten ist es nach aktuellem Wissensstand nicht möglich, einen elektrochemischen Energiespeicher zu entwickeln, der alle gestellten Aufgaben erfüllen kann.

1.1 Aufgabenstellung:

Im Rahmen des Projekts werden Realisierungskonzepte für Schlüsselkomponenten von Schwungradspeichern für den Einsatz im Individualverkehr erstellt. Dementsprechend liegen die Ziele des Projekts in der Entwicklung geeigneter Lagerkonzepte, um eine Rotation der Schwungradmasse mit sehr hohen Drehzahlen und minimalen Verlusten unter Einhaltung der Sicherheitsbestimmungen zu ermöglichen, in der Untersuchung des Schwungradkonzepts zur Optimierung der Parameter Größe, Gewicht, Energieinhalt, Leistungsfähigkeit und Kosten, sowie in der Optimierung des elektrischen Antriebs bzw. Generators.

1.2 Schwerpunkte des Projektes:

Entsprechend der geplanten Projektabschnitte führen die folgenden Methoden zu den angestrebten Projektergebnissen:

Energiefluss-Simulation des Gesamtfahrzeugs:

Zur Ermittlung der im realen Betrieb eines Kfz geforderten Eckdaten des Energiespeichersystems werden Gesamtfahrzeug-Simulationen durchgeführt. Als Grundlage dieser elektrischen Energiefluss-Simulationen dient ein Simulationssystem zur Modellierung des Energieflusses in Fahrzeugen. Mit dessen Hilfe werden unterschiedliche Fahrzeugkonzepte (Hybridkonzepte, rein elektrisch betriebenes Kfz, ...) simuliert und für jedes Konzept die Belastungsprofile des Energiespeichersystems ermittelt. Daraus ergeben sich die geforderten Eckdaten für Flywheel-Systeme beim Einsatz in unterschiedlichen Kraftfahrzeugen.

Die Simulationsumgebung ermöglicht es auch, den Einfluss von Limitierungen durch das Flywheel-System (z.B. verminderte Rekuperation von Bremsenergie durch begrenzte maximale Leistungsaufnahme) auf den Treibstoffverbrauch bzw. den CO₂-Ausstoß zu berechnen. Als Grundlage für die Simulationen dienen einerseits standardisierte Fahrzyklen und andererseits mit Hilfe von GPS-Trackern aufgenommene reale Fahrprofile, aus denen die im täglichen Betrieb des Fahrzeugs resultierenden Energieflüsse berechnet werden können.

Messung mechanischer Belastungsprofile:

Das mechanische Lastenheft wird durch den Partner FH Joanneum erstellt. Es handelt sich hierbei um eine Integrationsaufgabe in das Fahrzeug mit dem Ziel, Lösungen aufzuzeigen, die möglichst breit in verschiedenen PKW-Klassen eingesetzt werden können. Dazu werden mit Hilfe von MKS-Simulation Fahrzeugtypen mit charakteristisch unterschiedlichem Bewegungsverhalten ausgewählt. Vertreter dieser Fahrzeugtypen werden mit Beschleunigungsmesstechnik ausgestattet. Auf repräsentativen Fahrstrecken wird der Bewegungszustand gemessen und statistisch ausgewertet. Ziel ist es, typisch auftretende Belastungen für das Magnetlager aufzunehmen. Die Messdaten erlauben die genaue Dimensionierung der Magnetlager für ein breites Fahrzeugspektrum und somit eine wirtschaftliche Lösung.

Evaluierung von Realisierungskonzepten für Schwungradspeicher

Die erarbeiteten Konzepte werden auf Modulebene simuliert, um eine Abschätzung der Einsetzbarkeit bei den zu erwartenden Belastungsprofilen (elektrisch, mechanisch) durchführen zu können. Dadurch können Knock-out Kriterien erkannt, sowie Stärken und Schwächen der einzelnen Konzepte herausgearbeitet werden. Im Speziellen können Abschätzungen gemacht werden, ob die Rahmenbedingungen in Bezug auf ausreichende Lebensdauer und Unfallsicherheit erfüllt werden können.

Simulation und Aufbau von Subsystemen

Für die grundlegenden Komponenten des Flywheel-Speichers (Magnetlager und elektrische Maschine) werden mechanische sowie elektromagnetische Simulationsmodelle erstellt. Auf Basis der Simulationen werden Funktionsmuster aufgebaut, die zur experimentellen Evaluierung der Belastbarkeit der Komponenten verwendet werden. Durch die Ergebnisse der Experimente können wiederum die Simulationsmodelle verfeinert werden.

Demonstration der Erfüllung der Anforderungsprofile

Nach dem erfolgreichem Abschluss des Aufbaus der Funktionsmuster von Flywheel-Subsystemen werden die Funktionsmuster verwendet, um experimentell die Einhaltung der geforderten Rahmenbedingungen (elektrische und mechanische Lastprofile) nachzuweisen bzw. weiteren Verbesserungsbedarf aufzuzeigen.

Bei Erfüllung der technischen Rahmenbedingungen kann anhand der Implementierung der Subsysteme eine erste Abschätzung der Wirkungsgrade sowie der Kosten der Systeme durchgeführt werden.

1.3 Einordnung in das Programm:

Schwungradspeicher stellen eine aussichtsreiche Alternative zu elektrochemischen Energiespeichern dar, da sie eine hohe Leistungsdichte mit einer hohen Energiedichte kombinieren. Zusätzliche Vorteile des Flywheels gegenüber elektrochemischen Energiespeichern sind ein deutlich größerer Betriebstemperaturbereich, sowie in Bezug auf Batterien eine deutlich höhere Zyklenfestigkeit und damit Lebensdauer, bzw. in Bezug auf Supercaps eine deutlich höhere Energiedichte.

Aufgrund der gezeigten Eigenschaften wäre der Schwungradspeicher die beste Wahl als Energiespeicher für den mobilen Anwendungsbereich. Hindernisse einer Serienfertigung sind aus heutiger Sicht vor allem die begrenzte Lagerlebensdauer, als auch eine zu geringe Energiedichte der Schwunghasse. Prinzipiell sind beide Probleme lösbar, eine entsprechende Grundlagenforschung ist aber noch nötig:

1.1 Aufbau der Arbeit & verwendete Methoden:

Mit der Erstellung des mechanischen und elektrischen Lastenheftes wurde der Grundstein für die nächsten Projektschritte gelegt. Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass die Aufhängung (Befestigung) des Flywheels im Fahrzeug eine sehr große Rolle für die Dimensionierung und Lebensdauer der Lagerung (mechanisches Lager) darstellt. Messungen im realen Fahrbetrieb haben ergeben, dass die auftretenden Kräfte und Beschleunigungen auf das Flywheel in der gleichen Größenordnung sind, wie bei den simulierten Parkschäden. Somit müssen für kleinere Unfälle keine speziellen Vorkehrungen getroffen werden, um das Flywheel zu schützen. Im nächsten Schritt erfolge die Konzepterstellung. Aus technischer Sicht wäre die Ausführung als „Glockenläufer“ zu bevorzugen (geringstes Gewicht und Volumen für die gestellten Anforderungen), aber die notwendigen Faserverbundwerkstoffe für die Schwungmasse sind „aus heutiger“ Sicht noch zu wenig für dieses Einsatzgebiet verstanden bzw. untersucht. Für die weiterführenden Projektschritte wurde ein Innenläuferkonzept bestehend aus hochfesten Dynamoblechen festgelegt. Weiters hat sich gezeigt, dass ein rein magnetisch gelagerter Rotor im PKW Bereich nicht sinnvoll (Kosten, Baugröße, usw.) einsetzbar ist. Als äußerst vielversprechend erweist sich aber die Kombination aus herkömmlichen Wälzlager und einer (geringen) Magnetlager-Unterstützung. Aufgrund dieser Unterstützung erreicht die Lebensdauer des herkömmlichen Lagers die geforderte Betriebsstundenanzahl des Gesamtfahrzeugs. Als Antriebsmaschine wurde eine geschaltete Reluktanzmaschine (SRM) gewählt. Diese erfüllt die Anforderungen in Hinblick auf Leistung, Bauraum und Wirkungsgrad. Die Verluste im Rotor sind im Vergleich mit synchronen Maschinenkonzepten - trotz speziellem Ansteuermuster - deutlich höher, was zu entsprechenden Problemen bei der Kühlung des Rotors führt. Ebenfalls ist das Geräuschverhalten der SRM Maschine im Fahrzeug, trotz des speziell dafür abgestimmten Ansteuermusters, nicht optimal. Diese Geräuschentwicklung der Reluktanzmaschine schränkt die mögliche Einbaulage im Fahrzeug entsprechend ein. Als vielversprechende Alternative könnte daher eine synchrone Reluktanzmaschine verwendet werden.

Ausblick und Resümee

Im Bereich der Lagerung stellt der in diesem Projekt aufgezeigte Ansatz (Verwendung eines konventionellen Hybridkugellagers welches durch ein kleines Magnetlager entlastet wird) bereits einen interessanten und vielversprechenden Ansatz dar. Im Bereich „fortschrittlicher“ Rotormaterialien spielen vor allem kohlefaserverstärkte Werkstoffe eine große Rolle. Obgleich dieser Werkstoff bereits vielfältig eingesetzt wird, unterscheiden sich die Anforderungen an einen Kohlefaser-Rotor (gewickelte Langfaser, dickwandige Struktur) stark von den üblichen Anwendungsgebieten (dünnwandige Strukturen bzw. Platten). Es fehlen daher sowohl entsprechende Simulationstools bzw. Parameter zur Beschreibung, als auch Erfahrungen im tatsächlichen Einsatz (z.B. Festigkeit, Bruchverhalten).

2 Inhaltliche Darstellung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch das Projekt Power KERS der Energiespeicher „Flywheel“ wesentlich besser verstanden werden konnte. Viele Probleme konnten im Zuge des Projektes gelöst werden, und neue Lösungsansätze für noch vorhandene Fragestellungen aufgezeigt werden.

2.1.1 Erstellung eines Anforderungsprofils

2.1.1.1 Elektrisches Lastenheft:

Für die Erstellung des elektrischen Lastenheftes wurde eine Energiefluss-Simulation durchgeführt. Simuliert wurde ein Parallel-Hybrid mit einem Gesamtgewicht von 1500 kg. Der Energieinhalt des Speichers sowie dessen Leistungsfähigkeit wurde von 250 kJ bis 1000 kJ bzw. von 10 kW bis 50 kW variiert. Berücksichtigt wurden dabei ein reales Verbrauchskennlinienfeld eines Toyota 1.3l HSDI Motors sowie eine möglichst optimale Lastpunktverschiebung durch Speicherung bzw. Entnahme von Energie durch das Flywheel-System. Die Kennfelder für die elektrische Maschine des Antriebs und im Flywheel basieren auf real gemessenen Daten. Nachfolgend die wichtigsten Ergebnisse:

Für den gefahrenen Zyklus (Artemis) wurde ein Energiebedarf von 26 MJ sowie ein max. rekuperierbarer Teil von 7,5 MJ berechnet. Durch die gewählte Betriebsstrategie wird ein mittlerer VKM-Wirkungsgrad von 38,7% erreicht. Die elektrische Maschine wird im Mittel bei 90,8% im Motorbetrieb und bei 92,7% im Generatorbetrieb verwendet.

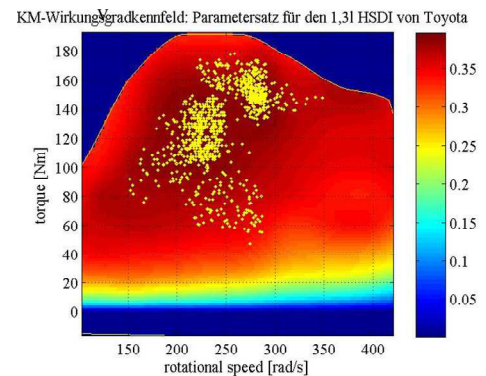
Das Schwungrad wird bei einem mittleren Wirkungsgrad von 89,8% (laden) und 84,1% (entladen) betrieben. Basierend auf diesen Simulationsdaten wurden mehrere Flywheel-Realisierungskonzepte miteinander verglichen.

2.1.1.2 Mechanisches Lastenheft:

Es wurden der Beschleunigungszustand und die Drehrate eines als starr angenommenen Chassis messtechnisch erfasst. In der Nähe des Fahrzeugschwerpunktes wurden ein dreiachsiger Drehratensensor und ein dreiachsiger Beschleunigungssensor angeordnet und somit die gesuchten Signale direkt gemessen. Zur Zuordnung der Signale zu definierten Wegstrecken wurde ein GPS-basierter Datenlogger verwendet, der zusätzlich die Höheninformation zur Bestimmung der gefahrenen Steigung liefert. Zur Überprüfung der Beschleunigungssignalqualität wurde ein Sensor installiert, der optisch die Fahrzeuggeschwindigkeit erfasst.

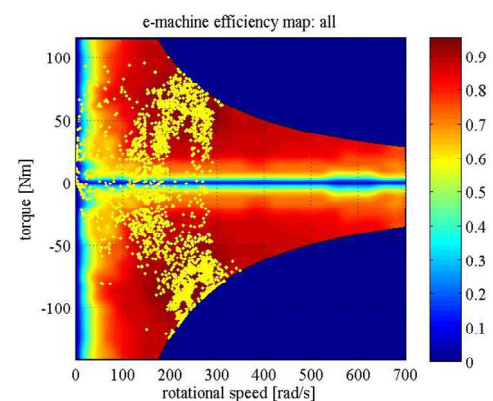
Es wurden folgende Fahrzeuge vermessen: Ein VW Passat als komfortabler PKW der Mittelklasse, ein Mercedes ML320 als Repräsentant der SUV Klasse mit deutlich höheren Federwegen, ein SMART Roadster als sportlich gefederter Kleinwagen mit kurzem Radstand und ein OPEL Movano als Transporter, der leer sehr straff gefedert ist.

