

Entwicklung funktionsintegrierter magnetgelagerter Hochgeschwindigkeits-Speichersysteme

S. Düsterhaupt, H. Hoffmann, H. Neumann, T. Rottenbach, F. Worlitz
Institut für Prozesstechnik, Prozessautomatisierung und Messtechnik (IPM)
Hochschule Zittau/Görlitz - University of Applied Sciences
Theodor-Körner-Allee 16
02763 Zittau, Deutschland

T. Berek, S. Scholz
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Fraunhofer Kunststoffzentrum Oberlausitz
Gruppe Leichtbau und Faserverbundtechnik
Theodor-Körner-Allee 6
02763 Zittau, Deutschland

Abstract

Das Prinzip eines Schwungmasseenergiespeichers (kurz SMS), d. h. kinetische Energie in rotierenden Massen zu speichern, ist bekannt. In den letzten Jahren haben SMS durch ihre Eigenschaft, große Leistungen bei hohen Zyklenzahlen aufzunehmen/abzugeben, an Attraktivität gewonnen. Durch Neu- und Weiterentwicklungen auf den Gebieten der Leistungselektronik, bei der Herstellung hochfester Werkstoffe wie kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (kurz CFK, von: carbonfaserverstärkter Kunststoff) für Rotor und Schwungmasse und in der Lagertechnik sind energieeffiziente und sichere SMS bis zu 150 kWh machbar. Mit einem Leistungsband von 0,5 – 50 MW eignet sich die SMS-Technologie zur Stabilisierung von Verbundnetzen.

Dieser Beitrag gibt einen generischen Einblick in die ingenieurwissenschaftlichen Arbeiten an einer Hochgeschwindigkeitsschwungmasse. Dazu wird die strategische Herangehensweise vorgestellt. Die Herausforderungen bei der Gestaltung der hybriden Metall-CFK-Strukturen des Laufzeugs werden vertieft.

1 Motivation und Zielstellung

Der europäische Staatenverbund unternimmt umfangreiche Anstrengungen zum Umbau seiner Energieinfrastruktur. Auf der Grundlage des Pariser Klimaschutzabkommens treiben weltweit Nationen den Umbau ihrer Energiewirtschaft voran, weg von fossilen Energieträgern hin zu Erneuerbaren. Ziel ist die klimagasneutrale Ener-

giewirtschaft bis 2050. Deutschland wird bis 2038 die Kohleverstromung aufgeben. Dem folgte die EU in 2021. Der Kohleausstieg wird bis 2038 für alle europäischen Mitgliedsstaaten verbindlich. Ein Lösungsansatz sind zellulare autonome Energiesysteme. Diese regionalen Bilanzkreise bieten die Möglichkeit, Energie bedarfsgerecht (orts-, zeit- und mengengerecht, englisch: *on demand*) aus Sicht von Quellen bereitzustellen, zu speichern und aus Sicht von Senken zu beziehen.

Der Wegfall konventioneller Kraftwerkskapazitäten führt zu einem reduzierten Angebot qualifizierter Primärregelleistung. Erneuerbare Energiequellen können diese Systemdienstleistung nur bedingt erbringen. Daher sind industriell skalierte Energiespeicher für die Stabilisierung des europäischen Verbundnetzes erforderlich. Sie können Residuallasten kompensieren, indem sie die für die Laststeuerung notwendige positive und negative Regelleistung bereitstellen.

Großes Potenzial wird in Kurzzeitspeichern für elektrische Energie gesehen. Dabei liegt der Fokus auf modularen kinetischen Energiespeichern (kurz KERS, von englisch: *Kinetic Energy Recovering System*), die unter Anwendung eines Baukastensystems und des funktionsintegrierten Leichtbaus an die Anforderungen ausgewählter Sektoren (Energie, Transport, Personenbeförderung, Offshore etc.) angepasst, dem Technologiemarkt angeboten werden sollen. Damit soll

eine Alternativtechnologie zu Lithium-Ionen-Akkumulatoren etabliert werden. Auch deshalb, weil sich die mit modernen Faserverbundwerkstoffen gefertigten KERS nahtlos in europäische Wertschöpfungsketten (Maschinenbau, Elektromaschinenbau, Elektronik, Software) integrieren lassen.

Die ingenieurwissenschaftliche Zielstellung wird innerhalb des STARK-geförderten Vorhabens *Funktionsintegrierte Leichtbaustrukturen zur effizienten Energiebereitstellung und -speicherung (LuE)* verfolgt.

LuE ordnet sich strategisch in den HSZG-Forschungsschwerpunkt „Energie und Umwelt“ ein. Hier werden Fragen zur Energieversorgung im Kontext des energiepolitischen Vierecks – dazu zählen Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit, Umweltschutz und Akzeptanz – wissenschaftlich-technisch beantwortet.

2 Energiespeicherung mit schnelldrehenden Schwungmassen

Eine effiziente Möglichkeit der Bereitstellung elektrischer Energie, u. a. im Hinblick auf die zukünftigen Anforderungen an das Verbundnetz, ist die Speicherung in Form von kinetischer Energie in Hochgeschwindigkeitsschwungmassen bzw. -rotoren.

Unter Hochgeschwindigkeitsrotoren werden rotierende Bauteile mit einem hohen Leistungsspektrum und großer Dynamik verstanden, die sich von herkömmlichen Rotoren durch ihre erreichbaren Maximaldrehzahlen deutlich abgrenzen. Als Schwungräder eingesetzt fungieren Hochgeschwindigkeitsrotoren als sogenannte Schwungmassespeicher. Dabei werden Umfangsgeschwindigkeiten von 390 – 900 m/s [3] erreicht.

Eine Motor-Generator-Einheit (kurz MGE) wandelt dabei elektrische Energie in mechanische um und umgekehrt.

