

# Antriebssysteme 2015

Elektrik, Mechanik,  
Fluidtechnik in der Anwendung



# VDI-Berichte 2268

# **Kinelectric Drive – Hochdrehzahl Antriebssystem mit integriertem kinetischen Energiespeicher**

**D. Butterweck**, M. Sc.

Dipl.-Ing. **M. Hombitzer**

Dipl.-Ing. **D. Franck**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. **K. Hameyer**

Institut für Elektrische Maschinen, RWTH Aachen University

## **Kurzfassung**

Für eine breite Markteinführung elektrifizierter Antriebsstränge in Kraftfahrzeugen oder mobilen Arbeitsmaschinen stellen die Kosten der Energiespeicher eine Hürde dar. Daher ist das Ziel, die Systemkosten durch innovative Antriebskonzepte zu reduzieren. Die heutzutage meist eingesetzten Traktionsbatterien auf Lithium-Ionen Basis weisen eine hohe Energiedichte auf. Durch die in der Anwendung auftretenden hohen Leistungsspitzen, beispielsweise bei der Rekuperation von Bremsenergie, wird die Lebensdauer der chemischen Speicher reduziert. Eine Ergänzung des Antriebssystems um einen Schwungradspeicher stellt dagegen eine aussichtsreiche Alternative dar um die geforderten Eigenschaften von hoher Energie- sowie Leistungsdichte bei gleichzeitig hoher Lebensdauer erfüllen zu können. Durch die nun geringeren Anforderungen an die Traktionsbatterie und dem zusätzlichen kinetischen Energiespeicher können die Gesamtsystemkosten reduziert werden. Durch das innovative Konzept einer hochintegrierten Einheit von Schwungradspeicher und Elektromotor in Kombination mit einem variablen Übersetzungsgetriebe wird eine Antriebseinheit geschaffen, mit der eine kostengünstige Elektrifizierung von Fahrzeugen ermöglicht wird. Für die Auslegung der elektrischen Maschine unter diesen Randbedingungen ergeben sich besondere Herausforderungen. Zur Erzielung der geforderten Energiedichten muss der Rotor der Maschine hohe Drehzahlen im Bereich von  $45.000 \text{ min}^{-1}$  bei gleichzeitig großem Durchmesser aufweisen. Die resultierende Fliehkraftbelastung muss bei der Identifizierung geeigneter Materialien und beim Entwurf zwingend berücksichtigt und bewertet werden. Die Schwungradmasse, und somit auch die elektrische Maschine, muss hinsichtlich geringer Selbstentladung unter technischem Vakuum betrieben werden. Hierdurch ergeben sich besondere Fragestellungen hinsichtlich der thermischen Belastung des Rotors. In diesem Beitrag werden Vor- und Nachteile verschiedener elektrischer Maschinentopologien für den kinelektrischen Antriebsstrang vorgestellt.

Weiterhin werden Herausforderungen bei der Auslegung dieser elektrischen Antriebsstränge sowie entsprechende Lösungsansätze vorgestellt.