Die gewählten Teststrecken bestanden aus Stadtfahrten auf ein- und mehrspurigen Stadtstraßen sowie Überlandstrecken und Autobahnabschnitten. Der Zyklus erlaubt sowohl die Beurteilung der Bauteilbelastungen als auch die Beurteilung der Effizienz von Hybridstrategien bzw. Ermittlung der optimalen Speicherkapazität des Flywheels. Zusätzlich wurden folgende Sonderfälle vermessen, um



Kennlinienfeld des Dieselmotors mit eingetragener Punkteschar für die während des Fahrzyklus durchlaufenen Betriebspunkte

Bild 1: Diagramm VKM für Flywheel mit 20 kW Leistung und 500 kJ Energieinhalt



Kennlinienfeld des Elektromotors mit eingetragener Punkteschar für die während des Fahrzyklus durchlaufenen Betriebspunkte

Bild 2: Diagramm Elektromotor für Flywheel mit 20 kW Leistung und 500 kJ Energieinhalt

Extremwerte der mechanischen Belastung zu ermitteln: Volllastbeschleunigung, Vollbremsung, Stationäre Kreisfahrt und Überfahren einer Bodenschwelle als Missbrauchsfall.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Gierrate, also Drehung um die z-Achse, die größte Drehrate ergibt. Somit ist eine Montage mit einer Kreiselachse senkrecht zur Fahrbahnebene sinnvoll. Bei der Dimensionierung der Lager ist ein wesentlicher Punkt die genaue Kenntnis der Lagerkräfte. Nachfolgend ein kurzer Überblick über den entwickelten Ansatz:

Bei der Betrachtung eines schnell drehenden Kreisels zur Speicherung von Bremsenergie und zur Rückspeisung der gespeicherten Energie im Fahrbetrieb von Fahrzeugen wurde für eine gegebene Geometrie eine Berechnung der wirkenden Kräfte und Momente durchgeführt. Dabei war die Antriebsstrategie des Fahrzeugs zweitrangig. Aus den Berechnungen sollte eine Abschätzung der Lebensdauer der Welle, Lager und Aufhängung des Kreisels abgeleitet werden. Zunächst wurde hierfür die Kinetik des Kreisels betrachtet. Dieser verfügt aufgrund seiner hohen Drehzahl und seiner Masse über einen Drehimpuls H , der eine Größe und Richtung im Raum hat. Grundsätzlich reagiert der Drehimpuls H auf eine erzwungene Änderung seiner Richtung ω mit einem Drehmoment M_k . Dieses Drehmoment M_k setzt sich zusammen aus der zeitlichen Änderung des Drehimpulses und der Winkeländerung der Drehimpulsrichtung:

$$\vec{M}_k = \frac{d\vec{H}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{H} \quad (1)$$

Die obige Gleichung gilt für ein körperfestes System. Da der Kreisel sich jedoch im Raum bewegen können muss, ist eine Transformation nötig. Diese stellt die Bewegung und die resultierenden Kräfte und Momente des Kreisels gegenüber einem bewegten Bezugssystem dar. Für die Transformation wurden die Kardangleichungen verwendet. Dadurch wird die Darstellung des Kreiselmoments M_k wesentlich komplizierter. Es können jedoch Vereinfachungen vorgenommen werden, die zu folgendem Ergebnis führen:

$$M_k = \omega * H \quad (2)$$

Die drei wesentlichen und für die betrachtete Anwendung zulässigen Vereinfachungen sind:

- Symmetrie des Kreisels bzgl. seiner Nebenachsen (Rotationssymmetrie)
- hohe Kreisdrehgeschwindigkeit im Verhältnis zu den Auslenkwinkelgeschwindigkeiten um die Nebenachsen
- kleine Auslenkwinkel

Dank dieser Vereinfachungen kann die Berechnung der Kreiselreaktionsmomente auf etwa 10% der ursprünglichen Berechnungszeit verkürzt werden. Der Qualitätsverlust der berechneten Kreiselmomente ist vernachlässigbar klein, denn es ergibt sich trotz Vereinfachung eine Übereinstimmung von über 97%. Diese Stufen der Vereinfachung konnten auf Grund der vielen aufgezeichneten Messdaten in allen Testfahrten verglichen werden.

Die Berechnungen der Kreiselkräfte wurden sowohl numerisch als auch analytisch überprüft und es wurden für einige Szenarien, einen gegebenen Fahrzyklus und geometrische Annahmen bezüglich des Kreisels und des Fahrzeugs Abschätzungen für die Lager- und Wellendimensionierung getroffen. Außerdem wurden Konzepte entwickelt, bei denen der Kreisel starr, gedämpft oder kardanisch gefedert am Fahrzeug angebracht ist.

Das Schwingen des Kreisels bei kardanisch gefederter Aufhängung wurde numerisch mit einem Runge-Kutta Verfahren für starre Differenzialgleichungssysteme berechnet. Es stellte sich heraus, dass mit einer elastischen Konstruktion zwischen Kreisel und Fahrzeug die im Betrieb auftretenden Kreismomente zielführend reduziert werden können. Aufgrund der durchgeführten Berechnungen ist es möglich, den Kreisel unter Annahme von geometrischen Voraussetzungen zu dimensionieren.

2.1.2 Evaluierung von Konstruktionsvarianten

2.1.2.1 Auswahl der elektrischen Maschine

Das Flywheel besteht im Wesentlichen aus elektrischer Maschine, Schwungmasse sowie einer Umhausung. Abhängig vom realisierten Konzept können einzelne Komponenten auch mehrere Funktionen gleichzeitig erfüllen. Um einen möglichst kompakten bzw. auch wartungsarmen Aufbau zu erreichen, werden im weiteren nur Varianten ohne Vakuumdurchführung betrachtet, d.h. die elektrische Maschine befindet sich gemeinsam mit der Schwungmasse im evakuierten Bereich. Für die elektrische Maschine hat man prinzipiell zwei Bauformen zur Auswahl - Innenläufer und Außenläufer. Bezogen auf die Bauform ergeben sich damit drei Kombinationen für das Gesamtsystem (Abbildung 1):

1. Innenläufer, wobei der Rotor gleichzeitig die Schwungmasse darstellt
2. Hybridläufer: Innenläufer mit zusätzlicher (externer) Schwungmasse
3. Außenläufer, wobei der Rotor gleichzeitig die Schwungmasse darstellt

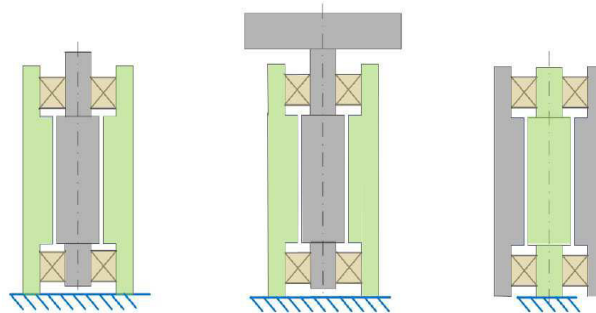


Bild 3: Innen-, Hybrid- und Außenläufer. (v.l.n.r)
Grau kennzeichnet den Rotor, grün den Stator und orange ist das Magnetlager

Um ein möglichst kompaktes und somit leichtes Design zu erreichen, ist es notwendig, eine elektrische Maschine mit möglichst hoher spezifischer Leistungsdichte zu verwenden. Wie aus der Maschinentheorie bekannt, ist das Drehmoment einer Maschine proportional dem Luftspaltvolumen (Esson'sche Leistungszahl):

$$M = C_{\text{esson}} \cdot V_{\text{luftspalt}} \quad (1)$$

Die Leistung der elektrischen Maschine ergibt sich aus Drehmoment und Drehzahl:

$$P = M \cdot \omega = C_{\text{esson}} \cdot V_{\text{luftspalt}} \cdot \omega \quad (2)$$

Hieraus folgt, dass die Drehzahl so hoch als möglich gewählt werden muss. Als limitierender Faktor ergibt sich aufgrund der Fliehkraftbelastung ein inversproportionaler Zusammenhang zwischen der Drehzahl und dem Rotorradius:

$$\omega = \frac{C_{\text{flieh}}}{r} \quad (3)$$

Zusammengefasst ergibt sich somit für die Leistungsdichte der elektrischen Maschine:

$$\frac{P}{V_{\text{Luftspalt}}} = \frac{C_{\text{esson}} \cdot C_{\text{flieh}}}{r} \quad (4)$$

Das heißt, ein schlankes längliches Design ermöglicht die höchste Leistungsdichte. Limitierender Faktor für die Reduzierung des Radius ist in diesem Zusammenhang die biegekritische Schwingung des Rotors. Anhand einer Literaturrecherche konnte die Auswahl für die benötigte schnelldrehende elektrische Maschine auf die folgenden vier Typen eingegrenzt werden:

- Asynchronmaschine (ASM) Dieser Maschinentyp wird im Bereich leistungsstarker hochdrehender Industrieanwendungen (Spindelantriebe und Turbokompressoren) eingesetzt. Die als Innenläufer konzipierten Maschinen werden aufgrund der hohen Fliehkraftbelastung im Rotor jedoch nicht mit einem klassischen Kurzschlusskäfig, sondern typischerweise als massiver Rotor mit an der Oberfläche aufgalvanisierter Kupferschicht ausgeführt. Diese Bauweise erlaubt Drehzahlen, die primär durch die mechanische Belastbarkeit des massiven Rotorkerns bestimmt wird.
- Permanentmagneterregte Synchronmaschine (PSM) Für den Einsatz als schnelldrehende Maschine werden Varianten mit Oberflächenmagneten und Bandage gewählt, da die Alternative mit vergrabenen Magneten die Rotorstruktur zu sehr schwächen würde und somit eine deutlich geringere Grenzdrehzahl aufweist.
- geschaltete Reluktanzmaschine (switched reluctance machine - SRM)
- synchrone Reluktanzmaschine (synRM) Um optimale elektromagnetische Eigenschaften zu erreichen, müsste ein ALA (axially laminated anisotropy) oder ein TLA (transversally laminated anisotropy) Rotor mit internen Flussführungen eingesetzt werden. Aufgrund der hohen mechanischen Anforderungen im Rotor könnte jedoch nur ein einfacher Reluktanzrotor (ähnlich dem der SRM) verwendet werden.

Die Wirkungsgrade sind für alle vier Maschinentypen im Rahmen der geforderten Leistung (20 kW) vergleichbar und liegen je nach Ladezustand und Leistung im Bereich von 90 % bis 98 %. Der Wirkungsgrad an sich kann damit nicht als Bewertungskriterium herangezogen werden. Entscheidend ist jedoch die Aufteilung der Verluste auf Stator und Rotor, da die Verluste im Rotor nur durch Strahlung abgeführt werden können, während eine Kühlung des Stators problemlos möglich ist. Zusätzlich entstehen bei der PSM im Leerlauf Ummagnetisierungsverluste im Stator, die zu einer erhöhten Selbstentladung des Flywheels führen.

Nachfolgend die Ergebnisse der detaillierten Untersuchung der Eigenschaften der vier Maschinentypen, bei Anwendung auf eine der drei Bauarten aus Abbildung 1:

Innenläufer: Da hierbei der Rotor gleichzeitig die komplette Schwungmasse darstellt, ist auf eine höchstmögliche Energiedichte im Rotor zu achten. Diese ergibt sich aus:

$$\frac{E}{V} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot r^2 \cdot V_{\text{Luftspalt}}^2 \quad (5)$$

Da die Dichte der verwendeten Materialien im Rotor für alle vier Maschinentypen in etwa gleich ist, kann die Energiedichte nur durch die maximal erreichbare Geschwindigkeit an der Rotoroberfläche $V_{\text{Luftspalt}}$ beeinflusst werden. Für die Berechnung dieser Geschwindigkeit kann die maximale Belastung im Rotor herangezogen werden, wenn er als äquivalenter Vollzylinder approximiert wird. Damit ergibt sich, ausgehend von

$$\sigma_{\text{max}} = c_1 \rho r^2 \omega^2 \quad (6)$$

für die maximale Umfangsgeschwindigkeit im Luftspalt:

$$v_{\text{Luftspalt}} = r \cdot \omega = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{max}}}{c_1 \rho}} \quad (7)$$

Für eine ASM mit einem Rotor aus hochfestem Werkzeugstahl ist $\sigma_{\text{maxASM}} = 800 \text{ N/mm}^2$ für die Dauerfestigkeit anzusetzen, damit ergibt sich $v_{\text{LuftspaltASM}} \approx 500 \text{ m/s}$ (durch FEM bestätigt). Für die SRM und synRM kann ein $\sigma_{\text{maxRM}} = 450 \text{ N/mm}^2$ als Dauerfestigkeit für ein hochfestes Elektroblech angesetzt werden. Mit der oben genannten Näherung würde sich $v_{\text{LuftspaltRM}} \approx 370 \text{ m/s}$ ergeben, eine Überprüfung mittels FEM (unter Berücksichtigung der Zähne am Rotorumfang und der notwendigen Bolzen zur mechanischen Stabilisierung) hat dieses Ergebnis bestätigt. Da die PSM nicht als äquivalenter Vollzylinder dargestellt werden kann (aufgrund des mehrschichtigen Aufbaus aus Elektroblech, Oberflächenmagneten und Bandage mit dazwischenliegenden Pressverbänden), darf die oben gezeigte Berechnung auch nicht für eine erste Abschätzung angewendet werden. Damit können nur mehr die Ergebnisse der FEM Berechnung für die weitere Analyse verwendet werden. Diese liegen bei maximal 250 m/s. Damit kann man nun eine Reihung der elektrischen Maschinen vornehmen. Da die Energiedichte proportional dem Quadrat der Geschwindigkeitswerte ist, ergibt sich folgendes Verhältnis

$$\text{ASM: SRM: synRM: PSM} = 100\% : 55\% : 25\% \quad (8)$$

bzw. unter Berücksichtigung des gewünschten Energieinhalts von 250 kJ (nutzbar) kann das Rotorgewicht abgeschätzt werden:

$$m_{\text{ASM}} \approx 5 \text{ kg} ; m_{\text{RM}} \approx 9 \text{ kg} ; m_{\text{PSM}} \approx 20 \text{ kg} \quad (9)$$

Die geforderte Leistung kann für alle vier Maschinenvarianten dargestellt werden, stellt also kein Auswahlkriterium dar.