Um das Potential bei sehr hohen Drehzahlen zu nutzen, sind hochfeste Werkstoffe für die Rotoren und ein reibungsarmes Lagersystem erforderlich. Durch den Einsatz von Faserkunststoff-

verbunden (FKV) mit den integrierten Komponenten

- Magnet- und Fanglager,
- rotierender Antrieb und
- weiterer Betriebs- und Sicherheitsinstrumentierung

kann die Rotordrehzahl und damit die Kapazität entsprechender Speichersysteme bei vergleichsweise kleiner Masse erhöht werden.

Es gilt der funktionale Zusammenhang

$$E_{rot} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (1)$$

zwischen der gespeicherten kinetischen Energie E_{rot} in der Rotation, dem Trägheitsmoment J und der Winkelgeschwindigkeit ω . Demnach ist die Erhöhung der Speicherkapazität bzw. in der Schwungmasse gespeicherten Energie über eine Drehzahlerhöhung lukrativ.

Während metallische Schwungräder (Rotoren überwiegend aus Stahllegierungen gefertigt) mit konventioneller Lagerung aufgrund ihrer werkstoffspezifischen mechanischen Eigenschaften Maximaldrehzahlen von rund 2000 min^{-1} bis ca. 3000 min^{-1} erreichen [1], decken sogenannte FKV-Hochgeschwindigkeitsrotoren einen weitaus höheren Drehzahlbereich ab.

Die gutmütige und robuste Abstimmung zwischen Rotordrehzahl (möglichst schnell), Laufzeugmasse (möglichst leicht) und geometrischer Kompaktheit (möglichst klein) führt bei Hochgeschwindigkeitsschwungmassen bereits zu Beginn des Designprozesses je nach Einsatzzweck schnell zu der Forderung nach einer angemessenen Leistungs- oder Energiedichte.

Die Kompaktheit einer schnelldrehenden Schwungmasse kann auch als notwendige Bedingung gesehen werden, wenn eine große Energiedichte bei hoher Integration [6] gefordert wird. Der geometrische Gestaltungsspielraum wird praktisch ab der ersten Iteration innerhalb des Designprozesses insbesondere durch die

Ergebnisse der begleitenden Festigkeitsuntersuchungen begrenzt. Der Bauraum für die Magnetlagerung, Fanglager und der MGE wird insbesondere durch die spezifischen Zugfestigkeiten der Metalllegierungen (ca. 350 – 500 MPa bei Raumtemperatur) begrenzt.

Daher wird das Laufzeug vorzugsweise als Außenläufer (Abb. 1) gestaltet, mit innenliegenden Magnetkreisgeometrien und umgebenden Strukturen aus FKV zur Gewährleistung der notwendigen Robustheit bei Fliehkraftbeanspruchung. Gleichzeitig kann die maximale Betriebsdrehzahl gesteigert und eine definierte Speicherkapazität passend zur Performance der MGE abgestimmt werden.

Schnelldrehende Schwungmassen zeigen ausgeprägte gyroskopische Effekte. Die Kreiselkräfte und Kreiselmomente führen zu Pendelbewegungen, die überwiegend durch die radiale Magnetlagerung kompensiert werden. Der Gedanke ist daher naheliegend, das obere Ende der Schwungmasse als Festlager auszuführen. Der zylindrische Abschnitt des Außenläufers – in einer Pendelanordnung aufgehängt – wird als Glockenläufer bezeichnet. Für die Energiewand-

lung zwischen Netz und Schwungmasse wird ein rotierender Antrieb – eine stromrichtergeführte MGE – vorgesehen. Für die Gestaltungskonzeption des Hochgeschwindigkeits-SMS eignen sich die geschaltete Reluktanzmaschine (kurz SRM, von englisch: *Switched Reluctance Machine*) und die permanentmagneterregte Synchronmaschine (kurz PMSM). Beide Maschinen sind im Hochdrehzahlbereich robust. Neben dem vergleichsweise einfachen Aufbau ist die SRM im höheren Drehzahlbereich der PMSM bezüglich ihrer Drehmomentdichte überlegen. Weiterhin qualifiziert sich die SRM mit ihrem weitestgehend drehmomentfreien Drehbetrieb im stromlosen Zustand. Dies ist gerade für den Einsatz in einem SMS – und hier speziell für den Leerlaufbetrieb – von Vorteil. Ein drehmomentfreier Drehbetrieb reduziert Speicherverluste und somit die Selbstentladung. Aber auch der reduzierte Einsatz von Metallen der Seltenen Erden machen diesen Maschinentyp – insbesondere für die Verwendung in Speicherfeldern mit mehreren zehn oder einhundert Einheiten – vor dem Hintergrund aktueller und zukünftiger geopolitischer Rahmenbedingungen interessant.

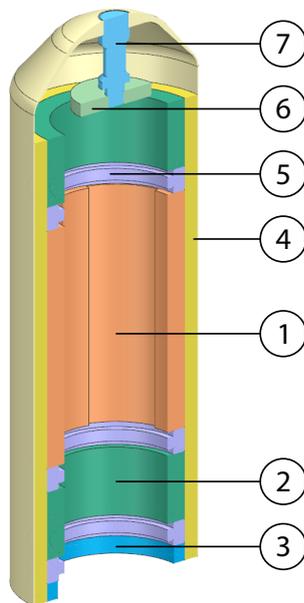


Abb. 1: Übersicht Glockenläufer (1 MGE; 2 Radialmagnetlager; 3 Radialfanglager; 4 CFK-Bandage; 5 Wuchtebenen; 6 Zugscheibe Axialmagnetlager; 7 Aufhängung bestehend aus Zapfen, Axial-/Radialfanglager, Haube und Obersatz)

Natürlich sprechen die extremen Betriebsbedingungen – das sind hohe Drehzahlen, mechanisch schwellende Belastungen bei gleichzeitig wirkenden thermischen Lasten – und der Wunsch nach einer hohen Zyklenfestigkeit für eine vollständig magnetgelagerte Applikation. Auch der absehbare Betrieb in einer Mischgasatmosphäre bestehend aus Luft und Helium begründen die Anwendung von Magnetlagern. Immerhin soll die Hochgeschwindigkeitsschwungmasse für eine Lebensdauer von 20 Jahren bei jährlich 8000 Betriebsstunden konzeptioniert werden. Ein vergleichsweise geringerer Wartungs- und Instandhaltungsaufwand – und damit potenziell geringere operative Kosten (Opex, von englisch: *operational expenditure*) – können ein SMS-Speicherfeld im Vergleich zu alternativen Speicherkonzepten für den industriell skalierten Einsatz wirtschaftlich interessant machen.