## **1. Einleitung**

Der Verkehrssektor nimmt einen Anteil von rund 16% der Treibhausgasemissionen in Deutschland ein (Stand 2012) [1]. Die Automobiltechnik leistet mit ihren Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen im Bereich der Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen entscheidende Beiträge zu den gesellschaftlichen und politischen Zielen der Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, der Verringerung von klimaschädlichen Emissionen und der Sicherung der Mobilität. Im Bereich der Antriebsentwicklung wird dazu eine Vielzahl komplementärer Konzepte und Lösungen erarbeitet. Sie reichen von so genannten Mild- über Voll-, Range Extended- (REEV) und Plug-In Hybrid- (PHEV) bis zu Batterie-Elektrischen Fahrzeugen (BEV oder EV) mit jeweils unterschiedlichen Graden der Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Obwohl bereits ein Zuwachs dieser Antriebstopologien in Kraftfahrzeugen des Individualverkehrs und in mobilen Arbeitsmaschinen verzeichnet werden konnte, bleibt eine breite Markteinführung vor Allem durch die noch hohen Systemkosten bisher aus. Trotz stetiger Fortschritte bei der Entwicklung der eingesetzten chemischen Energiespeicher werden diese auch in absehbarer Zukunft einen entscheidenden Anteil an den Systemkosten eines EVs haben. Zudem sind entsprechende State-of-the-Art Lithium-Ionen Batterien für hohe Lade- und Entladeleistungen, wie sie bei alltäglichen Brems- und Beschleunigungsmanövern auftreten, nicht ohne Reduzierung ihrer Lebensdauer geeignet. Die heute erreichbaren Boost- und Rekuperationsleistungen sind dadurch deutlich eingeschränkt. In direkter Folge bleiben elektrische Reichweiten von EVs und die mögliche Schadstoff-Einsparung von HEVs hinter den erreichbaren Potentialen zurück. Die Ergänzung des Antriebsystems um einen Schwungradspeicher stellt eine aussichtsreiche Alternative dar, um die geforderten Eigenschaften von hoher Energie- sowie Leistungsdichte bei gleichzeitig erhöhter Lebensdauer des Gesamtantriebsstrangs kostengünstig erfüllen zu können. Einen Beitrag hierzu liefert das in Kooperation mit GKN Driveline seit Januar 2015 durchgeführte und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderte Projekt „Kinelectric Drive“ (Förderkennzeichen 01MY14006B), welches eine Gesamtlaufzeit von 36 Monaten besitzt.

## **2. Antriebssysteme mit kinetischem Energiespeicher**

Das genannte Projekt hat zum Ziel ein neuartiges und kostengünstiges Antriebssystem für zukünftige Hybrid- und Elektrofahrzeuge zu entwickeln und die Funktionsfähigkeit anhand eines aufgebauten Demonstrators zu belegen. Dieses System zeichnet sich durch ein erhöhtes Beschleunigungsvermögen sowie eine große Fähigkeit zur Energierückgewinnung und -speicherung aus. Zudem kann der chemische Energiespeicher hinsichtlich hoher Energiedichten optimiert werden. Schwungradspeicher können durch ihre hohe Leistungsdichte bei gleichzeitig langen Lebensdauern von mehr als  $10^6$  Zyklen und einem geringen Wartungsaufwand einen bedeutenden Beitrag hierzu liefern [2]. Bei kinelektrischen Systemen kann der Elektromotor durch Abbremsen des Schwungrads kinetische in elektrische Energie wandeln. Durch Beschleunigen des Schwungrads wird elektrische in kinetische Energie gewandelt, wodurch der kinelektrische Leistungsfluss entsteht. Studien zeigen, dass der Schadstoffausstoß sowie Kraftstoffverbrauch eines Hybridfahrzeugs durch den Einsatz von Schwungradspeicherung besonders bei Fahrszenarien mit häufigen Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen stark reduziert werden kann [3]. Die Integration von Schwungradspeichern in den Antriebsstrang von Hybrid- und Elektrofahrzeugen hat sich daher bereits neben dem Motorsport insbesondere im Bereich des öffentlichen Personennahverkehrs etabliert. Die entwickelten Systeme weisen dabei entsprechend hohe Leistungen und Energieinhalte auf. Zur Erzielung dieser Leistungen werden die Systeme nahezu durchgängig für Hochvolt-Bordnetze mit mehreren hundert Volt ausgelegt. Das Projekt „highFly“ der Traktionssysteme Austria GmbH in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Graz besitzt eine nutzbare gespeicherte mechanische Energie von 900 Wh bei einer Spitzenleistung von 145 kW (700 Volt Bordnetzspannung). Der Rotor besteht aus hochfestem kobaltlegiertem Elektroband. Der gesamte Energiespeicher inklusive Wechselrichter hat eine Masse von 300 kg [4]. Im Rahmen des Programms „Neue Energien 2020“ des Klima- und Energiefonds wird ein Speichersystem mit einem Energieinhalt von 270 kJ bei 20 kW Maximalleistung zur Anwendung in Hybrid- und Elektrofahrzeugen mit Bordnetzspannungen von 300 V - 400 V entwickelt. Der ebenfalls aus kobaltlegiertem Blech aufgebaute Rotor wird hierbei durch eine Kombination aus herkömmlichen Wälzlagern und einer Magnetlager-Unterstützung gelagert [5]. 2014 gab das Unternehmen GKN Hybrid Power den Erwerb der Williams Hybrid Power-Technologie, welche zuvor in der Formel 1 eingesetzt wurde, bekannt. Unter dem Namen „Gyrodrive“ wurde es seither für den Einsatz im öffentlichen Personennahverkehr modifiziert. Als