Ein Problem der ASM mit massivem Rotor ist das Verhalten bei Rotorbruch – ein massives Stahlschwungrad zerbricht typischerweise in zwei bis drei große Teile. Da der Energiegehalt dieser Einzelteile entsprechend groß ist, reicht möglicherweise die Schutzwirkung des Stators alleine nicht mehr aus – eine detailliertere Berechnung hierzu wurde aber nicht durchgeführt, da durch die drei anderen Maschinentypen Alternativen vorliegen, die dieses Problem nicht aufweisen.

Von den drei verbliebenen Maschinenvarianten ist die PSM aufgrund des hohen Rotorgewichts und der Ummagnetisierungsverluste im Leerlauf auszuschließen – es verbleiben damit die beiden Reluktanzmaschinen. Im direkten Vergleich hat die SRM etwas höhere Rotorverluste, baut dafür aber aufgrund der kleinen Wickelköpfe deutlich kompakter als die synchronen RM. Speziell im Hinblick auf die „lagerlose“ Maschine, bei der zwei (halb so lange) Maschinen hintereinander angeordnet sind, um damit gleichzeitig die Magnet-Lagerung des Rotors übernehmen zu können, ist der benötigte Bauraum der Wickelköpfe wesentlich – was zur Entscheidung für die SRM in diesem Anwendungsfall führt.

Hybridläufer: Im Gegensatz zum Innenläufer muss hierbei die elektrische Maschine nur so groß dimensioniert werden, dass sie die geforderte Leistung darstellen kann, sie wird damit deutlich kleiner. Der dann noch fehlende Energieinhalt wird durch eine zusätzliche Schwungmasse abgebildet. Da der Hybridläufer weiterhin einen Innenläufer als elektrische Maschine besitzt, gelten die entsprechenden Ausschlusskriterien für ASM und PSM. Für die beiden verbleibenden Maschinentypen SRM und synchronen RM zeigen die Berechnungsergebnisse, dass dieselben Schlussfolgerungen wie beim Innenläufer zur Wahl des Maschinentyps herangezogen werden können.

Außenläufer: Wie beim Hybridläufer muss auch hier die elektrische Maschine so dimensioniert werden, dass sie die geforderte Leistung darstellen kann. Der dann noch fehlende Energieinhalt wird durch „Erweiterung“ des Rotors zu einem größeren Durchmesser abgebildet. Aus Festigkeits- und Sicherheitsgründen ist hierfür ein Faserverbundwerkstoff als Material zu wählen. Dieser limitiert jedoch die maximale Temperatur im Rotor auf ca. 150 °C. Es kann also nur ein Maschinentyp mit sehr geringen Rotorverlusten verwendet werden. Da die PSM wiederum aufgrund der Leerlaufverluste nicht eingesetzt werden kann, verbleibt somit nur mehr die synchrone RM als mögliche Alternative.

Basierend auf den Simulations- und Messdaten wurden mehrere Flywheel Konzepte abgeschätzt und miteinander verglichen.

2.1.2.2 Festlegung des Maschinentypes

	Innenläufer	Außenläufer	Glockenläufer	
Motor Luftspaltdurchmesser	100	70	50	mm
Motor aktive Länge	200	70	50	mm
Schutzmantelmaße	150 x 250	150 x 230	180 x 140	mm
Schutzmantelgewicht	0	7	5	kg
Außenabmessung	150 x 250	150 x 230	100 x 100	mm
Drehzahlbereich	24.000–70.000	13.000–40.000	26.000–78.000	U/min
Gesamtgewicht	25	18	13	kg

Tabelle 1: Grundlegende Eigenschaften von Innen-, Außen- und Glockenläufer

Nach einer umfassenden Diskussion der Vor- und Nachteile der drei vorgeschlagenen Konzepte wurde vom Projektteam die Innenläufer Variante festgelegt. Ausschlaggebend war vor allem die einfache und günstige Herstellbarkeit. Die Tatsache, dass bei diesem Konzept keine Verbundwerkstoffe benutzt werden, wird ebenfalls als Vorteil gesehen. Die Kohlefaser besitzt über die Temperatur stark variable Eigenschaften. Diese wären nur durch aufwändige Crashversuche zu beschreiben. Zusätzlich bietet das Innenläuferkonzept den Vorteil, dass der Stator bereits als Schutzmantel verwendet werden kann. Der für den weiteren Projektverlauf zu untersuchende Speicher ist somit ein Innenläufer mit einem Energieinhalt von 250 kJ und einer Leistungsfähigkeit von 20 kW. Daraus ergibt sich eine erste Abschätzung des Rotordurchmessers von etwa 100 mm und dessen Masse mit etwa 10 kg, die für die Lagerauslegung entscheidend sind.

2.1.2.3 Montage des Power KERS Flywheel

Ziel der Untersuchung ist es, eine Lagerung zu finden, die die Belastung der Kreiselager reduziert. Da die Belastung durch Linearbeschleunigung und Drehraten verursacht wird, sollen diese mechanisch mittels preiswerter elastischer Aufhängung gefiltert werden.

Bei den Untersuchungen wurde vorausgesetzt, dass zwei gegenläufig drehende Kreisel verbaut werden. Die durch den Kreisel entstehenden Kräfte sind in diesem Fall innere Kräfte im Gehäuse (in Bild 4 blau-silber dargestellt). Auf diese Weise kann die Aufhängung relativ weich gestaltet werden.

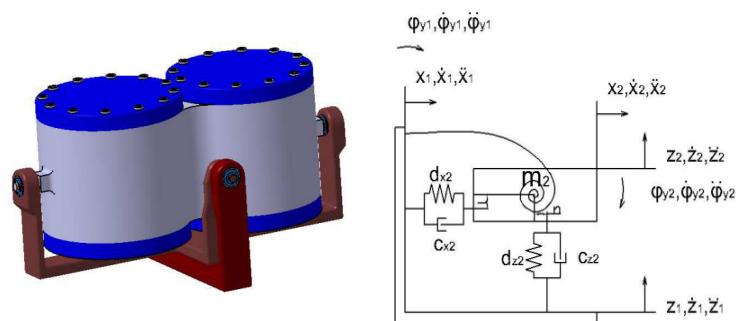


Bild 4: Aufhängung und zugehöriges Modell

Berechnung der Filtereigenschaft

Linearität vorausgesetzt kann das System in zwei ebene Teilsysteme gesplittet und die Übertragung der Bewegung getrennt berechnet werden. Die Ebenen sind in Fahrzeugkoordinaten nach DIN 70000:

- XZ-Ebene ... Längs- und Vertikalbeschleunigung, Nickbewegung
- YZ-Ebene ... Quer- und Vertikalbeschleunigung, Rollbewegung.

Die XY-Ebene mit der zugehörigen Gierbewegung wurde nicht betrachtet, da bereits aus dem Lastenheft bekannt ist, dass die Gierrate deutlich größer ist als die Nick- und Rollrate. Daher wurde eine Einbaulage des KERS mit Drehachse in Z, also vertikal, angenommen. Ein Simulink-Modell wird mit den aus dem Lastenheft bestimmten Bewegungsgrößen beaufschlagt und berechnet die Beschleunigungen und Drehraten des jeweils ebenen Systems. Unter der Annahme der Baugröße wird der nötige Freiraum zur Bewegung des KERS gegenüber dem Chassis bestimmt. Dieser Freiraum wurde in den nachfolgenden Untersuchungen mit 20 mm begrenzt angenommen.

Lösungsansatz a: Es wurde eine kardanische Aufhängung mit Gummiblöcken angedacht. Gummiblöcke sind preiswert, spiel- und verschleißfrei und weisen eine Materialdämpfung auf (Bild 5). Die Gummiblöcke wurden als linearelastische Federelemente mit einem Lehr'schen Dämpfungsmaß von 0.05 modelliert.

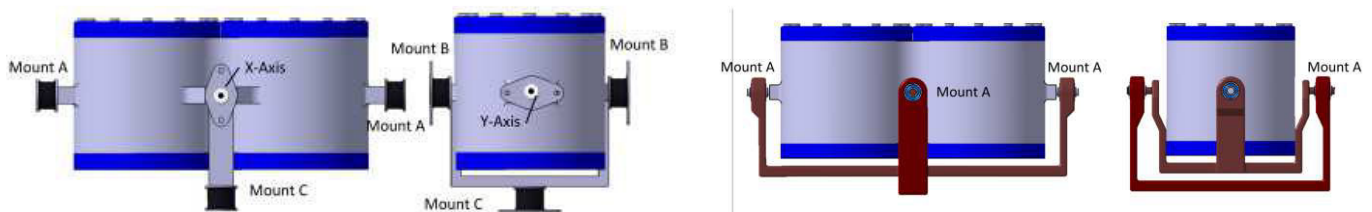


Bild 5: Links: (a) Elastische Lagerung zur Filterung der Linearbeschleunigungen und der Drehraten, rechts: (b) Kardanische Lagerung mit Gummibuchsen

Ergebnis der Lösung a: Unter der Randbedingung eines Freiraumes zur Karosserie von 20 mm kann keine geeignete Steifigkeit der Gummielemente gefunden werden, bei der die Amplitude der Linearbeschleunigung nicht steigt, d.h. statt einer Verringerung wurde eine Erhöhung der Lagerkräfte erreicht. Die Resonanzfrequenzen liegen in einem niedrigen Frequenzbereich, in dem die Anregung sehr hoch ist. Die Dämpfung ist materialbedingt zu gering, um eine Resonanzüberhöhung zu verhindern. Von Hydrolagern und separaten Dämpfern wurde aus Kostengründen und mangels Verfügbarkeit Abstand genommen.

Lösungsansatz b: Um die lineare Eigenfrequenz so hoch zu legen, dass sie in einen Bereich fällt, der gering angeregt wird, wurden Gummibuchsen verwendet. Diese weisen hohe Radialsteifigkeit und geringe Drehsteifigkeit auf. Die Gummibuchsen wurden so angeordnet, dass der Kreisel im Schwerpunkt kardanisch aufgehängt ist (Bild 5 links).

Ergebnis Lösung b: Mittels kardanischer Lagerung mit Gummibuchsen kann eine effektive Reduktion der Spitzenkräfte erzielt werden. Die maximale Linearbeschleunigung wird nicht erhöht. Die Spitzenwerte der Drehrate und damit die Kreiselkräfte reduzieren sich um bis zu 50 %.

Im letzten Projektjahr wurde die Frage untersucht: Wie wirkt sich ein einzelner Kreisel mit den gyroskopischen Momenten auf das Fahrzeugverhalten aus. Simulationen mit Hilfe des Fahrdynamikprogrammes veDYNA (Tesis GmbH) und einem konventionellen PKW- Modell zeigten, dass die Momente, die durch die Kreiseskräfte auf das Fahrzeug wirken, keinen nennenswerten, negativen Einfluss auf das Fahrverhalten haben. Die Herleitung der Kreiselkräfte sowie deren Auswertung wird in den beiden Veröffentlichungen [13] und [14] dargestellt und verwertet.

2.1.3 Sicherheitskonzepte

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der Unfallsicherheit von Schwungradspeichern in PKWs. Ziel war es die Randbedingungen für die Konstruktion eines Flywheels festzulegen und zu klären welche Lasten im Betrieb und im Crash entstehen. Im ersten Teil wurden grundsätzliche Untersuchungen (Untersuchung der Einbausituation und Berechnung von Crashlastfällen) zur Unfallsicherheit durchgeführt. Im zweiten Teil wurden FEM-Simulationen des Flywheel-Speichers, basierend auf der gewählten Geometrie und den verwendeten Materialien, erstellt. Die Analyse des Einbaubereichs hat ergeben, dass sich das Flywheel bevorzugt zentral im Fahrzeugheck über der Hinterachse, im Bereich des Kofferraumes oder entlang der Mittelkonsole befindet.