Der SMS wird eigensicher gestaltet. Spezielle Konstruktionsprinzipien stellen im Fehler-

fall sicher, dass die Integrität des Speichersystems erhalten bleibt. Dazu zählt auch die Fanglagerung – ein diversitäres mechanisches Lagersystem, welches das Laufzeug bei Versagen der Magnetlagerung in seinen 5 Freiheitsgraden stützt und führt. Betriebsdrehzahlen von bis zu $16\,500\text{ min}^{-1}$ sind eine Herausforderung für konventionelle Backup-Lager. Daher wird der Betrieb der Magnetlagerung und des rotatorischen Antriebes an einem gemeinsamen Zwischenkreis gefordert. Im Fehlerfall wird die Funktion der Magnetlagerung aufrechterhalten. Dazu wird die Auslaufenergie der Schwungmasse genutzt. Zeitgleich wird der SMS zum Zweck der Drehzahlreduzierung entladen. Bei Erreichen der unteren Drehzahlgrenze von 2000 min^{-1} übernehmen Fanglager die Laufzeugstabilisierung bis zum Stillstand.

Damit ist eine Lastenheftstruktur grob skizziert. Doch welche ingenieurwissenschaftliche Zielstellung verfolgt das Vorhaben *LuE*?

Die Kombination moderner Werkstoffe, innovativer Konstruktionsprinzipien und Fertigungstechnologien birgt enormes Potenzial für das belastungsgerechte Gestalten von Hochgeschwindigkeitsschwungmassen. Es wird das Ziel verfolgt, der Entwicklung funktionsintegrierter magnetgelagerter Hochgeschwindigkeits-Speichersysteme (kurz FUMAG) unter Würdigung des technischen Status quo neue Impulse zu geben und mit dem Blick auf die Wertschöpfungsketten Vorschub zu leisten. Der Fokus von *FUMAG* liegt in der Entwicklung ebendieser Hochgeschwindigkeitsrotoren.

3 Vordesign

3.1 Vorgehensweise

Die Auslegung des SMS-Systems erfolgt methodisch (analytisch, modellgestützt), beginnend mit dem *Vordesign*. Dieses Projekt besitzt ingenieurwissenschaftlich auch den Charakter einer Machbarkeitsstudie. Auf der Grundlage von Ergebnissen und Erkenntnissen aus Parameterstudien wird die technische Machbarkeit einer Hochgeschwindigkeitsschwungmasse eingeschätzt. Die Bewertungsergebnisse werden in

einer Anforderungsspezifikation – dem Lastenheft – fortgeschrieben.

Der iterative Auslegungsprozess beginnt mit der MGE (Abschnitt 3.2). Auftretende mechanische Belastungen, wie

- magnetische Zugkräfte (magnetischer Zug),
- Fliehkräfte,
- Tangentialkräfte (Drehmomenterzeugung),
- Unwuchtkräfte

und thermische Beanspruchungen sind wesentliche Ergebnisse. Am Ende einer Iteration werden die Informationen gegen Grenzwerte ausgewählter Gütekriterien geprüft. Dazu zählen u. a.

- Zugfestigkeiten,
- mechanische Spannungen,
- Baumraumbeanspruchung und
- Dehnungen.

Diese Daten werden für eine erste Optimierung des elektromechanischen Energiewandlers berücksichtigt. Im weiteren Verlauf stellen sie Eingangsinformation für die Auslegung und Gestaltung der CFK-Bandage (Abschnitt 3.3) dar. Sie wird die Zugfestigkeitswerte des rotorseitigen MGE-Blechpaketes auf ein vertretbares Maß im Drehbetrieb mit volatilen Winkelgeschwindigkeiten (schwellende Belastung) reduzieren. Damit ist eine notwendige Drehzahlfestigkeit der MGE gegeben.

Die Arbeiten werden am Vordesign der Speicherelemente (Abschnitt 3.4) fortgesetzt. Der SMS soll eine auf die Performance des rotierenden Antriebs abgestimmte Speicherkapazität erhalten.

Parallel dazu werden Arbeiten an der Magnetlagerung (Abschnitt 3.5) vorangetrieben.

Die in dieser Veröffentlichung gezeigten Arbeiten und Ergebnisse ordnen sich in das *Vordesign* ein. Dem schließen sich perspektivisch die notwendigen Arbeiten zum *fertigungsgerechten Design* an.

3.2 Motor-Generator-Einheit

Als MGE wurde für den Schwungmassespeicher eine geschaltete Reluktanzmaschine (SRM) in Außenläuferbauform ausgewählt. Die SRM sollte für eine Leistung im Bereich 50 – 100 kW bei einer Zwischenkreisspannung von 700 V dimensioniert werden. Herausforderung bei der Auslegung war es, eine möglichst hohe Maximaldrehzahl zugunsten eines hohen Energieinhaltes zu erreichen und dabei die mechanischen Belastungen des Rotors so zu begrenzen, dass eine Dauerfestigkeit bei schwelloser Belastung während des Ladens/Entladens gewährleistet ist.