Energiespeicher wird hierbei ein Schwungrad verwendet, welches bis zu 1,8 MJ speichern und 120 kW Leistung abgeben kann [6].

### **3. Kinelectric Drive**

Das KinelectricDrive Antriebssystem soll sowohl als elektrischer Hauptantrieb eines kleinen Elektrofahrzeuges als auch als Antrieb in der Sekundärachse eines sogenannten „Axle-split“ Hybridfahrzeuges im B/C Segment eingesetzt werden. Durch ein Gewicht unter 30kg kann das neuartige Antriebssystem leicht in bestehende Triebstränge integriert und zur Hybridisierung von Getrieben und Allradssystemen verwendet werden. Entgegen der marktüblichen Hybridsysteme, welche häufig auf Bordnetzspannungen im Bereich von 200 bis 600 Volt ausgelegt sind, wird bei Kinelectric Drive eine Bordnetzspannung von 48 Volt verwendet, welche sich zunehmend in Mild-Hybrid-Applikationen etabliert hat. Gründe hierfür sind die geringeren Sicherheitsanforderungen ( $\leq 60$  Volt) und die sich daraus ergebenden Vorteile bei der Wartung und der Schulung von Fachpersonal. Das Kinelectric Drive System besitzt eine elektrische Spitzenleistung von rund 15 kW wodurch sich maximale Stromstärken von 400 A ergeben. Durch den kinelektrischen Ansatz kann die Gesamtsystemleistung auf rund 45 kW angehoben werden, wodurch Funktionalitäten, welche üblicherweise Voll-Hybrid Fahrzeugen vorbehalten sind, ermöglicht werden. Der mechanische sowie elektrische Leistungsweig arbeiten dabei parallel und ergänzen sich. Das Antriebssystem besteht aus einem Elektromotor mit vollständig integriertem Schwungradspeicher, welcher einen Energieinhalt von 360 kJ aufweist. Damit kann ein Großteil der Brems- und Beschleunigungszyklen des Individualverkehrs im urbanen Bereich abgedeckt werden. Zur Entkopplung von Abtriebs- und Schwungradrehzahl wird ein infinit-variables Übersetzungsgetriebe (IVT) benötigt (Bild 1). Neben rein mechanischen Konzepten des Übersetzungsgetriebes wird im Projekt auch der Einsatz eines elektrischen Getriebekonzepts untersucht. Das auf Leistungsverzweigung durch einen zweiten Elektromotor zur Drehzahlanpassung beruhende Konzept zeichnet sich durch eine hohe Regelgüte und Stellgeschwindigkeit aus. Um aerodynamische Reibungsverluste zu verringern, werden der Schwungradspeicher, und damit auch die elektrische Maschine, im technischen Vakuum betrieben. Da somit keine thermische Konvektion stattfinden und Wärmeenergie nur durch Strahlung und über die Lager abgegeben werden kann, verkompliziert sich die Kühlung der elektrischen Maschine. Um die gewünschten Lebensdauern zu erzielen sind zudem zusätzliche Anforderungen an die

