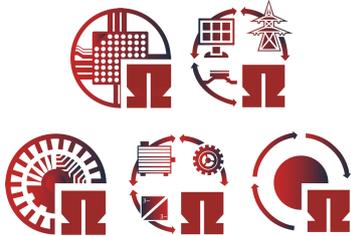


# ELSYS Note



## Elektrischer Verdichter für Brennstoffzellen

Die Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) Brennstoffzelle wird sowohl in mobilen als auch stationären Anwendungen eingesetzt. Hierbei wird die im Brennstoff enthaltene Energie mittels Sauerstoff in elektrische Energie umgewandelt. Die Bereitstellung des Sauerstoffs stellt dabei ein elektrisch betriebener Verdichter bei hohen Drehzahlen  $n > 80.000 \text{ min}^{-1}$  sicher.

### Einleitung

Ein elektrisch angetriebener Verdichter wird eingesetzt, um die kathodenseitige Luftversorgung einer PEM-Brennstoffzelle zu gewährleisten. Dabei wird ölfreie Luft auf einen Druck von rund 2 bar komprimiert. Als Antrieb kommt eine schnell drehende Permanentmagnet-Synchronmaschine (PMSM) zum Einsatz. Aufgrund der hohen Drehzahl und der hohen elektrischen Frequenz, weisen solche Maschinen im Vergleich zu konventionellen PMSMs besondere Eigenschaften auf, welche bei der Konstruktion berücksichtigt werden müssen. Das übergeordnete Forschungsziel besteht darin, einen Luftverdichter mit einem Drehzahlbereich von  $n = 100 \text{ km}^{-1}$  bis  $120 \text{ km}^{-1}$  für die Anforderungen an eine PEM-Brennstoffzelle zu entwickeln.

### Motortopologie

In Anbetracht der hohen Drehzahl wird der Rotor mit einem Polpaar ausgeführt, damit die elektrische Grundfrequenz möglichst niedrig gehalten werden kann. In Abb. 1 ist der Querschnitt der Maschine dargestellt. Die schalenförmigen Permanentmagnete sind diametral magnetisiert und auf der Oberfläche der Rotorwelle befestigt. Zusätzlich

werden die Magnete mit einer Armierungshülse aus einem Faserverbundwerkstoff bandagiert. Der Stator weist eine **verteilte Wicklung** mit  $q = 2$  auf.

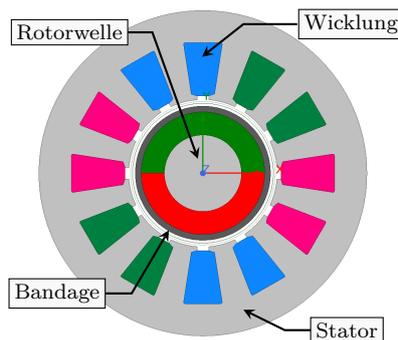


Abb. 1: PMSM Querschnitt

Die Wahl des Außendurchmessers des Rotors erfordert besondere Aufmerksamkeit, um Festigkeitsprobleme durch die Umfangsgeschwindigkeit  $\omega$  zu vermeiden. Der Rotordurchmesser beträgt bei dem Prototyp 35 mm bei einer aktiven Länge von  $l_{Fe} = 60 \text{ mm}$ . Ebenfalls sollte das Verhältnis der Rotorlänge zu Rotordurchmesser möglichst klein sein, damit es zu keinen dynamischen Problemen kommt.

Bei der Wahl des Luftspaltdurchmessers spielen die Verluste in den Permanentmagneten eine entscheidende Rolle. Durch induzierte Spannungen aufgrund von Oberwellen im Luftspalt entstehen Wir-

belströme, welche Verluste in den Magneten hervorrufen. Dieser Effekt reduziert sich durch die Wahl eines breiteren Luftspalts.

### Gramme-Wicklung

Die Gramme-Wicklung (auch Ring- oder Jochwicklung) besteht aus einzelnen Spulen, welche im Gegensatz zu konventionellen Wicklungen nicht um die Statorzähne, sondern um das Statorjoch gewickelt werden. Dies ist in Abb. 2 zu erkennen. Der Vorteil hierbei ist die geringere axiale Länge und die kürzeren Wickelköpfe. Durch die direkte Anbindung der Wicklung an das Gehäuse, wodurch eine bessere Wärmeabfuhr gewährleistet werden kann [1]. Zudem kann der Stator ohne Zähne ausgeführt werden, was die Einflüsse der Statornuten stark reduziert [2].