Die Anforderung, möglichst hohe Drehzahlen zu erreichen, führte zu der Entscheidung, eine SRM mit niedriger Polzahl zu verwenden, um die Ummagnetisierungsfrequenzen möglichst niedrig zu halten. Aus diesem Grund wurde eine SRM in 6/4-Konfiguration (Abb. 2) gewählt. Für die Dimensionierung wurde ein MATLAB-

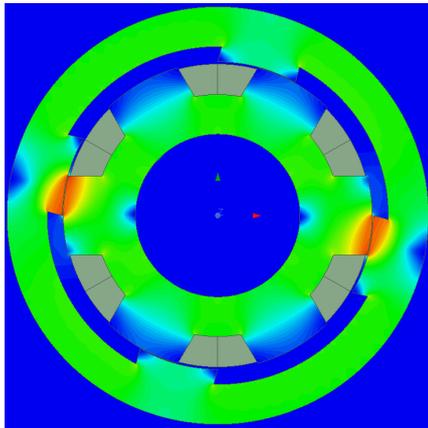


Abb. 2: Geschaltete Reluktanzmaschine in 6/4-Konfiguration (Blechschnitt)

Modell auf Basis der in [2] vorgestellten analytischen Berechnungsgleichungen für Leistung und Drehmoment von Reluktanzmaschinen implementiert. Das so implementierte Modell bildete den Ausgangspunkt für einen iterativen Optimierungsprozess. Als Optimierungswerkzeug wurde die Particle-Swarm-Optimierung (kurz PSO) genutzt, welche bereits am Institut für die Magnetlagerauslegung im Einsatz ist [5].

Im Ergebnis der Optimierung liegen Auslegungsdaten zu Stator- und Rotorgeometrie sowie zur

Bewicklung vor. In Tab. 1 sind die Hauptabmessungen der ausgelegten MGE zusammengestellt. Die MGE liefert eine Spitzenleistung

Tab. 1: Hauptabmessungen MGE

Parameter	Wert
Statorinnendurchmesser	129,7 mm
Poldurchmesser Stator	205,7 mm
Poldurchmesser Rotor	206,7 mm
Rotoraußendurchmesser	276,0 mm
axiale Ausdehnung	370,0 mm

von ca. 90 kW bei einem maximalen Phasenstrom von 370 A. Die maximale Drehzahl beträgt $n_{max} = 16500 \text{ min}^{-1}$. Sowohl rotor- als auch statorseitig wird NO20-Elektroblech eingesetzt.

3.3 CFK-Bandagierung

3.3.1 Materialien und Aufbau

Bei der Auslegung eines CFK-SMS sind die eingesetzten Materialien, deren Einsatzzweck und Zusammenspiel zu beachten. Da es sich bei dem SMS um einen Außenläufer handelt, wirken auf die rotierenden Bauteile hohe Fliehkräfte, die diese mechanisch stark beanspruchen. Die in der Auslegung der MGE ausgewählten Elektrobleche NO20 haben eine Dauerfestigkeit von bis zu 530 MPa. Auf den CFK-SMS werden im Betrieb Kräfte wirken, die diesen wechselnd beanspruchen, das hat zur Folge, dass der Metallrückschluss nur zu 45 % seiner Dauerfestigkeit belastet werden darf [4]. Daraus ergibt sich eine maximal mögliche Belastung des Metallrückchlusses von 240 MPa.

Zur Verringerung der Spannungen wird eine Bandage eingesetzt, welche die Dehnung der Bleche verringert. Für die Bandage ist ein CFK-Verbund vorgesehen, der unidirektional (UD) um die Rotationsachse verläuft. Der Vorteil der CFK-Bandage liegt in der geringen Dichte und der hohen Zugfestigkeit vor allem in Faserrichtung des CFK-Verbundes. In Tab. 2 sind die Festigkeitswerte Elastizitätsmodul E , Zugfestigkeit R_m und die Poissonzahl ν längs und quer zur Faserrichtung des CFK-Verbundes mit hochfes-

ter Kohlenstofffaser aufgeführt. Dabei handelt es sich um vorläufige Werte. Weitere Untersuchungen werden zeigen, inwieweit diese CFK-Matrix durch ein Laminat mit höheren Festigkeitswerten ersetzt wird. Aufgrund unterschied-

Tab. 2: Festigkeitswerte des CFK-Verbundes

Parameter	Wert
E_{laengs}	209 GPa
E_{quer}	9,45 GPa
$R_{m,laengs}$	1980 MPa
$R_{m,quer}$	260 MPa
ν_{laengs}	0,4
ν_{quer}	0,27

licher Versagensarten eines CFK-Verbundes [7], wie Faserbruch und Zwischenfaserbruch, sind diese unter Berücksichtigung geeigneter Versagenskriterien zu bewerten. Für die Bewertung der CFK-Bandage wird das *Composite Failure Tool* der *ANSYS Workbench* verwendet. Dieses Werkzeug bietet eine umfangreiche Auswahl unterschiedlicher Bewertungskriterien. So können Versagensgrenzen der CFK-Matrix in Faserrichtung und quer dazu ermittelt werden. Ein zuverlässiges und für den Anwendungsfall passendes Bewertungskriterium ist das *Puck-Kriterium*. Als weitere Kriterien werden maximale Spannungen und Verformungen im CFK-Verbund berücksichtigt. Das Tool analysiert die drei Bewertungskriterien und leitet daraus einen ganzheitlichen Sicherheitsfaktor ab. Im Detail kann der Belastungsfall elementspezifisch in jeder Schicht genauer untersucht werden.