Vakuuntauglichkeit der verwendeten Materialien, wie z.B. der Wicklungsisolation sowie der Lagerschmierstoffe, zu stellen. Eine verschleissfreie Magnetlagerung ist aufgrund der ohnehin bereits schlechten thermischen Ankopplung des Rotors für solche Einsatzzwecke ungeeignet. Auf häufiger verwendete Magnetlager-Unterstützung in Kombination mit herkömmlichen Wälzlagern wird im Projekt aus Kostengründen verzichtet. Die ganzheitliche Betrachtung und Optimierung des Antriebssystems wird aufgrund der hohen Komplexität und der multidimensionalen Abhängigkeiten mittels Simulationen auf Basis eines übergreifenden Gesamtsystemmodells durchgeführt. Mit Hilfe der Simulation werden verschiedene Antriebsstrangkfigurationen unter Berücksichtigung der optimalen Kombination von elektromotorischem und Schwungradantrieb und des Übersetzungsgetriebes hinsichtlich Verbesserung der Fahrleistung, Erhöhung der Reichweite und der Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes untersucht und bewertet. Zudem werden mit Hilfe des Modells Betriebsstrategien zum effizienten Einsatz des Kinelectric Drive Systems erarbeitet.

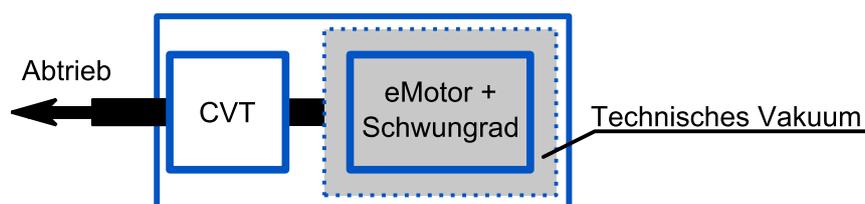


Bild 1: Konzept Kinelectric Drive.

#### 4. Entwurf der elektrischen Maschine und des Schwungrads

Die Herausforderung beim Entwurf der Komponenten besteht nun darin, trotz der hohen mechanischen und thermischen Belastungen ein Antriebssystem mit hohem Gesamtwirkungsgrad und Robustheit bei gleichzeitig geringen Kosten zu entwickeln. Erst dann kann das Potential des Antriebssystems durch häufige Wandelprozesse zwischen kinetischer und elektrischer Energie vollständig ausgenutzt werden. Für die Auswahl der elektrischen Maschine sind vor Allem die thermische Belastung sowie die mechanische Festigkeit des Rotors zu beachten. Die Auslegung der elektrischen Maschine muss daher unter stetiger Betrachtung der mechanischen, elektromagnetischen und thermischen Gegebenheiten durchgeführt werden. Im Folgenden wird die Eignung gängiger Maschinenarten zum Einsatz unter den vorher genannten Randbedingungen bewertet. Zudem werden Konzepte zur Integration von Schwungradmasse und Motor betrachtet.

- **Permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM)**

Im Bereich der Traktionsantriebe wird die permanentmagneterregte Synchronmaschine aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte sowie ihres hohen Wirkungsgrades im Teillastbereich bevorzugt eingesetzt. Durch den Einsatz von Permanentmagneten ergeben sich jedoch prinzipbedingt Schleppverluste im Leerlauf, die zur Selbstentladung des Schwungrads führen würden. Besonders im Stadtverkehr mit häufigen Start-Stopp-Phasen ist dies hinsichtlich einer effizienten Energienutzung nicht zweckmäßig. Um eine Entmagnetisierung des Magnetmaterials zu vermeiden, muss der mögliche Temperaturbereich eingeschränkt werden. Zudem besteht eine Abhängigkeit von strategischen Materialien.

- **Asynchronmaschine (ASM)**

Klassische ASM werden mit einem Kurzschlusskäfig im Rotor ausgeführt. Bei Hochdrehzahlanwendungen ist allerdings die mechanische Festigkeit der Kurzschlussendringe problematisch. Durch die schlechte thermische Kopplung des Rotors im technischen Vakuum sind die prinzipbedingt hohen ohm'schen Rotorverluste der Asynchronmaschine kritisch zu bewerten.

- **Geschaltete Reluktanzmaschine (SRM)**

Die Wirbelstromverluste durch Flusspulsationen im Rotoreisen sind im Vergleich mit synchronen Maschinenkonzepten deutlich höher, was zu entsprechenden Problemen bei der Kühlung des Rotors führt. Durch die Geräuschentwicklung von geschalteten Reluktanzmaschinen ist die Einbaulage im Fahrzeug stark eingeschränkt.