2.1.3.1 Berechnung der Crashlastfälle

Um Aussagen über das Verhalten im Crashlastfall treffen zu können, wurde ein FE-Modell des Ford Taurus, welches für den Lastfall USNCAP validiert ist, verwendet. Dieses FE-Modell besteht aus ca. 905.000 Elementen und wurde vom National Crash Analysis Center (NCAC) frei zur Verfügung gestellt. Um die Beschleunigungssignale zu generieren, sind für folgende Lastfälle Berechnungsmodelle aufgebaut, berechnet und die Ergebnisse analysiert worden: Versicherungstest „AZT“, Versicherungstest „IIHS“, Versicherungstest „Federally Mandated Bumper Test“, Verbraucherschutztest „USNCAP“ und der Verbraucherschutztest „EuroNCAP“. Bei dem „AZT“-Test bewegt sich das Fahrzeug mit 15 km/h gegen eine starre Barriere. Bild 6 zeigt das Beschleunigungssignal in allen drei Achsen. Das Beschleunigungssignal zeigt Spitzen von bis zu 11 g in x-Richtung, 4 g in y-Richtung und 4 g in z-Richtung. Der „IIHS“ besteht aus zwei Wandauffahrten (Vorne und Hinten) und mehreren Pendeltests auf die vordere und hintere Stoßstange.

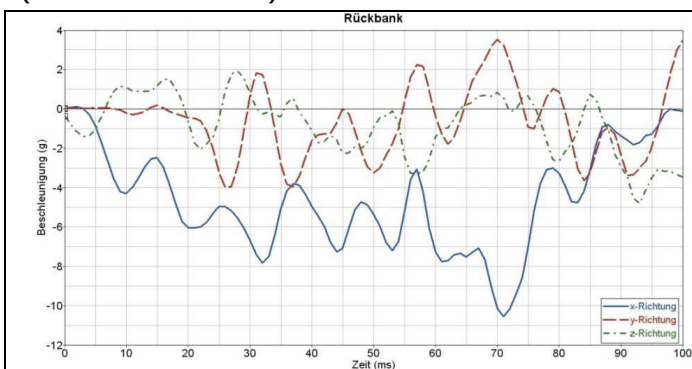


Bild 6: Beschleunigungssignal der Rücksitzbank für den Lastfall „AZT-Test“
Filter: CFC 180 J211

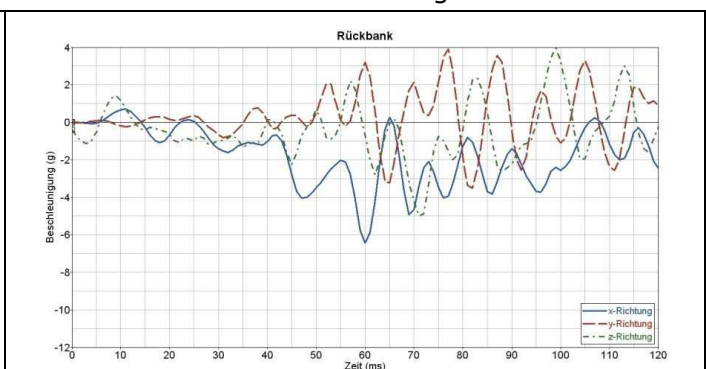


Bild 7: Beschleunigungssignal Position Rücksitzbank für den Lastfall IIHS 20 Zoll Pendel Tests, Filter: CFC 180 J211

Das Beschleunigungssignal in Bild 7 zeigt Beschleunigungsspitzen von bis zu 7 g in x-Richtung und 5 g in y- sowie z-Richtung. Des Weiteren wurden auch Verbraucherschutztests untersucht. Beim Frontcrash des Verbraucherschutztest „USNCAP“ wird das Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 56 km/h gegen eine starre Barriere bewegt.

Fazit ist, dass die Beschleunigungssignale bei Versicherungstests Spitzen von bis zu maximal 10 g aufweisen. Diese Kräfte sollte das Magnetlager aufbringen können, damit es zu keinen zusätzlichen Reparaturkosten bei kleinen Blechschäden und damit zu keiner höheren Versicherungseinstufung des gesamten Fahrzeugs kommt. Die Spitzenbeschleunigungen von 50-70 g bei den Frontcrash Lastfällen wurden in einer FE Simulation noch weiter untersucht. Das Ergebnis ist, dass es zu einer

Zerstörung des Flywheel kommt. Da ein Frontcrash einen wirtschaftlichen Totalausfall darstellt, spielt dies aber nur eine untergeordnete Rolle.

2.1.3.2 Konzeptentscheidungen

Es wurde bewusst ein Innenläuferkonzept verwendet, so dass der Stator der Elektromaschine gleichzeitig als Berstschutz dienen kann. Die Dimensionierung des Stators wurde so gewählt, dass neben den elektromagnetischen Anforderungen auch genügend mechanische Reserven vorhanden sind, um ein Austreten von Fragmenten durch den Stator verhindern zu können.

Ein weiteres konstruktives Merkmal besteht darin, dass der Rotor in der Nähe seiner Rotationsachse keine Bohrungen aufweist. Auf diese Weise ist es möglich, die Spannung während einer Belastungssituation zu halbieren. Der Rotor ist geblecht auszuführen. Die einzelnen Bleche sollten axial gestapelt und miteinander verklebt werden. Danach werden sie zusätzlich noch mit Schrauben verspannt. Die Durchgangslöcher für die Schrauben sind nicht in der Nähe der Rotationsachse anzubringen, um keine ungünstige Spannungssituation zu provozieren.

Das System wurde so dimensioniert, dass die maximal zulässigen Spannungen erst beim Erreichen einer Überdrehzahl von Faktor 1,7 auftreten. Sollte es während des Betriebs zu einer Materialermüdung kommt, dann würden sich an den hoch belasteten Stellen (Zähne) Risse bilden. Das Risswachstum würde daraufhin zum Bruch des Blechs führen. Das Bruchbild würde jedoch nicht so aussehen wie das eines soliden Rotors, welcher typischerweise in zwei bis fünf solide Segmente mit hoher translatorischer kinetischer Energie zerbrechen würde. Es bilden sich, da jedes Blech für sich einen Körper darstellt, viele kleine und leichte Fragmente. Dieser Ansatz wurde durch Simulationen bestätigt. Da in diesem Projekt kein Rotorprototyp vorgesehen war, konnte dieses Verhalten nicht mittels Prüfstandversuchen verifiziert werden.

Die kinetische Energie von Rotorfragmenten ist überwiegend rotatorisch, wenn es kleine Bruchstücke sind. Demzufolge haben diese leichten Fragmente wenig kinetische Energie und diese ist überwiegend rotatorisch. Dadurch wird der Stator beim Kontakt mit diesen Bruchstücken weniger stark belastet als beim Versagen eines soliden Rotors, was eine geminderte Gefahr darstellt. Praktisch wurde dieses Fehlverhalten beim Schwungradspeicher „Dynastore“ des Unternehmens *Compact Dynamics GmbH* nachgewiesen. In Bild 8 (rechts) sind die einzelnen Fragmente eines zerbrochenen, geblechten Rotors dargestellt. Es waren nach einem Versagen viele kleine Fragmente vorhanden, die nicht aus dem Gehäuse entweichen konnten.

2.1.3.3 FE Simulation Lagerdefekt

Anhand einer FE Simulation wurde das aktuelle Design hinsichtlich eines Lagerbruchs untersucht. Im ersten Schritt wurde abgeschätzt, welche Lasten (Kräfte und Momente) im Falle eines Crashes auf die Lagerung wirken. Um die Einflussfaktoren, welche aufgrund der komplexen Modellierung entstehen, zu minimieren, wurde das System vereinfacht: Der Rotor wurde als starrer Zylinder, welcher mit der Karosserie über ein Rotationslager verbunden ist, modelliert. Für die Validierung wurden Rotationen um mehrere Achsen aufgebracht und mit der Theorie verglichen.

Als Lastfall fiel die Entscheidung auf den Frontcrash von EuroNCAP. Dieser Lastfall bewirkt Beschleunigungen in alle Richtungen bzw. um alle drei Raumachsen, weil das Fahrzeug mit einer Überdeckung von 40% gegen eine deformierbare Barriere fährt.

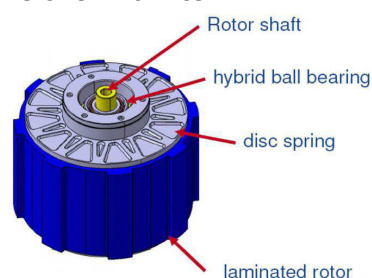


Bild 8: Reste nach dem Bruch eines Innenläufer-Rotor aus laminierten Eisenblech (Dynastore)

Der Crashpuls eines Mittelklassefahrzeuges wurde am Schwerpunkt des Fahrzeuges aufgebracht, das „PowerKERS-System“ im Rückbankbereich positioniert und die Kräfte und Momente am Lagersitz berechnet. Dieser Lastfall führte zu einer maximalen Kraft von 6 kN und einem maximalen Moment von 300 Nm.

2.1.4 Magnetlager: Auslegung, Simulation, Betriebssicherheit

2.1.4.1 Berührungslose Messtechnik

Kontaktlose und hochpräzise Abstandsmessungen im Sub-Mikrometer-Bereich mit zusätzlichen hohen Anforderungen an die Dynamik (1-10 kHz) sind sehr teuer und mit aufwändiger Elektronik ausgestattet, welche zu viel Bauraum beansprucht. Es musste also eine Lösung gefunden werden, die kaum Bauraum beansprucht, sehr leicht ist, und geringe Kosten verursacht. Die Entscheidung fiel auf induktive Messaufnehmer, die im Prinzip einen bewickelten Ferritkern darstellen und auf ferromagnetische sowie nicht-ferromagnetische jedoch elektrisch leitende Objekte messen können. Die Entwicklungsarbeit und Evaluierung von Geometrien und der jeweiligen Genauigkeit und Wiederholbarkeit, sowie des Temperatureinflusses der berührungslosen Abstandsmessung wurde in den Publikationen [2], [5] und [6] veröffentlicht.

Im automobilen Einsatz (PowerKERS Flywheel) ist der Bedarf an elektrischer Leistung im Vergleich zur enthaltenen Energiemenge größer als bei dem stationären Flywheels. Zusätzlich ergeben sich hohe Belastungen beim PowerKERS Flywheel durch Kreiselreaktionsmomente auf Grund von Fahrzeugverkipfung und Lagerkräfte durch lineare Fahrzeugbewegung. In Kombination mit dem geringen Gewicht des PowerKERS Flywheels sind die auftretenden Lagerkräfte jedoch in der gleichen Größenordnung wie bei stationären Flywheels bei Störungen durch ein Erdbeben. Es werden also Magnetlager von mindestens derselben Größenordnung benötigt.

Im Verlauf des Projektes wurden die Magnetlager für die ermittelten Lastfälle im Betrieb sowie auch in Sicherheitsfällen ausgelegt und optimiert. Es sind prinzipiell 2 Varianten möglich. Zum einen ein Flywheel mit einer elektrischen Maschine mit externem Magnetlager und zum anderen eine elektrische Maschine mit integriertem Magnetlager. Für beide Varianten wurden Simulationen durchgeführt sowie die Verluste bei der Variante elektrische Maschine mit integriertem Magnetlager berechnet und Publiziert.

Eine adaptive Regelstruktur der Zwischenkreisspannung und Variation der Schaltfrequenz die sowohl die Effizienz erhöht und die Selbstentladungsrate verringert, ist für das PowerKERS Projekt nicht anwendbar. Dies liegt daran, dass die Zwischenkreisspannung im Fahrzeug nicht frei gewählt werden kann, da diese möglicherweise durch einen sekundären Energiespeicher wie Lithium-Ionen Batterien gestützt und somit vorgegeben wird. Ein weiterer Unterschied zum stationären Einsatz sind die durch Fahrmanöver auf das Flywheel bzw. auf die Magnetlagerung einwirkenden Kräfte. Eine Abschätzung der benötigten Energie für den Betrieb des Magnetlagers hat ergeben, dass der Einfluss auf die kurzfristige Selbstentladungsrate nur eine untergeordnete Rolle spielt. Für einen längeren Fahrzeugstillstand kann die verbleibende Rotationsenergie in einen sekundären Energiespeicher mit sehr geringer Entladungsrate abgegeben werden.

2.1.4.2 Auslegung und Optimierung der Magnetlager - Variante elektrische Maschine und Magnetlager getrennt

Aus den Messdaten des Lastenheftes wurde die für das Flywheel größte Belastung herausgefiltert. Es handelt sich um das Überfahren einer Bodenschwelle mit 50 km/h mit einem Smart. Es ergibt sich

dabei ein maximales Kreiselreaktionsmoment von ca. 60 Nm, bzw. umgerechnet auf die Lagerreaktionskräfte Werte in der Größenordnung von 600 N.

Weitere Belastungen, die im Fahrbetrieb auftreten können und die das Magnetlager abdecken sollte, sind ein kleiner Blechschaden ohne strukturelle Schäden am Fahrzeug selbst, sowie Parkschäden. Dazu wurden die auftretenden Kräfte anhand von simulierten Beschleunigungsdaten ermittelt. Die Berechnung zeigt, dass hierbei die auftretenden Kräfte in derselben Größenordnung liegen wie bei der Smart Schwellenfahrt. Ein Crash mit 15 km/h würde jedoch radiale Kräfte in der Größenordnung von 2 kN erzeugen. Um solche Lastfälle noch abdecken zu können, würden sich die Kosten und das Gewicht vervielfachen. Es ist daher sinnvoller derart seltene Ereignisse nur mittels eines Notlaufagers abzufangen.

Für die gewünschte maximale Kraft wurden nun die radialen und axialen Magnetlager für verschiedene Flussdichten durchgerechnet, um ein Optimum in Bezug auf Gewicht und Kosten in Abhängigkeit der Flussdichte und des verwendeten Blech-Materials zu finden.