Für die FEM-Berechnung wurde die Geometrie des Rotorrückchlusses zur Reduzierung des Rechenaufwandes vereinfacht. So wurden bspw. die Nuten nicht berücksichtigt. In Abb. 3 ist das 3D-Konstruktionsmodell mit seinen Geometrieparametern dargestellt. Es wurde ein metallischer Hohlzylinder innerhalb eines aus CFK bestehenden weiteren Hohlzylinders angeordnet. In den geometrischen Abmessungen wurden beide Zylinder in deren Höhen h , Wandstärken s , Abstand zwischen beiden Zylindern c und Durchmesser \varnothing variiert. Der CFK-Zylinder be-

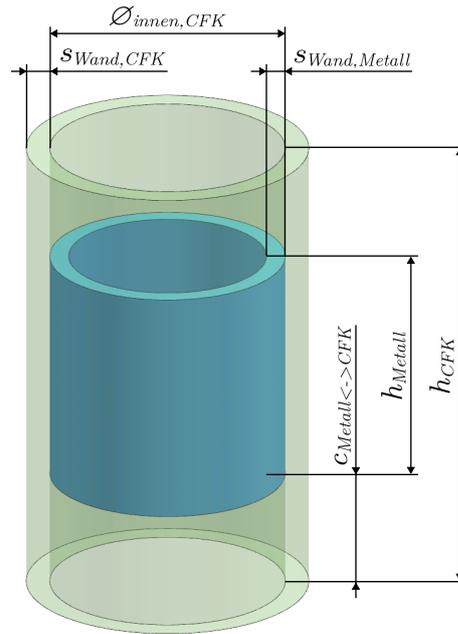


Abb. 3: Vereinfachtes 3D-Modell des CFK-SMS (grün: CFK-Bandage; blau: Metallrückchluss)

steht aus mehreren UD-gewickelten Schichten. Die Anzahl der Schichten und auch die Stärke jeder einzelnen Schicht wurden ebenfalls im Rahmen von Parameterstudien variiert. Das so spezifizierte Laminat ergibt die Wandstärke des Zylinders.

3.3.2 Berechnung von geometrischen Varianten für Motorauslegung

Die Abmessungen des CFK-SMS und die Drehzahl n wurde in möglichen Größen für die Motorauslegung variiert. In Tab. 3 sind die verwendeten Parameterintervalle zusammengestellt. Zur

Tab. 3: Intervalle für mögliche Abmessungen und Drehzahlen n für die 2D-FEM-Berechnung

Parameter	Intervall	
	min	max
$\varnothing_{innen,CFK}$	80 mm	1000 mm
$s_{Wand,CFK}$	10 mm	200 mm
$s_{Wand,Metall}$	30 mm	230 mm
n	500 min^{-1}	60000 min^{-1}

Reduzierung des Rechenaufwandes, der auch aus den Kombinationen innerhalb der Parame-

terintervalle im 3D-Modell resultiert, wurde ein 2D-Modell der Hohlzylinder (Abb. 4) erstellt.

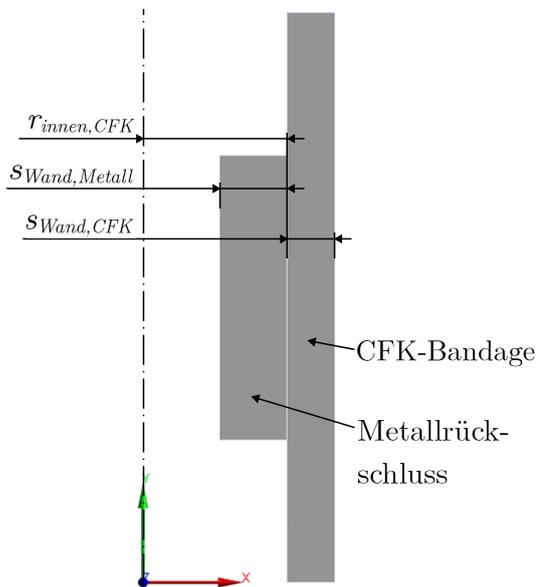


Abb. 4: Vereinfachtes 2D-Modell des CFK-SMS

Bei der Umstellung von 3D auf 2D ist darauf zu achten, dass nicht isotrope Materialeigenschaften physikalisch korrekt berücksichtigt werden. UD-CFK zeigt orthotropes Verhalten. Die Zugfestigkeit ist in Faserrichtung wesentlich höher, als quer dazu.

Zur Validierung der 2D-Berechnungen wurden ausgewählte Ergebnisse mit Hilfe des 3D-Vollmodells nachgerechnet. Abb. 5 und 6 stellen die Ergebnisse beider Modelle vergleichend gegenüber. Es ist zu erkennen, dass die Vergleichsspannung im 2D-Modell mit $\sigma_{Mises, Metall, 2D} = 361,5 \text{ MPa}$ zu der Vergleichsspannung im 3D-Modell mit $\sigma_{Mises, Metall, 3D} = 361,7 \text{ MPa}$ nur minimal voneinander abweichen. Nachteilig an der 2D-Berechnung ist, dass die Bewertungskriterien für CFK-Komponenten nicht funktionieren. Bei der Nachrechnung mit dem 3D-Modell ergab sich, dass die CFK-Bandage kaum belastet wird und der Metallrückschluss die größten Belastungen erfährt.