- **Synchronreluktanzmaschine (SynRM)**

Die Synchronreluktanzmaschine nutzt zur Drehmomentbildung die magnetische Reluktanz wie sie auch bei der PMSM mit vergrabenen Magneten genutzt wird. Da die Erregung allerdings nicht durch Permanentmagnete geschieht, treten keine Schleppverluste im Leerlauf auf. Sie zeichnet sich durch eine robuste Rotorkonstruktion mit geringem Fertigungsaufwand aus. Da keine ohm'schen Verluste im Rotor auftreten, sind die Rotorverluste geringer als die der ASM. Die elektromagnetischen Eigenschaften der SynRM werden stark durch die Flussführung im Rotor mittels magnetischen Vorzugsrichtungen und Flussperren beeinflusst. Die hohe mechanische Belastung im Rotor erlaubt hier jedoch nur robuste Rotorbauformen ähnlich denen der SRM.

Für die Anwendung in Kinelectric Drive erscheint die SynRM, durch die geringen Rotorverluste und die mechanische Festigkeit, als besonders geeignet und wird deshalb im ersten Entwurfsschritt weiter verfolgt.

#### 4.1 Mechanische Auslegung

Die kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$  eines rotierenden Körpers lässt sich mittels seinem Massenträgheitsmoment  $J$  sowie seiner Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  bestimmen. Der Rotor einer elektrischen Maschine kann näherungsweise als Hohlzylinder, welcher um seine Symmetrieachse rotiert (Bild 2), abgebildet werden.

Mit dem Massenträgheitsmoment eines solchen Körpers mit Dichte  $\rho$  und Masse  $m$

$$J = \frac{1}{2} m (r_i^2 + r_a^2) = \frac{1}{2} \rho l \pi (r_a^2 - r_i^2) (r_i^2 + r_a^2) = \frac{1}{2} \rho l \pi (r_a^4 - r_i^4)$$

folgt für die kinetische Energie in Abhängigkeit der geometrischen Abmessungen und der Drehzahl  $n$ :

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{4} \rho l \pi (r_a^4 - r_i^4) \omega^2 = \rho l \pi^3 (r_a^4 - r_i^4) n^2$$

Es ist ersichtlich, dass hohe Energiedichten vor

Allem durch hohe Drehzahlen bei gleichzeitig großem Aussenradius, und damit hohen Umfangsgeschwindigkeiten, erzielt werden können. Die resultierenden Fliehkraftbelastungen stellen eine große Herausforderung im Design der elektrischen Maschine dar und müssen durch eine geeignete Integration von Schwungmasse und Motor beherrscht werden. Denkbare Varianten sind in Bild 3 skizziert. Im Fall A ist die Maschine als Aussenläufer ausgeführt. Durch den großen Rotorradius lassen sich hohe kinetische Energiedichten auf kleinem radialem Bauraum erzielen, jedoch muss zusätzlicher Aufwand für den Berstschutz betrieben werden. Bedingt durch den kleinen Statorbauraum im Inneren sind hohe Stromdichten und somit hohe Kupferverluste zu erwarten, welche sich zudem schlecht thermisch abführen lassen. Es resultiert eine hohe thermische Belastung des Stators. Im Fall B wird die Maschine als Innenläufer ausgeführt und die gesamte Schwungmasse durch den magnetisch aktiven Teil des Rotors gebildet. Der Stator dient hier als Berstschutz. Diese Variante ist jedoch aufgrund der hohen Fliehkraftbelastung mit siliziumlegiertem Elektrobänd im vorliegenden Fall nicht realisierbar und würde zudem den zulässigen Bauraum in radialer Richtung überschreiten. Die Konstruktionsvariante C zeichnet sich durch einen magnetisch aktiven Rotorteil und einen passiven Schwungmassenteil aus. Die Teile können hierbei unabhängig voneinander dimensioniert werden. Der aktive Rotorteil kann hinsichtlich seiner elektromagnetischen Eigenschaften optimiert werden. Der zusätzlich benötigte Energieinhalt wird durch die passive Schwungmasse gebildet. Die Verwendung anderer

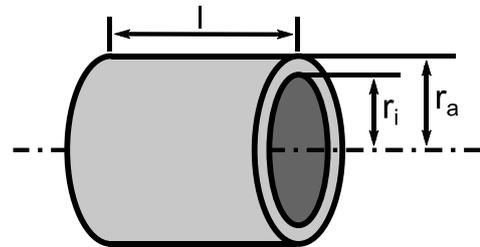


Bild 2: Hohlzylinder, der um seine Symmetrieachse rotiert.