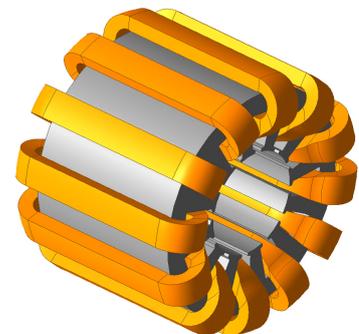


Abb. 2: Gramme-Wicklung

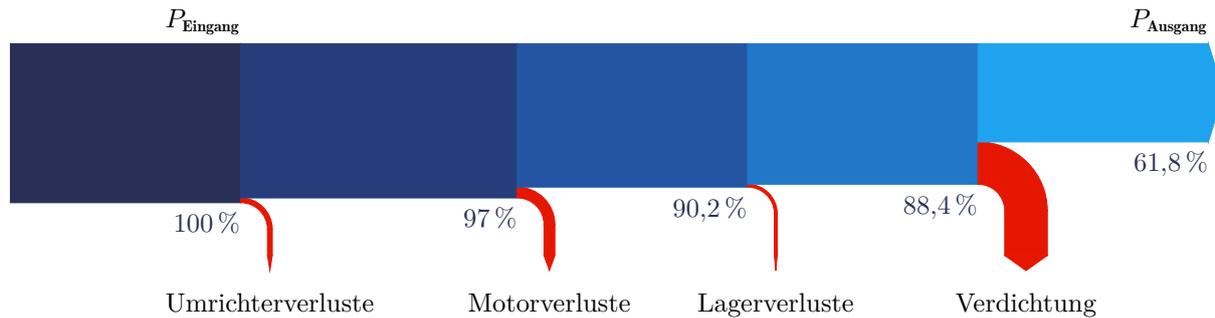


Abb. 3: Allgemeine Wirkungsgradreihe eines elektrischen Verdichters

## Gramme vs. Verteilt

Bei der Betrachtung der Gramme-Wicklung ergeben sich mehrere Vorteile, die sie trotz gewisser Nachteile zu einer geeigneten Wahl für den Prototyp machen:

**Identisches Luftspaltfeld:** Das Luftspaltfeld entspricht dem einer klassischen verteilten Wicklung.

**Gültigkeit der algebraischen Entwurfsregeln:** Aufgrund der Feldcharakteristik bleiben die Regeln für den algebraischen Wicklungsentwurf anwendbar.

**Unveränderter Grundwellenwicklungsfaktor:** Der Grundwellenwicklungsfaktor beträgt  $k_w = 0,966$ , d.h. wie der Wicklung in Abb. 1.

**Akzeptable Stromwärmeverluste:** Trotz rund 10 % höherer Stromwärmeverluste wird durch die bessere Kühlung eine effiziente Wärmeabfuhr ermöglicht.

## Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad eines elektrisch betriebenen Verdichters setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Die gesamte Wirkungsgrad-

kette ist in Abb. 3 dargestellt. Aus dem Produkt der einzelnen Wirkungsgrade wird der Gesamtwirkungsgrad berechnet.

Die Eingangsleistung steht in Form von elektrischer Leistung bereit. Eine Leistungselektronik stellt die vom elektrischen Antrieb benötigte Spannung für dessen Betrieb bereit. Der Wirkungsgrad eines Umrichters ist üblicherweise über 97 % und verursacht einen nur sehr geringen Anteil an Verlustleistung. Bei der elektromagnetischen Energiewandlung des Motors wird die elektrische Energie in mechanische Energie überführt. Dies geschieht bei PMSM durchaus effizient bei einem Wirkungsgrad über 93 %. Die Verwendung von ölfreien Gaslagern führt zu einer sehr geringen Reibung, weshalb ebenfalls dort nur sehr geringe Verluste entstehen. Der Verdichtungsprozess des Luftgemisches stellt den größten Verlustfaktor dar, da bei der Verdichtung die meiste Wärme entsteht.

Die zur Verfügung stehende Gesamtleistung reduziert sich durch die entstehenden Verluste in der Leistungselektronik, elektrischen Maschine und dem Lager, welche pri-

mär in Wärme umgesetzt werden. Bei der Verdichtung der Luft entsteht die größte Abwärme, weshalb von der Eingangsleistung letztendlich nur rund 62 % als Ausgangsleistung genutzt werden können.

## Zusammenfassung

Die Entwicklung eines elektrisch betriebenen Verdichters für die Anwendung in einer PEM-Brennstoffzelle erfordert eine vollumfängliche Betrachtung. Die Gramme-Wicklung kann durchaus einen Kompromiss zwischen schlechteren elektromagnetischen Eigenschaften und besserer thermischer Anbindung bieten. Es sollte darauf geachtet werden, dass beim Betrieb keine kritischen Eigenfrequenzen auftreten.

## Danksagung

Das Institut ELSYS bedankt sich herzlich bei der Staedtler-Stiftung für ihre großzügige Unterstützung. Durch ihre Förderung können wissenschaftliche Projekte weiter vorangetrieben werden.

## Literatur

- [1] A. Borisavljevic, S. Jumayev und E. Lomonova. „Toroidally-wound permanent magnet machines in high-speed applications“. *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Berlin, Germany: IEEE, Sep. 2014. DOI: 10.1109/ICELMACH.2014.6960552.
- [2] T. R. He, F. Xu, Z. Q. Zhu, D. Liang, H. Bin, D. Wu, L. M. Gong und J. T. Chen. „Comparison of Toroidal and Tooth-Coil Winding 2-Pole Slotted High-Speed Permanent Magnet Motors“. *IEEE Transactions on Industry Applications* (Mai 2024). DOI: 10.1109/TIA.2024.3366500.