3.3.3 Weiterentwicklung des 3D-Modells auf belastungsgerechte Auslegung

Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurde das Modell weiter angepasst und optimiert. Für die

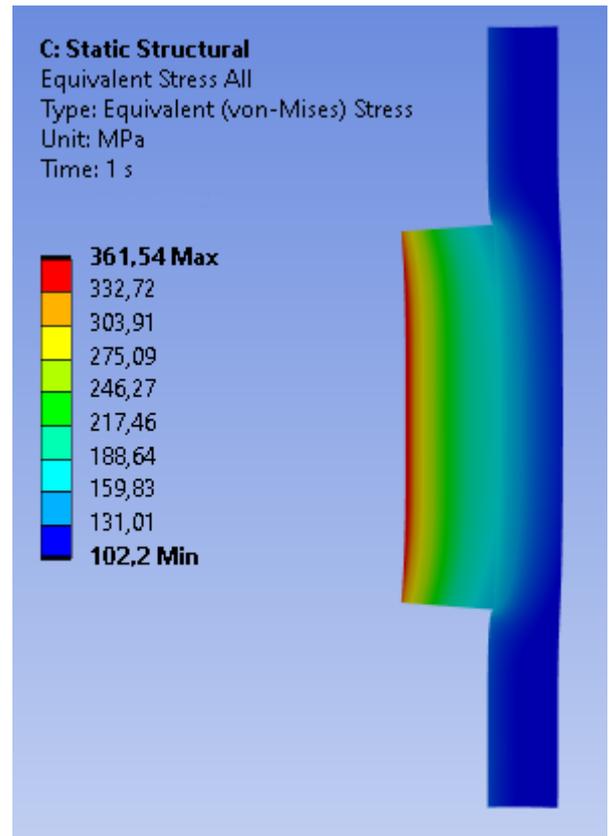


Abb. 5: Vergleichsspannungen in den Bauteilen im 2D-Modell

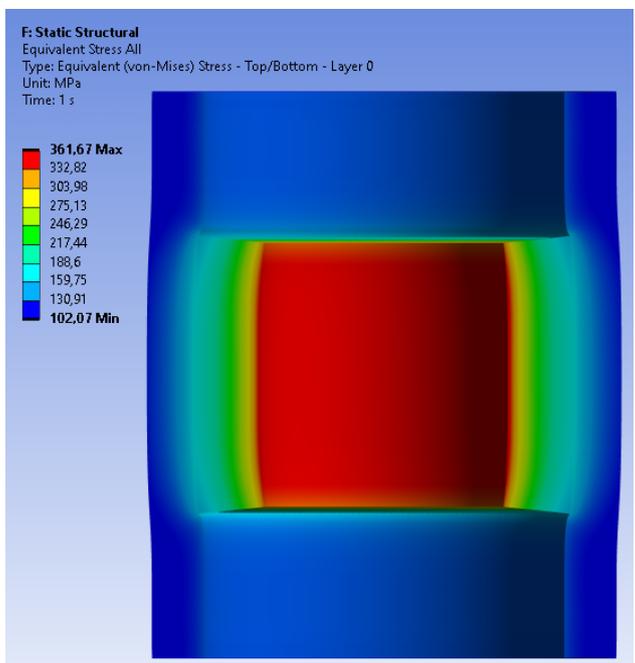


Abb. 6: Vergleichsspannungen in den Bauteilen im geschnittenen 3D-Modell

Untersuchung der Bandage ist ein 3D-Modell notwendig. Dies kann aufgrund des symmetrischen Aufbaues, als Teilmodell mit einem Aus-

schnitt von 10° der Vollzylinder ausgeführt sein, wie in Abb. 7 dargestellt. In weiteren Iterationen

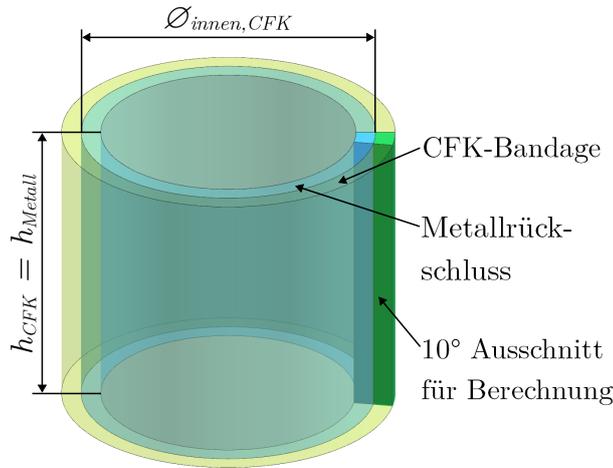


Abb. 7: Vereinfachter CFK-SMS mit Ausschnitt für das 3D-Teilmodell

wurden die Abmessungen des Motors und der CFK-Bandage weiter angepasst. Für eine gleichmäßigere Belastung der Bauteile wurde eine Vorspannung bzw. ein Übermaß zwischen beiden Teilen untersucht. In Tab. 4 sind die Ergebnisse der FEM-Berechnungen für verschiedene Übermaße bei einer Drehzahl von $n = 15000 \text{ min}^{-1}$ zusammengestellt. Es wird deutlich, dass die

Tab. 4: Einfluss des Übermaßes zwischen Metallrückschluss und CFK-Bandage bei einer Drehzahl von 15000 min^{-1}

Übermaß in mm	$\sigma_{Mises, Metall}$ in MPa	S_{CFK}
0,0	316,4	7,9
0,1	267,0	5,7
0,2	218,0	4,4
0,3	168,2	3,3

Erhöhung des Übermaßes großen Einfluss auf die Vergleichsspannung $\sigma_{Mises, Metall}$ und den Sicherheitsfaktor S_{CFK} der CFK-Bandage hat. Die Belastung im Metallrückschluss konnte deutlich reduziert und in der CFK-Bandage erhöht werden.

Weitere Untersuchungen für die Auslegung der CFK-Bandage wurden mit einem Übermaß

von $0,15 \text{ mm}$ durchgeführt. Bei diesem Übermaß ergibt sich eine Vergleichsspannung von $\sigma_{Mises, Metall} = 242 \text{ MPa}$ im Rückschluss und der Sicherheitsfaktor in der Bandage liegt bei $S_{CFK} = 5,0$.