Bild 9 zeigt beispielhaft den Verlauf der Optimierung der Geometrie des Magnetlagers hinsichtlich gewünschter Flussdichte und damit der Hubkraft. Besonderes Augenmerk wurde dabei darauf gelegt auch eine Lösung für Realisierungen mit preisgünstigem Transformatorblech zu finden.

Das Ergebnis der durchgeführten Parameterstudie zeigt, dass ein Standard Transformator Blech optimal im Magnetlager mit einer mittleren magnetischen Flussdichte von 2 T eingesetzt werden kann. Darüber hinaus ist dieses Blech im Vergleich zu Blechen mit höherer Sättigungsflussdichte (z.B. Vacoflux und Vacodur der Firma VAC) wesentlich kostengünstiger und hat deutlich geringe Verluste. Andererseits könnte mit diesen speziellen Blechen eine um ca. 10 % höhere Flussdichte verwendet werden, was zu einer Gewichtsreduktion von ca. 20 % führt. Die Arbeit dazu ist in der Publikation [7] veröffentlicht.

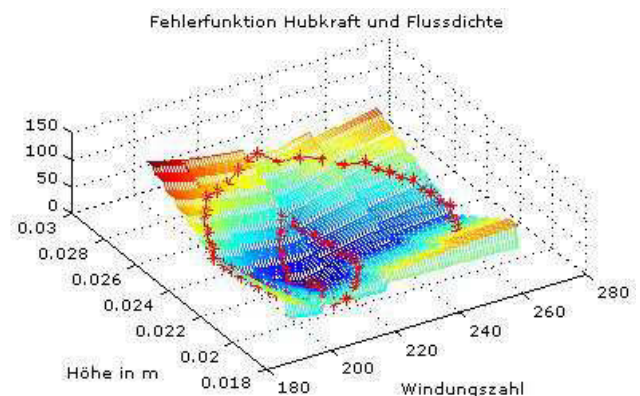


Bild 9: Verlauf der Optimierungsschritte des magnetischen Radiallagers über die globale Fehlerfunktion

2.1.4.3 Auslegung und Optimierung der Magnetlager: (Variante elektrische Maschine und Magnetlager vereint):

Dieses Gebiet überschneidet sich mit bereits geleisteten Forschungsarbeiten von anderen Universitäten. Um einen Neuheitsgrad unserer Arbeit darzustellen haben wir unseren Fokus auf die Verluste und möglichen maximalen radialen Kräfte der elektrischen Maschine mit integriertem Magnetlager gelegt. Um ein möglichst kostengünstiges und mechanisch sowie elektrisch einfaches System zu designen, sind die konventionellen mechanischen Lager unumgänglich. Unser Fokus lag daher, in der letzten Phase des Projektes, in der Lebenszeitverlängerung von mechanischen Lagern. Da eine reine Magnetlagerung zusätzliche Notlaufager benötigt, ist ein Kugellager mit weichem Lagersitz in Kombination mit einem kleineren und damit günstigeren Magnetlager mit demselben Aufwand verbunden. Damit kann das Lastkollektiv der mechanischen Lager verringert und die Lebenszeit der Kugellager substanziell erhöht werden.

2.1.5 Leistungselektronik für elektrische Maschine und Regelung Magnetlager

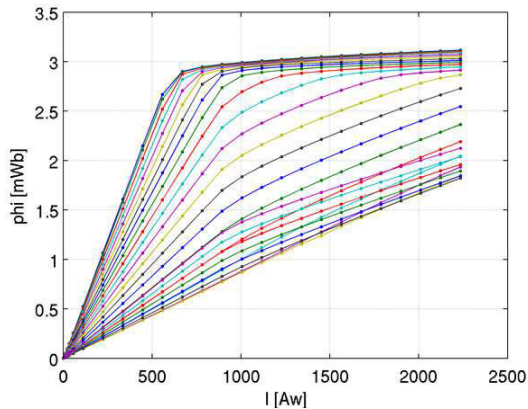


Bild 10: Kennfeld des magnetischen Flusses über den Phasenstrom bei verschiedene Rotorwinkeln (Kurvenschaar)

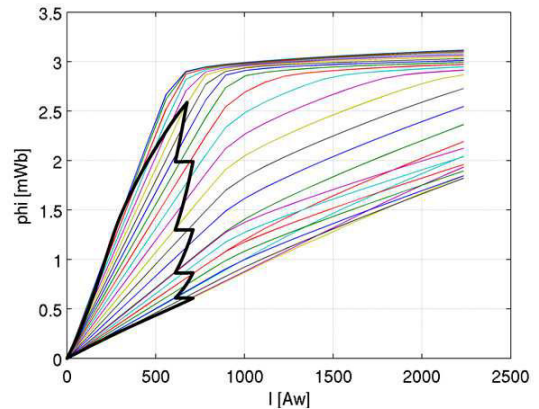


Bild 11: Verlauf des magnetischen Flusses im Kennfeld während der drehmomentbildenden Bestromung einer Phase

Durch die FEM Simulationen der elektrischen Maschine wurde ein Kennfeld des magnetischen Flusses in Abhängigkeit des Phasenstroms und der Rotorposition berechnet. Dafür war auch die Bestimmung der magnetischen Eigenschaften der hochfesten weichmagnetischen Kobalt-Bleche erforderlich, da nicht alle relevanten Daten vom Hersteller zur Verfügung stehen. Diese Arbeit wurde in der Publikation [9] veröffentlicht. Mit Hilfe dieses Kennfeldes lassen sich nun im Zeitbereich die Zündwinkel, die Wicklungszahl, die Regelfrequenz sowie weitere Parameter optimieren.

In diesem Arbeitspaket wurden diese Daten zur Parametrierung eines SRM-Modells verwendet. Dadurch ist es möglich den exakten Verlauf des Stromes und damit des magnetischen Flusses in der Maschine in Abhängigkeit der Schalterstellungen im Umrichter über die Zeit zu berechnen. Hieraus lässt sich dann der Drehmomentverlauf für die einzelnen Phasen und damit für die komplette Maschine berechnen. Dadurch ergibt sich dann die Leistung. Aufgrund der Randbedingungen aus dem festgelegten Lastenheft wurden die Anzahl der Wicklungen und die Regelfrequenz des Umrichters optimiert. Die Randbedingungen sind: Bordnetzspannung im Bereich 300 – 400 V, Drehzahl im Bereich 20.000 – 60.000 U/min (Flywheel leer bis voll) und eine maximale Leistung von 20 kW (über den gesamten Drehzahl- und Spannungsbereich). Mit Hilfe der Simulation im Zeitbereich kann nun der Einfluss der Windungszahl und des Ansteuermusters untersucht werden. Die Ergebnisse der durchgeführten Parameterstudie sind in Bild 13 dargestellt. In der Tabelle ist dies bis zu einer Windungszahl von 6 Windungen gezeigt, da ab einer Windungszahl von 7 die geforderte Leistung von 20 kW nicht mehr in allen Betriebspunkten erreicht werden kann.

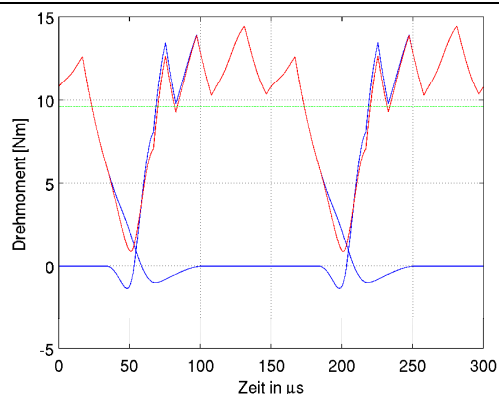


Bild 12: Drehmomentverlauf aus der Simulation im Zeitbereich. Das Drehmoment eines Phasenpaares ist in blau gezeigt, das Summendrehmoment rot und der Mittelwert des Drehmoments in grün

U_DC V	n U/min	Windungen	I_max A	f kHz
400	20.000	4	179	21,3
	40.000	5	142	16
	60.000	6	121	13,3
300	20.000	4	174	18,7
	20.000	5	141	13,3
	20.000	6	117	8
	40.000	4	133	16
	40.000	5	111	10,7
	40.000	6	90*	5,3
	60.000	4	111	16
	60.000	5	90*	8
	60.000	6	88*	8

Bild 13: Parameterstudie für die Auslegung der Maschine und Anpassung der Leistungselektronik

Prinzipiell sollte, der Spitzenstrom im Umrichter als auch die Schaltfrequenz so gering als möglich sein, da dies viele Vorteile bringt (kostengünstigere IGBTs, geringere Schalt- und Zuleitungsverluste, kleinere Zwischenkreiskondensatoren, usw.), d.h. eine Windungszahl von 6 sollte gewählt werden. Demgegenüber steht aber die Forderung, die Stromform beeinflussen zu können (z.B. zur Reduktion der Geräuschentwicklung), dies ist aber in den mit „*“ gekennzeichneten Betriebspunkten nicht mehr möglich, da der Umrichter im sogenannten Blockmode betrieben werden muss. Erst durch eine entsprechende Gesamtbetrachtung inklusive der Ergebnisse aus der Diplomarbeit zur Geräuschreduktion kann daher eine tatsächlich sinnvolle Windungszahl ermittelt werden.

Untersuchungen der Konstruktionsvarianten haben ergeben, dass ein Reluktanzmotor eine ideale Plattform für die Integration eines Magnetlagers darstellt. Um möglichst schnell die Arbeiten im Bereich Leistungselektronik, Modellbildung und Regelung starten zu können, wurde entschieden, einen kleinen Reluktanzmotor (2 kW Nennleistung) zu kaufen. Dieser entspricht zwar nicht den technischen Anforderungen aus dem Lastenheft, ermöglicht jedoch erste grundsätzliche Untersuchungen des Gesamtkonzepts (Motor, Umrichter, Magnetlager). Passend zu diesem Motor wurde ein Umrichter konstruiert. Im Vergleich zu handelsüblichen Umrichtern unterscheidet sich das aufgebaute System in folgenden wesentlichen Punkten:

- Die Schaltfrequenz für die Stromregelung ist >100 kHz. (Marktüblich <20 kHz)
- Es können 5 Phasen frei programmiert werden (übliche Motoren benötigen nur drei Phasen: Stichwort Drehfeldmotor)
- Der Umrichter kann von einem dSPACE System¹ aus gesteuert werden. Dadurch können sehr einfach und zeitnahe unterschiedliche Regler-Algorithmen bzw. Strategien realisiert werden.
- Es werden alle relevanten Signalgrößen (Temperatur, Ströme, Spannungen) aufgezeichnet und können somit für die Parameteridentifikation verwendet werden.

Aufgrund der geringen Spannungslage des 2 kW Motors war es möglich, den Umrichter mit MOSFETs anstelle von IGBTs zu konstruieren. Dadurch ergeben sich die hohen möglichen Schaltfrequenzen. Dies ermöglicht eine genaue Studie von unterschiedlichen Ansteuerkonzepten, da jede beliebige

¹dSPACE System: Rapid Prototyping System

Ansteuersignalform eingestellt werden kann. Ebenfalls kann der Einfluss unterschiedlicher Ansteuersignale auf das Geräuschverhalten *noise vibration harshness* (NVH) des Motors untersucht werden.

2.1.5.1 Geräuschreduktion durch alternative Ansteuerstrategien

Bedingt durch den mechanischen Aufbau der SR Maschine entstehen im Betrieb hohe Geräusche, da der Stator sowie Rotor bei der Ausbildung von Drehmomenten mehrfach pro Umdrehung durch die magnetische Wechselwirkung mechanisch angeregt werden. Weitere Ursachen für Störgeräusche sind:

- mechanisch: Rollgeräusche der mechanischen Lager, statische sowie dynamische Unwucht
- elektromagnetisch: Wirbelströme durch Stromänderung, Magnetostraktion der Rotor- und Statorbleche, Schwingen der Wicklungen
- Aerodynamisch: Luftverwirbelung durch den Rotors

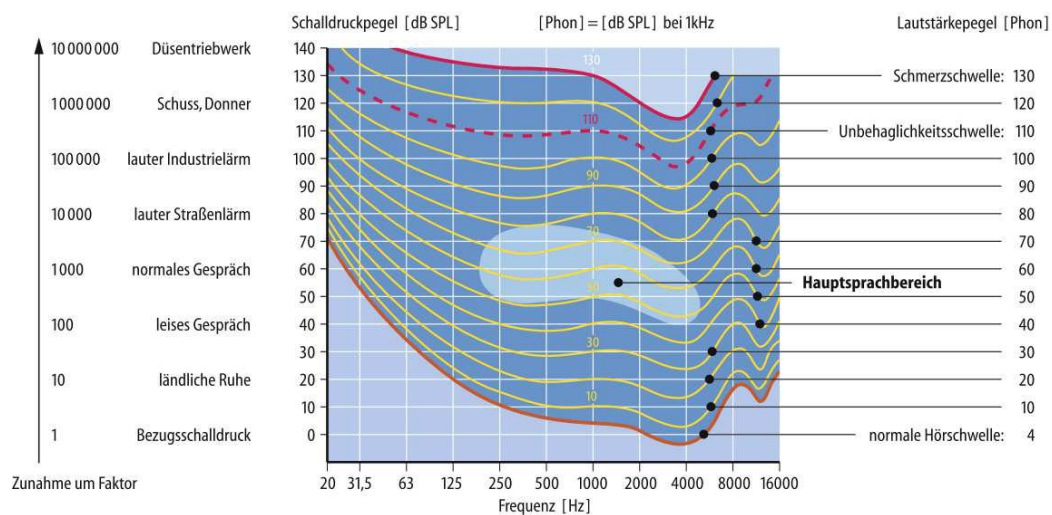


Bild 14: Hörfläche des Menschen

Wenn man einen Blick auf die Hörfläche des Menschen in Bild 14 wirft, sieht man sofort, dass nicht alle Frequenzen gleich laut wahrgenommen werden. Somit ist es sinnvoll, die dominanten Frequenzen im Band von 125-6000 Hz zu schwächen.