Materialien für die passive Schwungmasse wie z.B. faserverstärkten Werkstoffen, ist bei Bedarf möglich. Für die Integration in Kinelectric Drive wird die Variante C mit aktivem und passivem Rotorteil verwendet. Die Abmessungen des Aktivteils werden dabei mittels Fliehkraftberechnungen so bestimmt, dass der Energieinhalt unter Einhaltung der zulässigen Materialspannung maximiert wird. Hieraus ergibt sich als erster Richtwert ein Rotordurchmesser des Aktivteils von rund 100 mm. Dies entspricht einer maximalen Umfangsgeschwindigkeit von rund 235 m/s. Als Material für den aktiven Rotorteil werden Hochfeste Siliziumlegierte Elektrobandsorten mit 0,2%-Dehngrenzen von mindestens 500 MPa eingesetzt. Auf Hochfeste Kobaltlegierte Elektrobandsorten mit 0,2%-Dehngrenzen im Bereich von 800 MPa wird aus Kostengründen verzichtet. Nach aktuellem Entwicklungsstand ergeben sich am passiven Rotorteil Umfangsgeschwindigkeiten von circa 400 m/s. Aufgrund des aufwendigeren Fertigungsprozesses soll bei dem passiven Schwungmassenteil der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen vermieden werden. Durch eine intelligente Anordnung der Komponenten kann bei einem vollständigen Rotorversagen die kinetische Energie sicher abgebaut werden und somit die Anforderungen an das Gehäuse minimiert werden.

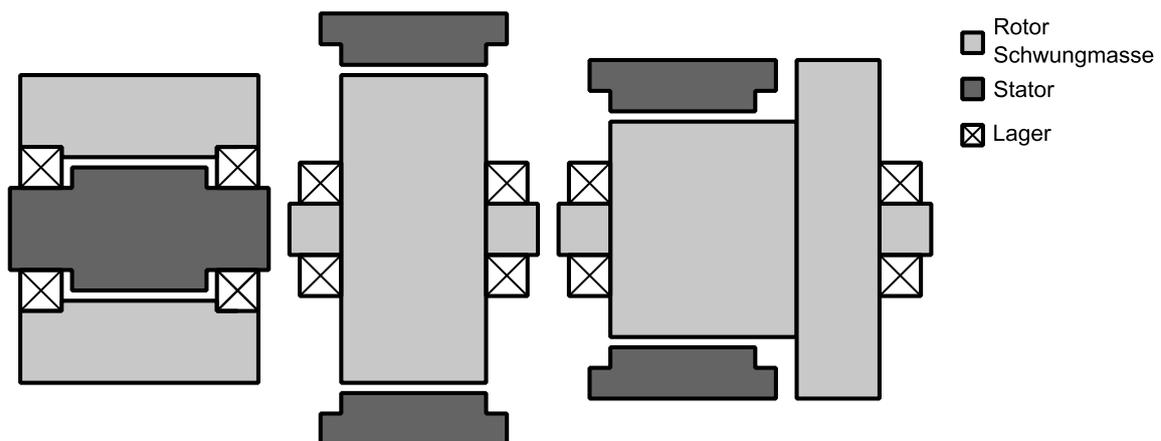


Bild 3: Mögliche Integrationsvarianten von Schwungmasse und Motor.  
 Variante A (Links), Variante B (Mitte), Variante C (Rechts).