In weiteren Iterationen wurde die Schichtdicke der Bandage und die Drehzahl zur Erhöhung des Energiegehaltes betrachtet. Bei einer Schichtdicke von 60 mm ist die Vergleichsspannung am geringsten und der Sicherheitsfaktor liegt über $S_{CFK} = 1,0$. Unter den festgelegten Randbedingungen kann die Maximaldrehzahl von $n_{max} = 16500 \text{ min}^{-1}$ erreicht werden. Durch die Optimierungen ergibt sich für den Metallrückschluss eine Vergleichsspannung von $\sigma_{Mises, Metall} = 214,2 \text{ MPa}$, wie in Abb. 8 dargestellt. Der maximale Wert für den Metallrückschluss ist an dem entsprechenden Knoten markiert. Der minimale Sicherheitsfaktor der CFK-Bandage liegt bei $S_{CFK} = 3,0$.

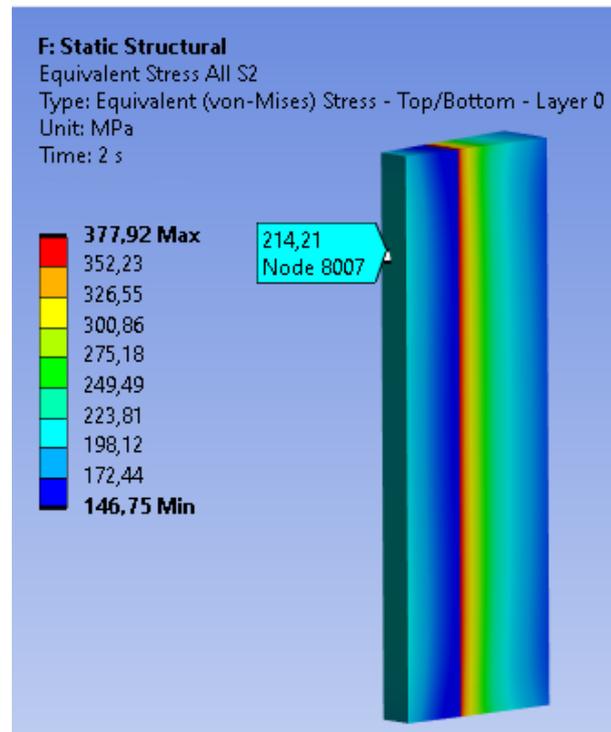


Abb. 8: Vergleichsspannung von CFK-Bandage und Metallrückschluss bei 16500 min^{-1} , einem Übermaß von $0,15 \text{ mm}$ und einer CFK-Wandstärke von 60 mm

Bei der Auslegung der Schwungmasse ist außerdem der Temperatureinfluss zu berücksichtigen. Die maximal anzunehmende Temperatur wurde

mit 120 °C festgelegt. Durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten dehnt sich der Rückschluss weiter, als das CFK. Die Materialien werden weicher und weiten sich in radialer und axialer Richtung. Dies hat zur Folge, dass der Rückschluss eine Vergleichsspannung von $\sigma_{Mises, Metall} = 105,3 \text{ MPa}$ und die CFK-Bandage einen Sicherheitsfaktor von $S_{CFK} = 1,6$ erreichen. Die Verringerung des Sicherheitsfaktors im CFK-Verbund entsteht durch die größere axiale Dehnung des Metallrückschlusses und die geringere Belastung des CFK-Verbundes quer zur Faser.

3.4 Abstimmung der Speicherkapazität auf die Maschinencharakteristik

Erste Iterationen zur Auslegung des FKV (Abschnitt 3.3) haben gezeigt, dass dessen Anforderungen zur Herstellung der mechanischen Stabilität (Bandagierung) und Abstimmung einer ausreichend großen Speicherkapazität (ausreichend großes Massenträgheitsmoment) nicht in Einklang gebracht werden konnten. Die FKV-Wandstärken wuchsen zu stark auf und eine Fliehkraftbeanspruchung würde interlaminar zu einem Verlust der Strukturintegrität (Strukturversagen) führen. Daher müssen die funktionellen Anforderungen am Leichtbau entkoppelt werden.

Die Lösung kann ein konstruktiver Designvorschlag nach Abb. 9 sein. Es wird eine CFK-Speichenstruktur appliziert. Sie bildet die Anschlusskonstruktion zwischen der innenliegenden Bandage und einem äußeren Hohlzylinder. Dessen Wandstärke – und damit seine spezifische Masse und Massenverteilung – kann in Grenzen eingestellt werden und variiert nach aktuellen Erkenntnissen die Bruttospeicherkapazität des Referenzdesigns zwischen 3 – 10 kWh.

Dieser innovative Ansatz erlaubt einen modularen Aufbau eines hinsichtlich Leistungsentfaltung und Energiegehalt abstimmbaren Speichers.

3.5 Magnetlagerung

Ziel bei der Lagerauslegung ist es, die Verluste und damit die Eigenentladung des SMS mög-

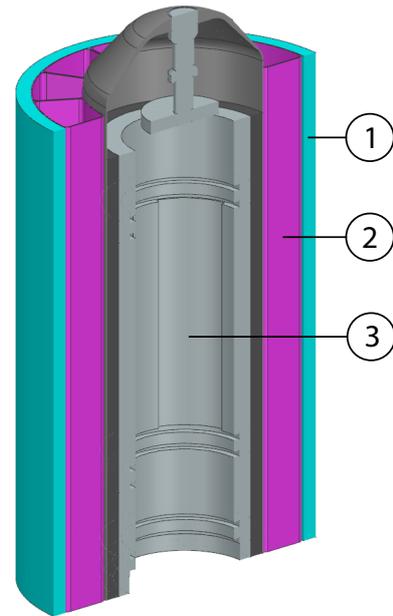


Abb. 9: Leichtbaustruktur zur Einstellung der Speicherkapazität (1 Hohlzylinder; 2 Speichenstruktur; 3 Glockenläufer)