Bei diesem Teil des Arbeitspaketes wurde die Geräuschreduktion mit Hilfe unterschiedlicher Ansteuermuster der Leistungselektronik untersucht. Die Variante 1 lässt sich am besten als *active vibration cancellation* (AVC) beschreiben. Hier wird der Geräuschanteil an induzierten Wirbelströmen reduziert. Die Wirbelströme entstehen bei Stromänderungen. Da man auf Grund der notwendigen Schaltverstärker hohe Stromänderungen im System hat, ist das die erste Angriffsfläche. Hier wird vor jeder großen Stromänderung ein kleiner negativer Spannungspuls an die Phase angelegt. Die mechanische Schwingung durch den kurzen Puls überlagert sich dann mit der Schwingung der eigentlich gewollten Stromänderung. Durch diesen zusätzlichen Aufwand steigen die Verluste zwar geringfügig an, es lassen sich jedoch die abgestrahlten Schwingungen deutlich reduzieren.



Bild 15: Laboraufbau zur Untersuchung der Geräuschreduktion

Die Variante 2 bezieht sich auf die Stromregelung selbst. Solange genügend Spannungszeitfläche zur Verfügung steht, kann man die gewünschte Stromstärke in der Phase der Maschine mit einem 3 Punkt Regler sehr schnell einstellen. Dies führt jedoch auf Grund der Schalt-Regelfrequenz zu Schaltgeräuschen. Wenn man jedoch nicht auf eine Stromstärke regelt, sondern im *block-mode* (BM) fährt, kann man dasselbe gewünschte Drehmoment mit nur 2 Schaltvorgängen (Ein- und Ausschalwinkel) erzeugen. Dazu ist jedoch eine Optimierung dieser Schaltwinkel in Abhängigkeit der Rotorposition über die Drehzahl sowie das gewünschte Drehmoment erforderlich. Die Schaltfrequenzen wurden mit dem Modell der Maschine in einem Optimierungsverfahren in Matlab für alle möglichen Betriebspunkte festgelegt.

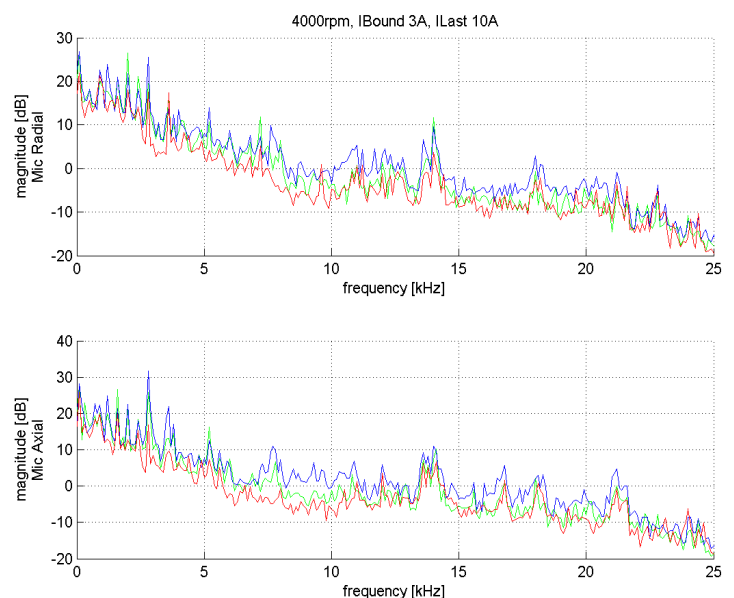


Bild 16: Frequenzgang der Messmikrofone (blau: normal, grün: AVC, rot: BM)

In Bild 16 sieht man deutlich, dass bei vielen Frequenzen im hörbaren Bereich weniger Schall emittiert wird. Die Variante 1 *active vibration cancellation* (grüne Linie) bringt eine Reduktion im Mittel um 25 % und Variante 2 *block-mode* (rote Linie) bringt eine Reduktion der Schallemission im Mittel um 33 %.

2.1.5.2 Lebensdauererlängerung von mechanischen Lagern

Nach unseren Abschätzungen ist mit den Anforderungen des elektrischen sowie mechanischen Lastenheftes keine rein mechanische Lagerung realisierbar, die eine ausreichende Lebensdauer besitzt um wartungsfrei die mittlere Betriebsdauer eines Fahrzeugs zu überstehen.

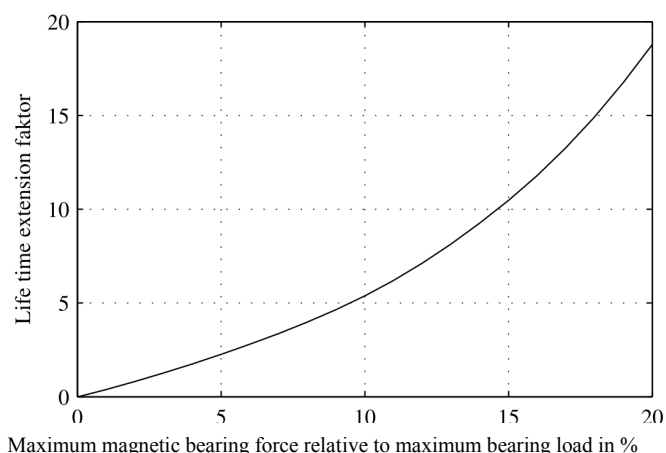


Bild 17: Lebenszeitverlängerung der mechanischer Lager mit weichem Lagersitz durch magnetische Entlastung

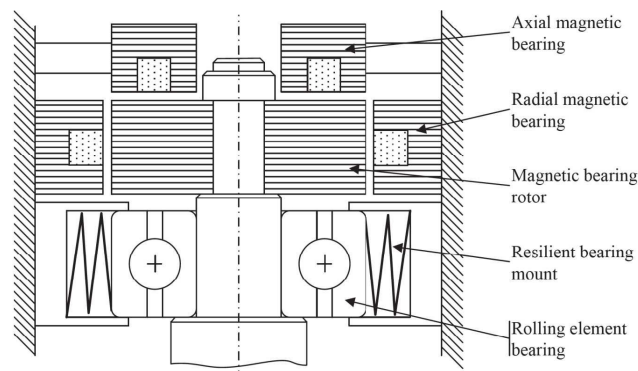


Bild 18: Simulierte Konstruktionsvariante des weichen Lagersitzes mit unterstützenden Magnetlager

Die Kennlinie in Bild 17 zeigt, dass für das Lastkollektiv der Lagerkräfte die Lebenszeit von wirtschaftlich günstigen mechanischen Lagern z.B. um das fünffache verlängert werden kann, wenn das Magnetlager (bzw. die Elektrische Maschine) nur 10% der maximal auftretenden Kräfte aufnehmen kann. Diese alternative Konstruktionsvariante ersetzt das sonst notwendige Notlauflager, und benötigt einen weichen Lagersitz. Eine mögliche mechanische Konstruktionsvariante ist in Bild 18 dargestellt.

Da sich die Lebenszeit von Kugellagern unter Belastung nur schwer bestimmen lässt, wurden Simulationen zur Lebenszeitverlängerung auf Basis von bewährten Grundformeln von Kugellagerherstellern durchgeführt. Dabei wird sowohl das nichtlineare elektromechanische Modell des Magnetlagers als auch ein mechanisches Mehrkörpersystem benötigt. Diese Modelle wurden in Matlab/ Simulink aufgebaut und an prinzipiellen Simulationsversuchen die Machbarkeit gezeigt. Die Möglichkeit und Machbarkeit der lebenszeitverlängernden Maßnahmen mit einem kleinen unterstützenden Magnetlager ist in der Publikation [11] veröffentlicht worden.

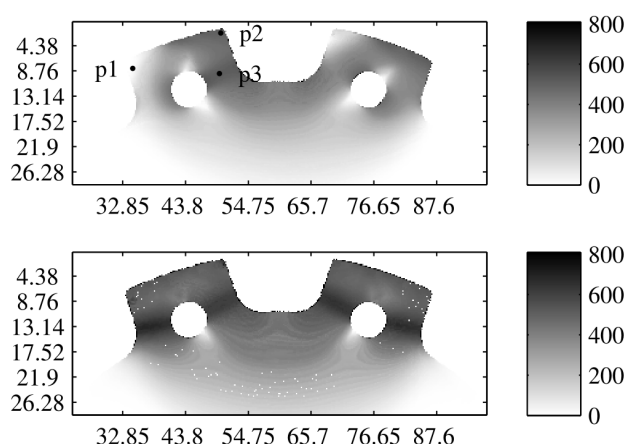


Bild 19: Ummagnetisierungsverluste unter Volllast im normalen Antriebsmodus (oben) und im unterstützenden Magnetlager Modus (unten) in W/kg

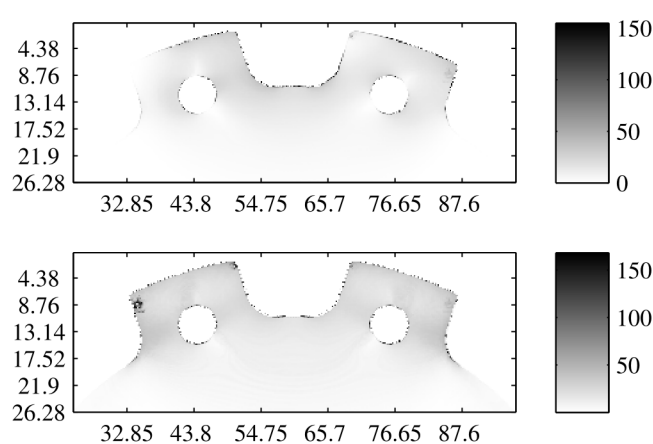


Bild 20: Wirbelstromverluste unter Volllast im normalen Antriebsmodus (oben) und im unterstützenden Magnetlager Modus (unten) in W/kg

Um die Kosten eines zusätzlichen kleineren Magnetlagers zu sparen, wurde passend für dieses Arbeitspaket die Möglichkeit untersucht diese unterstützenden Kräfte mit der eigens entworfenen Antriebsmaschine aufzubringen. Es sei angemerkt, dass der von uns vorgeschlagene Maschinentyp SRM 10/8 mit den kurzen Magnet-Fluss-Pfaden dafür besonders gute Eigenschaften besitzt, da es kaum Streuflüsse über andere Wicklungen gibt und diese daher auch nicht zwingend berücksichtigt werden müssen. Inwiefern nun die zusätzlich aufgebrauchten Radialkräfte die Ummagnetisierungsverluste der Maschine erhöhen, wurde in der Publikation [10] untersucht.

2.1.6 Elektrische Maschine

Die Literaturrecherche zu den SR Maschinen hat gezeigt, dass es auch sogenannte „Low Flux Path“ Typen gibt. Diese zeichnen sich durch geringere Ummagnetisierungsverluste in der Maschine aus. Die tatsächliche Auslegung (speziell der Rotorgeometrie) erfolgte in enger Abstimmung zwischen den mechanischen und elektromagnetischen Anforderungen.

Bei der Festigkeitsberechnung der elektrischen Maschine wurde Spezielles Augenmerk auf die Platzierung der Bolzen zur mechanischen axialen Verspannung des Rotors gelegt, da wie in Bild 21 ersichtlich ist beträchtliche Spannungsspitzen durch die Bohrung entstehen. Parallel dazu wurde das Design bezüglich seiner magnetischen Eigenschaften überprüft. Eine zweidimensionale Parameterstudie (über Rotorwinkel und Spulenstrom) diente in weiterer Folge zur Berechnung des tatsächlich erreichbaren Motormoments.