Bild 4 zeigt beispielhaft erste Fliehkraftberechnungen eines für elektromagnetisch optimierte Eigenschaften typischen Rotordesigns einer SynRM. Durch die schmalen Stegbreiten, welche der Erzielung hoher Reaktanz dienen, überschreiten die von-Mises-Spannungen besonders im Bereich dieser Flussperren die zulässigen Dehngrenzen des Materials von 500 MPa um Größenordnungen. Selbst durch Anpassung der Stegbreiten hinsichtlich mechanischer Festigkeit ist ein ausreichendes Ergebnis mit solch einem

mehrlagigem Rotordesign nicht zu erwarten. Die Literatur liefert eine Vielzahl von robusten Rotortopologien für Hochdrehzahl SynRM. Ein möglicher Ansatz ist in Bild 4 (rechts) gezeigt [4]. Die Reluktanz wird hier durch die ausgeprägten Zähne erreicht. Die Löcher dienen der axialen Verschraubung des Blechpakets und erhöhen somit die Festigkeit. Mit diesem Design können die Von-Mises-Spannungen reduziert und die Anforderungen an die mechanische Festigkeit letztlich erfüllt werden (Bild 4 rechts). Die maximalen Spannungen treten nun im Bereich der Welle-Nabe-Verbindung auf, was bei der späteren Feinauslegung des Rotors einer detaillierten Betrachtung bedarf.

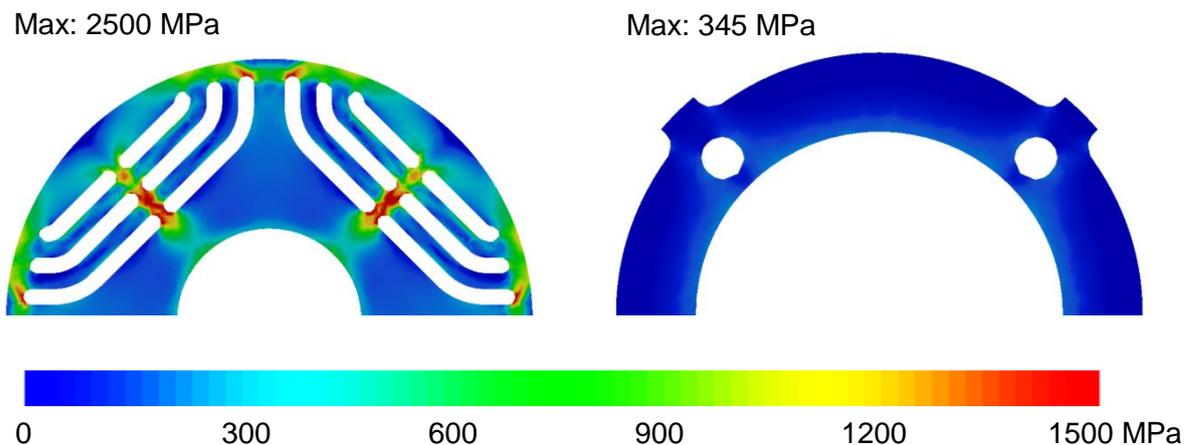


Bild 4: Von-Mises-Spannung für ein mehrlagiges SynRM Rotordesign (links) und ein robustes Design mit ausgeprägten Zähnen (rechts) bei  $55.000 \text{ min}^{-1}$  ( $1,2 n_{\text{max}}$ ).

## 4.2 Elektromagnetische und thermische Auslegung

Aus den bisherigen Überlegungen ergibt sich eine erste mechanisch robuste Rotorgeometrie. Im folgenden Verlauf muss untersucht werden, ob die elektromagnetischen Anforderungen mit diesem mechanisch optimierten Design erfüllt werden können. Hierzu wird zunächst eine analytische Grobauslegung zur Dimensionierung der Statortopologie durchgeführt. Im Anschluss wird durch Finite-Element-Berechnungen die Auslegung detailliert. Um die frequenzabhängigen Verluste möglichst gering zu halten und zudem eine robuste Regelung der Maschine zu gewährleisten, wird die elektrische Grundfrequenz des Statorwicklungssystems auf 2kHz beschränkt. Im Hinblick auf eine günstige Polteilung wird somit im ersten Entwurfsgang ein 4-poliges Design gewählt. Zur Verringerung der Pulsationsverluste im Statorzahn, welche durch Einsattelungen der Felderregerkurve infolge der Nutöffnungen auftreten, wird eine verteilte, 3-strängige Wicklung mit 24 Statornuten verwendet. Durch den Einsatz von Haarnadelwicklungen kann ein kompakter Wickelkopf erzielt und somit der axiale Bauraum reduziert werden. Die hohen Nutfüllfaktoren von 70 bis 80% erlauben

zudem die Erzielung der angestrebten Leistungsdichte. Unter Zuhilfenahme von Richtwerten für die Induktionen und der zulässigen Stromdichten werden die geometrischen Abmessungen des elektromagnetischen Kreises ermittelt. Im Hinblick auf die zulässigen Verluste bzw. Erwärmung der Maschine müssen diese Richtwerte, und damit das Design, im Verlauf der Auslegung mit Hilfe von thermischen und elektromagnetischen Simulationen iterativ angepasst werden. Erste Ergebnisse zeigen, dass die geforderten mittleren Drehmomente erreicht werden und die thermischen Grenzen eingehalten werden können. In folgenden Schritten wird das Design im Hinblick auf eine Minimierung der Verluste verfeinert.

## **5. Fazit und Ausblick**

Die Integration von Schwungradspeichern in den Antriebsstrang von Hybrid- und Elektrofahrzeugen liefert einen vielversprechenden Ansatz zur Erreichung der Klimaziele 2020. Das vorgestellte Projekt „Kinelectric Drive“ entwickelt eine hochintegrierte Einheit von Schwungrad, Elektromotor und variablem Übersetzungsgetriebe. Unter Berücksichtigung der besonderen thermischen, mechanischen und elektromagnetischen Randbedingungen wurden geeignete elektrische Maschinen hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Es wurden Schwierigkeiten und Herausforderungen bei der Auslegung dieser elektrischen Antriebsstränge sowie entsprechende Lösungsansätze diskutiert. Durch die geringen Rotorverluste und dem mechanisch robustem Aufbau eignet sich für gezeigte Einsatzumgebung besonders die Topologie einer Synchronreluktanzmaschine. Eine Aufteilung des Rotors in einen magnetisch aktiven Teil und einem passiven Schwungradteil erlaubt deren separate Auslegung und Materialauswahl. Trotz der hohen Fliehkräftebelastungen kann der Einsatz von kostengünstigem, siliziumlegiertem Elektroband in dem magnetisch aktiven Rotorteil durch ein mechanisch robustes Design der SynRM realisiert werden. Aktuell wird die ganzheitliche Betrachtung und Optimierung des Antriebssystems mit Hilfe des Gesamtsystemmodells durchgeführt und eine erste Betriebsstrategie entwickelt. Die daraus näher spezifizierten Komponenten des Antriebssystems werden im Anschluss mit Hilfe von thermischen, mechanischen und elektromagnetischen Simulationen weiter verfeinert.

## Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, *Aktionsprogramm Klimaschutz 2020: Eckpunkte des BMUB*. Available: [www.bmub.bund.de/N50789/](http://www.bmub.bund.de/N50789/) (2015, Aug. 24).
- [2] H.-H. Braess and U. Seiffert, Eds, *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, 7th ed. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [3] J. Hilton, “Schwungrad-Hybridfahrzeuge als Alternative zu Elektrofahrzeugen,” (de), *ATZ Automobiltech Z*, vol. 114, no. 11, pp. 874–878, 2012.
- [4] F. Müllner, H. Neudorfer, and M. Recheis, “highFly – Entwicklung eines Flywheels als elektrischer Energiespeicher für den mobilen Einsatz,” (de), *Elektrotech. Inftech*, vol. 132, no. 1, pp. 87–94, 2015.
- [5] H. Wegleiter, “Flywheel als Energiespeicher in Hybrid und Elektrofahrzeugen für den Individualverkehr,” (de), *Blue Globe Report – Klima- und Energiefonds*, 2013.
- [6] GKN Hybrid Power, *Gyrodrive by GKN Hybrid Power: Driving Efficient Transport*. Available: <http://www.gkn.com/landsystems/brands/hybrid-power/media/downloads/Brochures/Downloads/GKN-Hybrid-Power-Brochure.pdf> (2015, Aug. 24).