lichst minimal zu halten. Aufgrund der hohen angestrebten Drehzahl des SMS sind sehr hohe Relativgeschwindigkeiten von $v_{rel} > 200 \text{ ms}^{-1}$ zwischen Rotor und Stator zu erwarten. Daher sind für die radiale Lagerung homopolare Magnetlager vorgesehen, um die Verluste durch Ummagnetisierung gering zu halten. Die Lager werden für den Betrieb ohne Grunderregung ausgelegt. So treten ohmsche Verluste nur beim Kompensieren von Störkräften auf. Für die axiale Lagerung ist ein Topfmagnet im oberen Bereich der Schwungmasse vorgesehen. Dieser wird als Hybridmagnet ausgeführt. Das bedeutet, dass die Gewichtskraft durch einen Permanentmagneten kompensiert wird. Dies trägt ebenfalls zur Reduzierung der Lagerverluste bei.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Fokus der bisherigen ingenieurwissenschaftlichen Arbeiten lag auf der belastungsgerechten Gestaltung eines hybriden Metall-FKV-Verbundes einer Hochgeschwindigkeitschwungmasse. Moderne Werkstoffe und innovative Faserkunststoffverbundkonstruktionen lassen die Integration metallischer Rotorkomponenten einer leistungsfähigen SRM grundsätz-

lich zu.

In einem ersten Schritt wurde die MGE vorausgelegt. In einem zweiten Schritt erfolgte die konstruktive Gestaltung einer CFK-Bandagierung der rotorseitigen Magnetkreisrückschlüsse. Die bisherigen Ergebnisse und Erfahrungen lassen den Schluss zu, dass die Erschließung des Drehzahlbereiches bis $16\,500\text{ min}^{-1}$ mit einer leistungsfähigen SRM bei bis zu 90 kW elektrischer Antriebsleistung machbar ist.

Beide Teilsysteme wurden im Rahmen von Parameterstudien optimiert. Während für das optimale SRM-Design die PSO Anwendung fand, wurden zur Gestaltung der CFK-Bandage auslegungsrelevante Parameter kombiniert und in technisch machbaren Intervallen manuell variiert.

Die Verifikation der Auslegungsergebnisse erfolgte in beiden Schritten durch die Kombination analytischer Berechnungen mit FEM-Analysen.

Fortführung der Arbeiten

Gegenwärtig wird die Speicherkapazität des SMS auf die Maschinencharakteristik abgestimmt. Dazu wird geprüft, inwieweit unter Anwendung einer innovativen Speichen- und Hohlzylinderkonstruktion aus FKV die geforderte Speicherkapazität eingestellt werden kann. Aus Sicht der belastungsgerechten Gestaltung sind 3 – 10 kWh machbar. Die Abstimmung zwischen Maschinenleistung und Speicherkapazität legt den Einsatzzweck – unterbrechungsfreie Stromversorgung oder dynamischer Speicher zur schnellen Kompensation von Leistungsfluktuationen – fest.

Parallel dazu werden die Arbeiten am Gestaltungskonzept der Magnet- und Fanglagerung fortgeführt. Das Gestaltungskonzept des rotatorischen Antriebes wird durch Untersuchungen zum generatorischen Betrieb der SRM – und insbesondere zum Entwurf der Modellgleichungen für dynamische Simulationen – fortgeschrieben.

Ausblick

Perspektivisch werden die ingenieurwissenschaftlichen Arbeiten am Thermomanagement des SMS-Systems fortgeführt. Die Umfangsgeschwindigkeiten erfordern einerseits – zur Reduzierung der Reibverluste – den Betrieb in einer Mischgasatmosphäre aus Luft und Helium bei reduziertem Druck. Andererseits müssen die arbeitspunkt- und lastabhängigen Ummagnetisierungs- und Kupferverluste (im einstelligen kW-Bereich) abgeführt werden. Dazu wird ein Wärmemanagementsystem auszulegen sein.

Weiterhin werden die Arbeiten zur Vorauslegung der mechatronischen Komponenten abgeschlossen. Dem schließen sich Aktivitäten zur Herstellung des fertigungsgerechten Designs an. Dazu werden umfangreiche Untersuchungen zur Analyse der Rotordynamik notwendig. Die Ergebnisse und Erkenntnisse fließen in die Festlegung von Toleranzketten zur Herstellung

- definierter Luftspalte zwischen Rotor und Stator,
- einer ausreichenden Konzentrität und
- der geforderten Wuchtgüte von $G = 2,5$ oder $G = 1,7$.

einschließlich der notwendigen Fertigungs- und Montagetechnologien.

Förderhinweis

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

References

1. BUND DER ENERGIEVERBRAUCHER (Hrsg.). *Stromspeicher-Technologien im Vergleich* [online]. [besucht am 2023-06-26]. Abger. unter: https://www.energieverbraucher.de/de/Energiebezug/Strom/Batterien__627/ContentDetail__3218.
2. KRISHNAN, R.; ARUMUGAN, R.; LINDSAY, J. F. Design procedure for switched-reluctance motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1988, Jg. 24, Nr. 3, S. 456–461.
3. LI, X.; MITTELSTEDT, C.; BINDER, A. A Review of Critical Issues in the Design of Lightweight Flywheel Rotors with Composite Materials. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*. 2022, vol. 139, no. 2, S. 204–221.
4. MUHS, D.; WITTEL, H.; JANNASCH, D.; VOSSIEK, J. *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
5. NEUMANN, H.; WORLITZ, F. Magnetlagerauslegung unter Nutzung der Particle-Swarm-Optimization. In: *Proceedings 12. Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Chemnitz*. Zittau, 2019, S. 47–54.
6. SCHAEDE, H. *Dezentrale elektrische Energiespeicherung mittels kinetischer Energiespeicher in Außenläufer-Bauform*. 2014. Diss. TU Darmstadt.
7. SCHÜRMAN, H. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbund*. Springer, 2004.