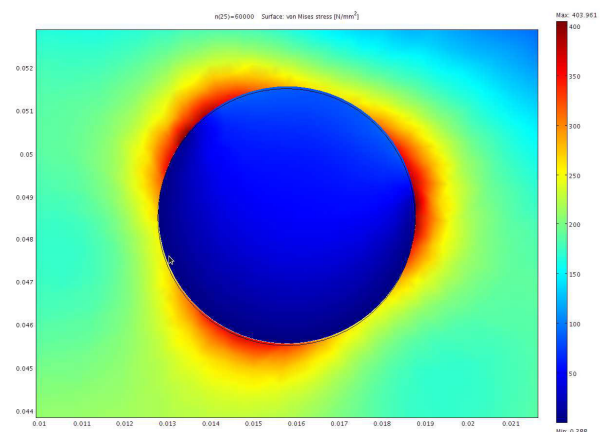
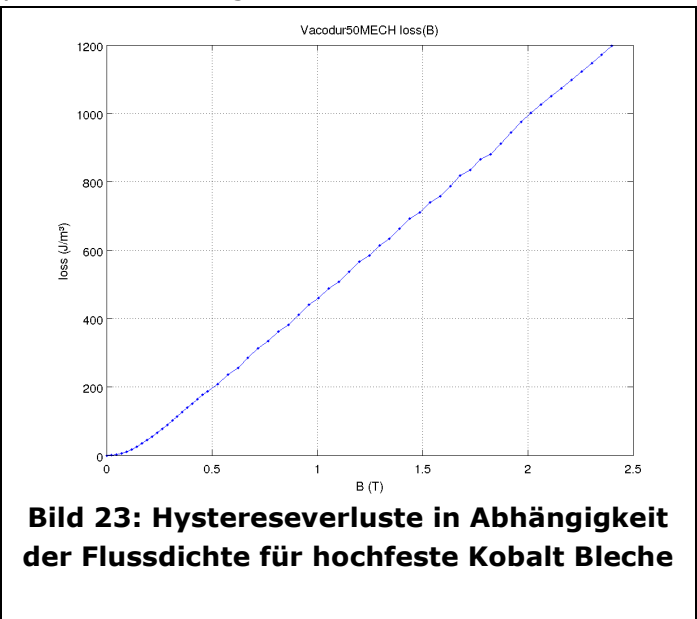
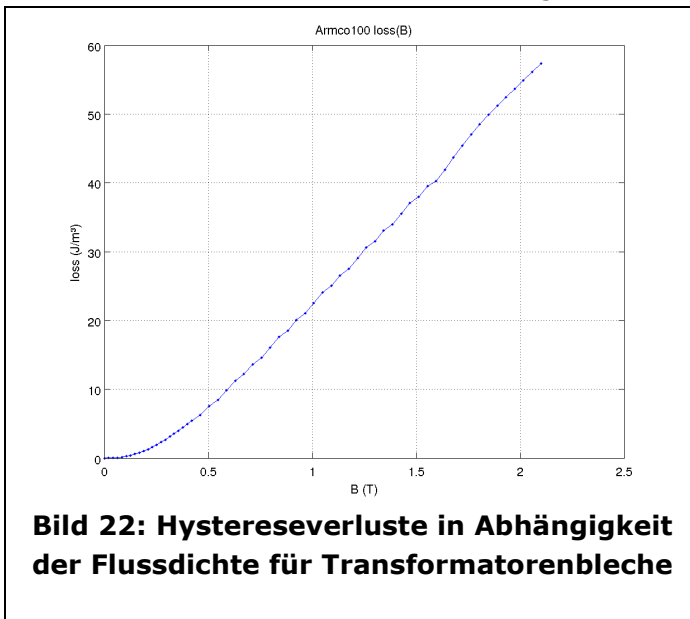


Bild 21: Detailsicht der optimierten Bolzen

Für die Berechnung der Verluste musste besonderes Augenmerk auf die magnetische Charakterisierung der verwendeten Werkstoffe gelegt werden. Von den Materialherstellern sind aber meist nur wenige magnetische Eckdaten des Materials verfügbar. Aus diesen Informationen müssen die relevanten Materialparameter für das FE-Modell erst ermittelt werden. Verluste im Magnetmaterial werden meist in Abhängigkeit von der Frequenz und der Amplitude der sinusförmigen Flussdichte im Material angegeben. Die statischen Hystereseverluste ergeben sich aus der Extrapolation auf die Frequenz 0 Hz. Für die FE-Simulation wird jedenfalls der nichtlineare BH-Zusammenhang benötigt, nach derzeitigem Stand der Technik in Form der eindeutigen Kommütierungskurve, ohne Hysteres. Die Bestimmung der Hystereseverluste erfolgt in einem zweiten Schritt aus den Simulationsergebnissen für das Hysteresefreie Material. Abhängig von dem tatsächlichen Flussdichteverlauf im Material sind die angegebenen Verlustzahlen dafür mehr oder weniger gut geeignet. Die Arbeit dazu wurde in den Publikationen [7] und [8] veröffentlicht.

Für die Anwendung im Flywheel ist ein hochfestes Elektroblech von Nöten (z.B. Vacodur 50 von der Firma Vakuumschmelze). Die hohe mechanische Festigkeit wird durch entsprechend schlechtere magnetische Eigenschaften erkauft. Bild 22 zeigt, dass die Ummagnetisierungsverluste von herkömmlichen Elektroblech entscheidend geringer sind als die von hochfesten Elektroblech wie in Bild 23. Die hierbei dargestellten Hysteresekurven für unterschiedliche Aussteuerung wurden durch das „Energetic Model“ (kurz EM) erstellt. Die Integration dieser Kurven liefert einen Zusammenhang

zwischen Energieverlusten und Aussteuerung. In Kombination mit der FEM Simulation der elektrischen Maschine kann so auf die gesamten Hystereseverluste geschlossen werden.



2.1.7 Verifikation gefundener Lösungen

2.1.7.1 Magnetlagerung

Aufgrund der Ergebnisse aus der Magnetlager Simulation wurde ein Testaufbau eines stehenden Magnetlagers realisiert. Dies dient der Überprüfung der angewendeten Modelle für die stehende Welle. Die Arbeit zu diesem Thema ist in den Publikationen [5] und [6] festgehalten. Der Aufbau eines ganzen Magnetlagersystems inklusive drehbarer Welle hätte keine zusätzlichen Erkenntnisse gebracht, die nicht schon in vorherigen Forschungsprojekten an anderen Universitäten erbracht wurden. Die Recherche und Forschungsarbeiten haben ein umfangreiches Magnetlagermodell hervorgebracht, mit dem sich der Einfluss der Geometrie, der Leistungselektronik, der verwendeten Magnetmaterialien und den damit verbundenen magnetischen Verluste berücksichtigen lassen. Die Erfahrungen, die man mit einem kompletten Aufbau gewinnen hätte könnte (überprüfen des aufgebauten Modells), beantworten weitere wesentlichere Fragestellungen nicht, die entscheidend für den zukünftigen Einsatz von mobilen Schwungradspeichern sind. Daher wurde vom Projektteam der Aufbau eines solchen Systems als zu kosten- und zeitintensiv eingeschätzt gemessen am Verhältnismäßig geringen Neuwert an zu gewinnender Erfahrung. Es wurde eine Bachelor Arbeit betreut und verfasst, die die mechanische Auslegung und Konstruktion des Prüfstandes beschreibt [12].

2.1.7.2 Flywheel Prüfstand

Der Einfluss konstruktiver Parameter auf das dynamische Verhalten wurde mit einem Prüfstand untersucht, welcher einen drehenden Rotor verkippt, und die dabei auftretenden Kräfte und elastischen Verformung der Aufhängung messtechnisch erfassen kann. Nötig ist die Verifikation am Prüfstand, da für die Simulation benötigte Bauteilparameter nicht im benötigten Parameterbereich bekannt sind und die messtechnische Erfassung im Fahrbetrieb ebenfalls nur in einem eng begrenzten Parameterbereich möglich ist. Bild 24 zeigt den entsprechenden Prüfaufbau. Exemplarisch sollen hier die bei einer einmaligen Anregung auftretenden Reaktionskräfte bei

unterschiedlicher Anbindungssteifigkeit im Zeitbereich dargestellt werden. Als elastische Anbindung kann eine Vielzahl von unterschiedlichen Elementen ausgewählt werden.

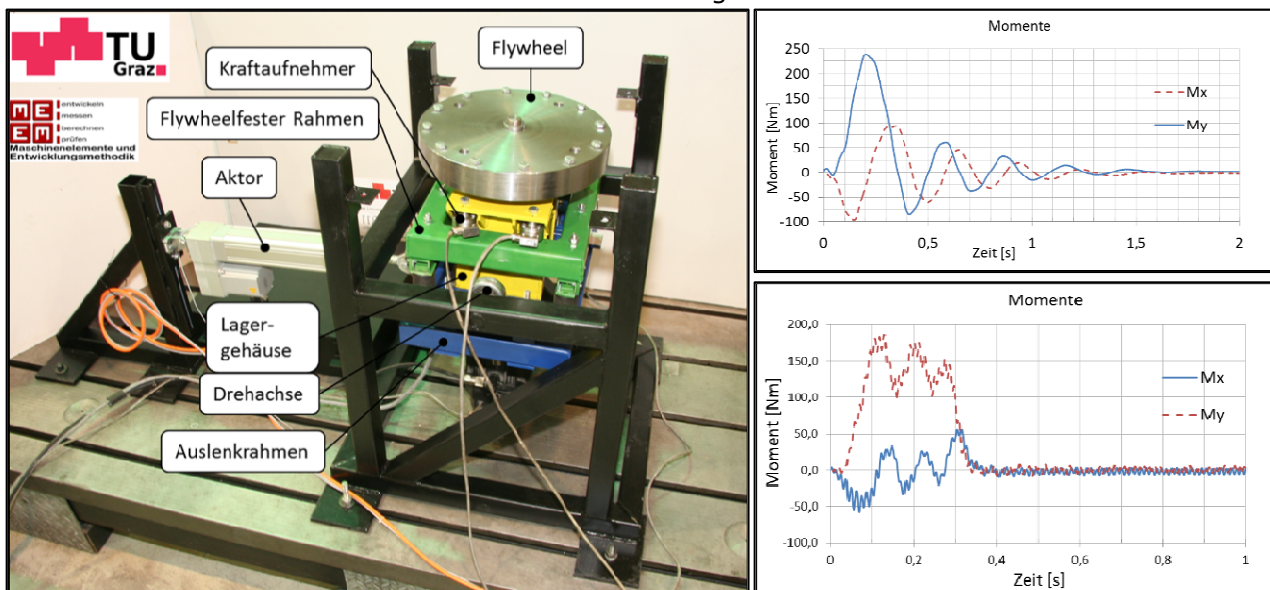


Bild 24: Prüfstand zum Verifizieren der berechneten Kreiselreaktionsmomente

Im speziellen werden herkömmliche Gummipuffer untersucht, um so die Abhängigkeit der Federsteifigkeit und Dämpfung von äußeren Einflussgrößen zu ermitteln. Diese sind zum Beispiel die Auslenkgeschwindigkeit oder die Betriebstemperatur. Die ermittelten Daten sollen zur Verfeinerung der Berechnungs- und Simulationsmodelle genutzt werden. Der Linearmotor kann verschiedenste praktisch relevante Schwenkvorgänge bewältigen, um eine möglichst realitätsgetreue Belastung hervorzurufen. Die Nick-, Gier-, und Wankraten wurden basierend auf realen Messfahrten ermittelt und können am Prüfstand wiedergegeben werden. Des Weiteren erlaubt der Prüfstand den Einbau von verschiedenartigen Feder-Dämpfer-Elementen an verschiedenen Positionen, damit unterschiedliche Aufhängungsarten geprüft werden können. Der Prüfstand ist so konzipiert, dass nur geringe Adaptierungsarbeiten von Nöten sind, um ebenfalls einen magnetisch gelagerten Rotor testen zu können.

2.1.7.3 Wärmetransmissionsprüfstand

Der Betrieb eines Schwungspeichers im Vakuum stellt für die mechanischen Komponenten eine besondere Belastung dar. Speziell die Schmiersituation und das thermische Verhalten der Wälzlagerung stellen eine besondere Herausforderung dar. Weiters ist der Themenkreis Luftströmung von großer Bedeutung. Einerseits treten durch die nicht vollständig evakuierbare Flywheel-Umgebung Strömungsverluste auf, die so den Systemwirkungsgrad reduzieren, andererseits leistet die strömungsbedingte Konvektion einen Beitrag zum Wärmetransport vom Rotor zur kühleren Umgebung. Der für diese Untersuchungen genutzte, bereits vorhandene, Vakuumprüfaufbau musste um eine berührungslose Magnetkupplung ergänzt werden, um den Rotor thermisch von der Antriebsmaschine zu trennen. Diese wurde entwickelt, konstruiert, gefertigt und erfolgreich in Betrieb genommen. Dadurch ist die Messung der oben beschriebenen Zusammenhänge möglich. Bild 25 zeigt den Aufbau der Magnetkupplung. Die Messung der Wärmeleitung, bzw. des gesamten Wärmeflusses wurde in Abhängigkeit verschiedener Parameter an einem praktisch relevanten Wälzlager durchgeführt. Voraussetzung für den Wärmetransport ist eine Temperaturdifferenz. Diese wird durch eine Induktionsheizung im Inneren des Prüfstandes erzeugt und von der Prüfstandssteuerung geregelt. Die Wärme wird durch die Welle über das Lager an das

Gehäuse geleitet. Für die Messung dieser Vorgänge ist eine Vielzahl an Temperatursensoren nötig. Diese sind in folgender Abbildung dargestellt.

Es sind drei Pyrometer verbaut, welche die Temperaturen an den Messstellen flange top, flange bottom und flange front messen. Die weiteren Messstellen sind durch Pt-1000 Widerstandsthermometer realisiert. Die Messsignale werden über modifizierte Sub-D Stecker nach außen geführt und anschließend ausgewertet. In Umfangsrichtung sind am Flansch mehrere Sensoren angebracht, welche anschließend gemittelt werden. Dadurch wird die Genauigkeit der Messung gesteigert. Zu Kontrollzwecken wurden auch einige Temperaturmessungen appliziert, um eine Überhitzung der Induktionsheizung, der mechanischen Lager und des Antriebsmotors zu verhindern.

Auf Grund der hohen Drehzahlen und dem Vakuumbetrieb ist eine Magnetkupplung erforderlich, die das Antriebsmoment berührungslos in den Prüfstand einleitet. Gleichzeitig trennt sie auch den Antriebsstrang thermisch von der Welle im Prüfstand. Der Antriebsmotor kann auf Grund der fettgeschmierten Lager nicht im Prüfstand verwendet werden. Da eine Magnetkupplung mit diesen Anforderungen nicht am Markt erhältlich ist, wurde diese Komponente eigens für diesen Prüfstand entworfen und gefertigt. Die Induktionsheizung, die berührungslos die Stahlwelle im inneren des Prüfstandes aufheizt ist ebenfalls selbst berechnet, konstruiert und gefertigt worden. Für die elektrische Ansteuerung der Induktionsheizung wurde der Umrichter aus diesem Projekt mit ein paar Modifikationen verwendet.

Exemplarisch sind in Bild 26 die Temperaturverläufe an den Messstellen Flansch außen und shaft top dargestellt. Durch die Geometrie der Welle und die Temperaturdifferenz zwischen shaft top und shaft bottom wird der Wärmestrom in der Welle ermittelt. Der Wärmestrom im Flansch wird über die Temperaturdifferenz am Flansch und dessen Geometrie errechnet. Mit den Temperaturen am Lagersitz wurde so der thermische Leitwert des Lagers ermittelt. Die Messungen wurden bei unterschiedlichen Drehzahlen und Drücken bei gleicher Heizleistung durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen sich einstellenden Temperaturen wird auf den konduktiven Wärmeübergang des Lagers im Prüfstand geschlossen.

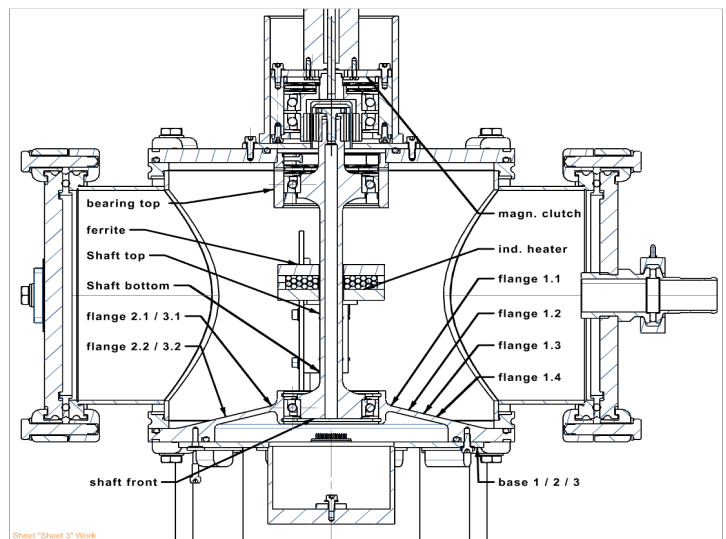


Bild 25: Schnitt des Wälzlager Vakuum Wärmetransmissionsprüfstand
Temperaturverläufe Prüfstand

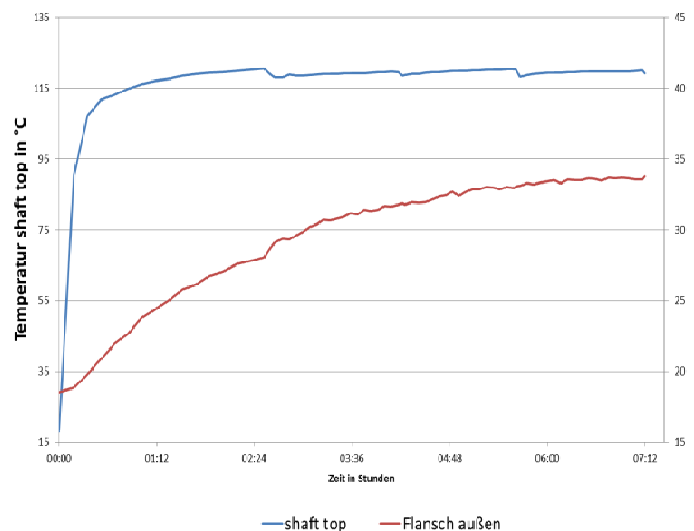


Bild 26: Temperaturverlauf aus dem der Wärmefluss berechnet wird

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Da die Teilergebnisse bereits ausführlich in den einzelnen Arbeitspaketen beschrieben wurden, werden hier nur die wesentlichen Erkenntnisse des Projekts geschildert:

- Aus der Energieflusssimulation des Fahrzeugs wurde ersichtlich, dass ein Energiespeicher mit einem geringen Energieinhalt und Leistung (unter 250 kJ und weniger als 10 kW) bereits ausreichend ist, um speziell im Stadtgebiet wesentliche Kraftstoffeinsparungen zu erreichen. Im Hinblick auf eine möglichst hohe Kundenakzeptanz wurde in diesem Projekt eine etwas höhere Leistungsfähigkeit gewählt.
- Messungen im realen Fahrbetrieb haben ergeben, dass die auftretenden Kräfte und Beschleunigungen auf das Flywheel in der gleichen Größenordnung sind wie bei den simulierten Parkschäden. Somit müssen diesbezüglich keine speziellen Vorkehrungen getroffen werden, um das Flywheel zu schützen.
- Simulationen und entsprechende Prüfstandsversuche haben ergeben, dass die Aufhängung des Schwungrades im Fahrzeug entweder starr oder kardanisch zu erfolgen hat. Ein „weich“ aufgehängtes Schwungrad (z.B. mittels Elastomer-Matte) zeigt deutlich schlechteres Verhalten als die starre Aufhängung, da sich Resonanzüberhöhungen bilden.
- Aus technischer Sicht wäre die Ausführung als „Glockenläufer“ zu bevorzugen (geringstes Gewicht und Volumen für die gestellten Anforderungen), aber die notwendigen Faserverbundwerkstoffe für die Schwungmasse sind „aus heutiger“ Sicht noch zu wenig für dieses Einsatzgebiet verstanden bzw. untersucht.
- Ein rein magnetisch gelagerter Rotor ist im PKW Bereich nicht sinnvoll (Kosten, Baugröße, usw.). Als äußerst vielversprechend erweist sich aber die Kombination aus herkömmlichen Wälzlagern und einer (geringen) Magnetlager-Unterstützung. Aufgrund dieser Unterstützung erreicht die Lebensdauer des herkömmlichen Lagers die geforderte Betriebsstundenanzahl des Gesamtfahrzeugs.
- Es hat sich gezeigt, dass die Wärmeabfuhr vom Rotor über die mechanischen Lager ein wesentlicher Aspekt der Kühlstrategie ist. Ein rein magnetisch gelagerter Rotor könnte nur über die Strahlung gekühlt werden.
- Die geschaltete Reluktanzmaschine (SRM) erfüllt die Anforderungen in Hinblick auf Leistung, Bauraum und Wirkungsgrad. Die Verluste im Rotor sind im Vergleich mit synchronen Maschinenkonzepten - trotz speziellem Ansteuermuster - deutlich höher, was zu entsprechenden Problemen bei der Kühlung des Rotors führt. Ebenfalls ist das Geräuschverhalten der SRM Maschine im Fahrzeug, trotz des speziell dafür abgestimmten Ansteuermoduls, nicht optimal. Diese Geräuschentwicklung der Reluktanzmaschine schränkt die mögliche Einbaulage im Fahrzeug entsprechend ein. Als vielversprechende Alternative könnte daher eine synchrone Reluktanzmaschine verwendet werden.

4 Ausblick und Empfehlungen

Schwungradspeicher stellen eine aussichtsreiche Alternative zu elektrochemischen Energiespeichern dar, da sie eine hohe Leistungsdichte mit einer hohen Energiedichte kombinieren. Zusätzliche Vorteile des Flywheels gegenüber elektrochemischen Energiespeichern sind ein deutlich größerer Betriebstemperaturbereich, sowie in Bezug auf Batterien eine deutlich höhere Zyklenfestigkeit und damit Lebensdauer, bzw. in Bezug auf Supercaps eine deutlich höhere Energiedichte.

Aufgrund der gezeigten Eigenschaften wäre der Schwungradspeicher die beste Wahl als Energiespeicher für den mobilen Anwendungsbereich. Kommerziell verfügbar sind aber nur Schwungradspeicher für stationäre Anwendungen (z.B. unterbrechungsfreie Stromversorgung oder Frequenzregulierung im Stromnetz), bzw. Sonderanfertigungen für Rennsportanwendungen. Diese zeigen zwar das Potential der Technologie auf, können aber nicht direkt für den geplanten Anwendungsbereich verwendet werden. Hindernisse einer Serienfertigung sind aus heutiger Sicht vor allem die begrenzte Lagerlebensdauer, als auch eine zu geringe Energiedichte der Schwungradmasse.

Prinzipiell sind beide Probleme lösbar, eine entsprechende Grundlagenforschung ist aber noch nötig: Im Bereich der Lagerung stellt der in diesem Projekt aufgezeigte Ansatz (Verwendung eines konventionellen Hybridkugellagers welches durch ein kleines Magnetlager entlastet wird) bereits einen interessanten und vielversprechenden Ansatz dar. Im Bereich „fortschrittlicher“ Rotormaterialien spielen vor allem kohlefaserverstärkte Werkstoffe eine große Rolle. Obgleich dieser Werkstoff bereits vielfältig eingesetzt wird, unterscheiden sich die Anforderungen an einen Kohlefaser-Rotor (gewickelte Langfaser, dickwandige Struktur) stark von den üblichen Anwendungsgebieten (dünnwandige Strukturen bzw. Platten). Es fehlen daher meist sowohl entsprechende Simulationstools bzw. Parameter zur Beschreibung, als auch Erfahrungen im tatsächlichen Einsatz (z.B. Festigkeit, Bruchverhalten).

5 Literaturverzeichnis

Nachfolgend eine Liste der Beiträge welche direkt aus dem Projekt Power KERS entstanden sind.

- [1] Brasseur G., Schweighofer B., Wegleiter H.: *“Comparison of Electric Energy Storages for Hybrid Racing Vehicles”*, 13th EAEC European Automotive Congress, Brussels, Belgium, 2011
- [2] Recheis M., Schweighofer B., Fulmek P., Wegleiter H.: *“Evaluation of inductive displacement sensor configurations for a flywheel energy storage system”*, Soft Magnetic Materials Conference (SMM), Kos, Greece, 2011
- [3] Wegleiter, H.; Schweighofer, B.; Holler, G.; Brunnader, R.: *“Fast Quasi Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles considering Limiting Conditions”*, European Electric Vehicle Congress EEVC, Brussels, Belgium, 2011
- [4] Bader M., Schweighofer B., Wegleiter H.: *“Aspects of Mechanical Engineering and Material Sciences for the Design of Flywheels for Mobile Applications”*, European Electric Vehicle Congress EEVC, Brussels, Belgium, 2011

- [5] Recheis M., Wegleiter H., Schweighofer B., Fulmek P.: "Inductive Displacement Measurement for a Basic Active Magnetic Bearing Test Rig", 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Trstanska Lomnica, Slovakia, 2011
- [6] Recheis M., Wegleiter H., Schweighofer B., Fulmek P.: "*Impedance Measurements of Ferrite Core Displacement Sensors for Flywheel Energy Storage Systems*", IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Graz, Austria, 2012
- [7] Recheis M., Schweighofer B., Fulmek P., Wegleiter H.: "*Optimization of Active Magnetic Bearings for Automotive Flywheel Energy Storage Systems Based on Soft Magnetic Materials*", Joint European Magnetic Symposia (JEMS), Parma, Italy, 2012 (published in European Physical Journal Web of Conferences)
- [8] Schweighofer B., Recheis M., Fulmek P., Wegleiter H.: "*Rotor Losses in a Switched Reluctance Motor - Analysis and Reduction Methods*", Joint European Magnetic Symposia (JEMS), Parma, Italy, 2012 (published in European Physical Journal Web of Conferences)
- [9] Fulmek P., Wegleiter H., Haumer P., Recheis M., Schweighofer B.: "*Magnetic Characterization of High Strength Steels for High Speed Switched Reluctance Motors*", Soft Magnetic Materials Conference (SMM), Budapest, Hungary, 2013
- [10] Recheis M., Schweighofer B., Fulmek P., Wegleiter H.: "*Selection of Magnetic Materials for Bearing-less High Speed Mobile Flywheel Energy Storage Systems*", Soft Magnetic Materials Conference (SMM), Budapest, Hungary, 2013 (accepted for Publication in IEEE Journal: Transactions on Magnetics in 2014)
- [11] Recheis M., Buchroithner A., Andrasec I., Gallien T., Schweighofer B., Bader M., Wegleiter H.: "*Improving kinetic energy storage for vehicles through the combination of rolling element and active magnetic bearings*", Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Vienna, Austria, 2013
- [12] Sauer M. , Magnetlagerprüfstand, Bachelorarbeit, TU Graz, Austria, 2013
- [13] G. Bischof, K. Reisinger, T. Singraber, A. Summer: "*Investigation of a passenger car's dynamic response due to a flywheel-based kinetic energy recovery system*", Vehicle System Dynamics 2013, Taylor & Francis, accepted
- [14] G. Bischof, K. Reisinger, T. Singraber, A. Summer: "*Gyroscopic Bearing Loads in Vehicular Flywheel-based KERS*", SAE International, submitted.

IMPRESSUM

Verfasser

Technische Universität Graz - Institut für
Elektrische Messtechnik und
Messsignalverarbeitung

Graz University of Technology
Inffeldgasse 23/II, 8010 Graz
E-Mail: office@emt.tugraz.at
Tel: +43 (0)316 873 30501
Fax: +43(0)316 873 30502

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
office@klimafonds.gv.at
www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige
Verantwortung für den Inhalt dieses
Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise
die Meinung des Klima- und Energiefonds
wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die
Weiternutzung der hier enthaltenen
Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH