



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 31. März 2013

Metalle der Seltenen Erden: Alternativen für effiziente Industriemotoren

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm „Elektrizitätstechnologien und –anwendungen“
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Circle Motor AG
Feldeggstrasse 30
CH-3427 Utzenstorf
www.circlemotor.ch

Autor:

Markus Lindegger, dipl. El. Ing. HTL info@circlemotor.ch

BFE-Bereichsleiter:	Dr. Michael Moser
BFE-Programmleiter:	Roland Brüniger
BFE-Vertragsnummer:	SI/500824-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Höchste Wirkungsgrade bei Elektromotoren sind eine wirksame Massnahme gegen den global ansteigenden Bedarf an Elektrizität. Die internationale Norm IEC 60034-30 schlägt Mindestwirkungsgrade für elektrische Industriemotoren vor. Durch das periodische Erhöhen der gesetzlichen Mindestwirkungsgrade ist anzunehmen, dass in Zukunft vermehrt Elektromotoren mit Permanentmagneten aus Metallen der Seltenen Erden zum Einsatz kommen könnten. Diese Arbeit zeigt, dass Metalle der Seltenen Erden aus ökologischer Sicht problematisch sind, wenn die Abfälle aus der Aufbereitung in offenen Deponien gelagert werden. Bei der Herstellung der Seltenen Erden hat China heute ein Monopol. Im Sommer 2011 stiegen die Preise für Neodym-Eisen-Bor Magnete in einer Preisblase sprunghaft an. Diese Forschungsarbeit zeigt, dass höchste Wirkungsgrade bei Industriemotoren auch ohne den Einsatz von Metallen der Seltenen Erden möglich sind. Bei Kleinmotoren sind keramische Magnete eine Alternative. Dieses Magnetmaterial ist günstig zu kaufen und reichlich vorhanden. Im mittleren Leistungsbereich ist der Reluktanzmotor eine Alternative, auch deshalb, weil modernste Umformer mit Vektorregelung am Markt erhältlich sind. Im hohen Leistungsbereich werden bereits Asynchronmotoren der Effizienzklasse IE4 angeboten.

Résumé

L'augmentation de l'efficacité des moteurs électriques est une mesure pertinente contre la hausse de la demande mondiale d'électricité. La norme internationale CEI 60034-30 impose des standards minimaux pour les moteurs électriques industriels. En raison de l'augmentation régulière de ces exigences légales, les moteurs électriques à aimants permanents à base de terres rares pourraient être de plus en plus utilisés. Toutefois, les métaux à base de terres rares posent des problèmes écologiques, notamment si les déchets issus de leur retraitement sont stockés dans des décharges à ciel ouvert. Dans la production de terres rares, la Chine détient désormais un monopole. En été 2011, le prix des aimants à la base de néodyme-fer-bore a fortement augmenté. Ce travail de recherche montre que le recours aux terres rares n'est pas la seule solution pour accroître le rendement des moteurs industriels.

Pour les petits moteurs, les aimants céramiques constituent une alternative intéressante. Ce matériau magnétique est abondant et bon marché. Dans la plage de puissance moyenne, le moteur à réluctance présente des avantages, en raison notamment des convertisseurs modernes que l'on trouve sur le marché et qui mettent en œuvre des régulateurs vectoriels. Dans la gamme de puissance élevée, des moteurs asynchrones de la classe d'efficacité IE4 sont d'ores et déjà disponibles.

Abstract

Highest efficiency factors of electrical motors are an effective answer against the rising global electricity demand. The international standard IEC 60034-30 defines minimal efficiency ratings for electrical industrial motors. Due to rising periodically the legal binding minimum efficiency ratings, it can be assumed that in the future rare earth permanent magnet motors will be used more frequently. This document shows the problematic aspects from an ecological point of view, if waste from processing treatment is disposed in open areas. Today China has a monopole in the production of rare earth materials. Summer 2011, an excessive price increase for neodymium iron boron magnets happened. This research work shows that it is also possible to achieve highest efficiency factors of industrial motors without using rare earth magnets.

For small motors ceramic magnets are an alternative. This material is inexpensive and is plenty available. For the middle application range the reluctance motor is an alternative, this is also due to the fact that modern converters using vector control exist on the market. For the high end application range, there are already asynchronous motors fulfilling IE4 efficiency rating.

Ausgangslage

Elektromotoren verbrauchen in der Schweiz 26TWh el. Energie pro Jahr [1]. Hier ist ein enormes Energiesparpotenzial mit hocheffizienten Elektromotoren, aufgebaut mit Magnetmaterial aus Seltenen Erden vorhanden. In verschiedener Hinsicht sind aber Metalle aus Seltenen Erden problematisch, wie diese Forschungsarbeit aufzeigen wird. Ein Permanentmagnet-Motor aufgebaut mit Neodym-Eisen-Bor Magneten ist einem heute in der Industrie verwendeten Elektromotor (Asynchronmotor) in der Effizienz überlegen. Durch das periodische Erhöhen der gesetzlichen Mindestwirkungsgrade, gemäss der Norm IEC 60034-30 ist anzunehmen, dass in Zukunft vermehrt Permanentmagnet-Motoren mit Metallen der Seltenen Erden zum Einsatz kommen könnten. Eine Verschärfung der Problematik im Bezug zu den Metallen der Seltenen Erden wäre die Folge. Auch deshalb, weil die Norm IEC 60034-30 eine globale Auswirkung hat.

Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist eine Abschätzung, ob hocheffiziente Elektromotoren für den Einsatz in der Industrie, mittels keramischen Magneten, einer ausgeprägten Reluktanz oder aus einer Kombination von beiden unter Verzicht von Seltenen Erden Magneten möglich sind. Seltene Erden sind ein strategisches Element für die Industrie, sogar für ein ganzes Land. Ein geringerer Bedarf schafft weniger Abhängigkeit und schont zudem die Umwelt.

Zeigen sich aus den Forschungsergebnissen Alternativen zu Permanentmagnet Motoren basierend auf Seltenen Erden auf und ist die Effizienz dieser Alternativen höher als bei den heute am Markt eingesetzten Industriemotoren (Asynchronmotor mit Kurzschlussläufer), so ist ein wirtschaftliches Potenzial gegeben.

Die Bezeichnung Industriemotor in diesem Bericht bezieht sich auf Motoren deren Wirkungsgrad mit der Norm IEC 60034-30 beschrieben wird.



Foto 1 eines Normmotors (Industriemotors)

Vorgehen / Methode

Die Vorgehensweise gliedert sich zuerst in einer **Einleitung**, welche dem grundsätzlichen Verständnis der Seltenen Erden bei der Herstellung von Permanentmagneten dient und auch die Problematik beim Umgang mit diesen chemischen Elementen zeigt.

Danach folgt ein **Überblick** über gängige Magnetmaterialien.

Im Hauptteil **Ergebnisse / Erkenntnisse** werden die Funktionsweise und der Aufbau möglicher Motoren ohne den Einsatz von Metallen der Seltenen Erden beschrieben und die Verlustquellen aufgezeigt, welche in direkter Weise den Wirkungsgrad bestimmen. Die alternativen Varianten sind der Permanentmagnet Motor mit keramischen Magneten, sowie der Reluktanzmotor, dessen Magnetfeld durch den Aufnahmestrom des Motors selber erzeugt wird. Interessant ist zudem die Reluktanzmaschine mit Permanentmagneten zu kombinieren. Die dabei verwendeten Permanentmagnete enthalten keine Elemente der Seltenen Erden.

Um eine Aussage von kleinen bis zu grossen Motoren, über den Geltungsbereich der Leistung bezüglich der Norm IEC 60034-30 zu erhalten, werden für zwei Motoren mit Normgrössen *FEMAG* Maschinenmodelle erstellt. Die Daten der Modelle, Diagramme, sowie Recherchen bilden im Bericht den Teil der **Diskussion** und der **Schlussfolgerungen**. Das Kapitel „konkrete Resultate“ gibt einen Ausblick für nächste Schritte nach Projektabschluss an. Danach folgen die Referenzen.

Einleitung

Lanthaniden, chemische Elemente aus der Gruppe der Seltenen Erden sind für die Herstellung von starken Permanentmagneten sehr interessant. Diese Metalle weisen Ordnungszahlen von 58 (Cer) bis 71 (Lutetium) auf. Die Ordnungszahl eines chemischen Elements beschreibt die Anzahl Elektronen, welche in so genannten Schalen um den Atomkern kreisen. Elektronen füllen in der Regel zuerst die innere Schale vollständig auf, bevor die nächste äussere Schale besetzt wird. Chemische Elemente welche in der Ordnungszahl vor den Lanthaniden liegen, lassen beim Auffüllen der Schalen die 4f-Schale der Lanthaniden zuerst unbesetzt und füllen erst danach äusseren Schalen auf. Die Elektronen der 4f-Schale der Lanthaniden sind dadurch abgeschirmt, behalten ihre Richtung und den Elektronen Spin bei. Nur durch anlegen eines sehr starken äusseren Magnetfeldes lassen sich die Elektronen in der 4f-Schale beeinflussen. Diese Resistenz gegen äusserte Magnetfelder, die so genannte Koerzitivfeldstärke H_c und die hohe Remanenzpolarisation B_r zeichnen Hochleistungsmagnete aus. Die Remanenzpolarisation ist ein Mass für die Ausrichtung der Elementarmagnete (Weiss'sche Bezirke) in einem ferromagnetischen Material. Ferromagnetische Materialien sind: Eisen, Kobalt, Nickel. Sowohl Ferromagnetismus, wie auch hohe Remanenzpolarisation sind bei Permanentmagneten gewünscht, deshalb bestehen Permanentmagnete stets aus Legierungen. Das Magnetmaterial Neodym-Eisen-Bor erreicht eine Koerzitivfeldstärke H_{cB} knapp unter 1000kA/m, eine Remanenz von 1.4 Tesla und mit Legierungszusätzen eine Temperaturbeständigkeit vom 150°C. Diese Temperaturwerte entsprechen etwa den Spezifikationen von anderen in Elektromotoren eingesetzten Stoffen. In diesem Bereich liegen auch die Temperaturfestigkeit der Isolierstoffe in den Nuten und die Lackisolation der Wicklungsdrähte. Die Stärke des Magnetfeldes von 1.4 Tesla ist eine Annäherung an die maximale Sättigungsinduktion des Eisenblechs. Deshalb ist Neodym-Eisen-Bor heute das wichtigste Magnetmaterial in elektrischen Permanentmagnet Maschinen und verantwortlich für höchste Wirkungsgrade und Leistungsdichte. Heute ist Neodym-Eisen-Bor wesentlich preiswerter als das Magnetmaterial Samarium-Kobalt.

Herstellung von Neodym-Eisen-Bor Permanent-Magnete

Chemischen Elemente der Lanthaniden werden als Seltene Erden bezeichnet. Neodym gehört zu den Lanthaniden. Die „Erden“ selbst sind die Oxide. Die chemischen Elemente der Lanthaniden finden sich stets untereinander vergesellschaftet in der Form von Silikaten oder Phosphaten. Die wichtigen Mineralien in denen das Neodym vorkommt, sind:

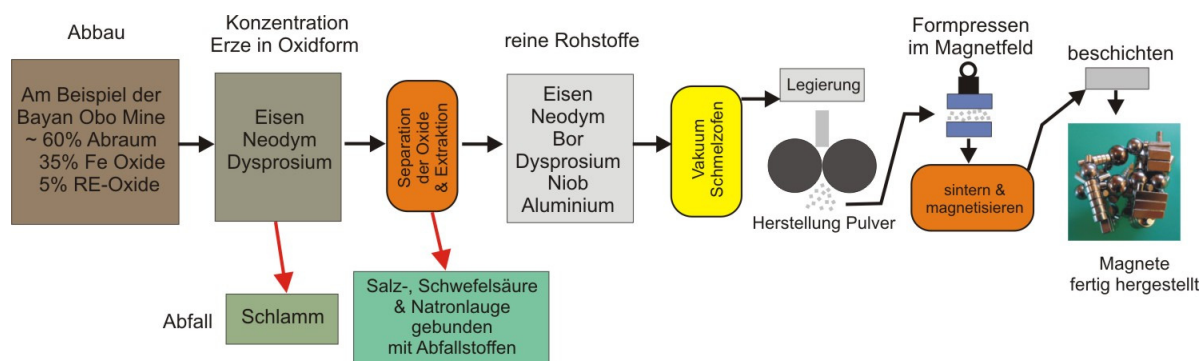
Bastnasit [(Ce,La,Nd) (CO₃)F]

Monazit [(Ce,La,Nd)PO₄] enthält mit Ceriterden etwa 5% Thoriumoxid ThO₂. [2]

Thorium ist radioaktiv! [2]

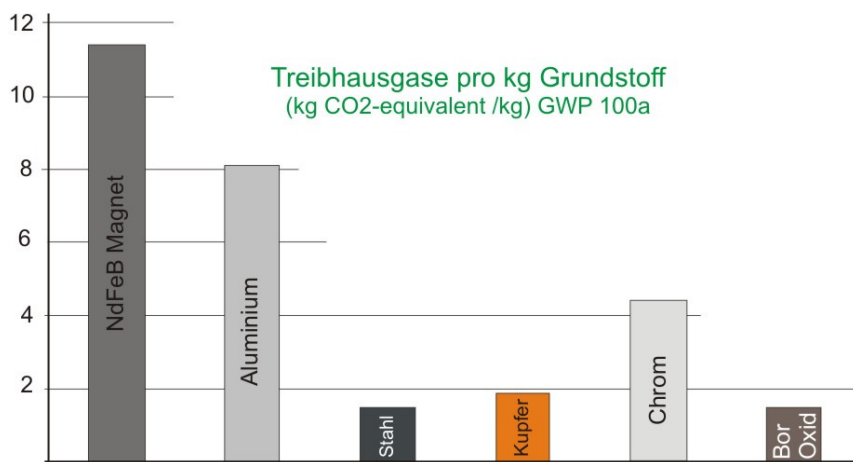
(Die chemischen Formeln oben sind vereinfacht)

(In der Fachliteratur wird für Lanthaniden auch die Schreibweise Lanthanoide verwendet)



Das Blockdiagramm 2 zeigt den Herstellprozess der Nd₂Fe₁₄B Magnete

Ökobilanz und Aspekte des Umweltschutzes



Gegenüberstellung 3: Neodym-Eisen-Bor Magnet mit technischen Grundstoffen

Die Gegenüberstellung 3 zeigt die Ökobilanz von Neodym-Eisen-Bor Magneten im Vergleich zu technischen Grundstoffen. Die Ökobilanz der Neodym-Eisen-Bor Magnete zu Aluminium unterscheidet sich überraschender Weise nicht wesentlich. Beide Herstellungsprozesse von Neodym und Aluminium sind insofern ähnlich, da nicht wie beim Eisen und Kupfer, das Metall aus dem Erz heraus geschmolzen werden kann, sondern mit chemischen Stoffen, wie Säuren oder Basen gelöst werden muss.

Sowohl in China bezogen auf Seltene Erden [3], wie leider auch in Europa beim Aluminium [4] zum Teil noch praktiziert, wird der Herstellungsprozess ökologisch nicht abgeschlossen und Schlämme aus der Produktion werden offen deponiert. Im vergangenen Jahr ist die weltweite Produktion von Seltenen Erden auf etwa 120'000 Tonnen beziffert worden [5]. Die globale Produktion von Primär- oder Hüttenaluminium erreichte im Jahr 2010 41×10^6 Tonnen [6]. Das entspricht einem Verhältnis zu den Seltenen Erden von 0.3%.

In den Schlämmen aus der Produktion von Seltenen Erden ist Thorium enthalten, ein radioaktives chemisches Element. Deshalb ist eine offene Deponie dieser Schlämme äusserst kritisch.

Ein japanischer Konzern hat vor rund 20 Jahren in Malaysia seine Produktionsanlagen für Seltene Erden wegen radioaktiver Verseuchung einstellen müssen. Die aufwändigen Entsorgungsarbeiten der verseuchten Erde wurden aber durch den Verursacher einige Jahre später durchgeführt und mit ca. 100 Mio. US-Dollar finanziert. [5]

Ressourcen, Monopol China

Der Name „Seltene Erden“ suggeriert, dass diese Elemente selten sind. Dem ist aber nicht so. In der Bayan Obo Mine [3], in der inneren Mongolei, fallen die Seltenen Erden aus der Eisenproduktion an. China nutzte frühzeitig den Abbau und beherrscht heute den Weltmarkt. Seltene Erden kommen in Mineralien immer vergesellschaftet vor und müssen in einem aufwendigen Trennungsprozess in die einzelnen chemischen Elemente extrahiert werden. Diese Gegebenheit führt dazu, dass der Lagerbestand einiger Elemente hoch sein kann, während bei anderen Elementen ein Mangel vorkommen kann. China steuert den Absatz der Seltenen Erden mit einer geschickten Preispolitik und führte eine Exportbeschränkung bezüglich den Neodym-Eisen-Bor Magneten ein, welche vom chinesischen Zoll auch durchgesetzt wird.

Handel, Preise

Im Inlandmarkt China sind die Preise für Metalle aus Seltenen Erden seit dem Höchststand im Sommer 2011 stark gesunken und kosten in der Regel heute etwa zwei Drittel weniger. [7]

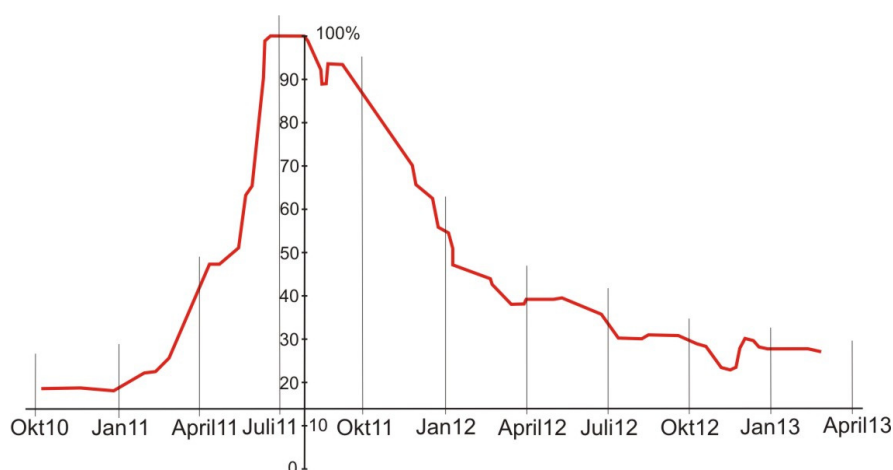


Diagramm 4 mit der Preisentwicklung von Neodym Metall Reinheit min 99%, Inlandmarkt China

Im Sommer 2011 wurden vermehrt Magnete aus Samarium-Kobalt nachgefragt, da das Preisniveau zu Neodym-Eisen-Bor Magneten etwa Gleichheit erreichte. Da heute die Neodym-Eisen-Bor Magnete zu zwei Dritteln günstiger angeboten werden, ist die Rolle der Samarium-Kobalt-Magnete bezogen auf die Verkaufsmenge wieder untergeordnet.

An der Börse werden Seltene Erden Metalle nicht gehandelt. Der Inland Preis in China ist massiv günstiger als der Preis bei Export. Die Exporte werden in der Regel mit 42% besteuert und unterliegen restriktiven Exportquoten. Die gesamten Exportsteuern bestehen aus der nicht zurück erstatteten Mehrwertsteuer von 17% und der eigentlichen Exportsteuer von ca. 25%. Davon nicht betroffen sind in China hergestellte Produkte mit Bestandteilen aus Seltenen Erden. Diese Produkte unterliegen keiner Exportsteuer, da die Regierung gezielt Produkte mit einem höheren Anteil an einheimischer Wertschöpfung fördert [5].

Überblick der gängigen Magnetmaterialien für Elektromotoren.

In Elektromotoren werden heute vorwiegend Neodym-Eisen-Bor Magnete und Magnete aus Hartferrit verwendet. Die Begriffe keramische Magnete, Hartferrite, Ferritmagnete sind gleichbedeutend.

Die stärksten Permanentmagnete sind mit der Legierung **Neodym-Eisen-Bor** hergestellt. Die Formel der Legierung lautet: $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Neodym-Eisen-Bor Magnete weisen eine feinkristalline Struktur auf, da grössere Kristalle leicht zu entmagnetisieren sind. Die erreichten Werte der Remanenz liegen bei 1.1 bis 1.45 Tesla und die Koerzitivfeldstärke H_{cB} 800 bis knapp unter 1000kA/m. Mit rund 500kJ/m^3 weisen Neodym-Eisen-Bor Magnete das höchste Energieprodukt ($B \times H$) auf. Würden die Magnete nur aus Neodym, Eisen und Bor bestehen, wäre eine Entmagnetisierung bereits ab 80°C , sowie eine starke Korrosion gegeben. Die Korrosion bezieht sich dabei nicht nur auf die Oberfläche, sondern auch auf die Metalle innerhalb eines Magneten. Die ersten Neodym-Eisen-Bor Magnete am Markt lösten sich mit der Zeit auch von innen her auf. Ein Zusatz von Kobalt verbessert die Korrosionsbeständigkeit. Die Oberflächen der Magnete sind mit einer Nickel- oder Epoxyharz Beschichtung nochmals gegen Korrosion geschützt. Durch Zusätze von weiteren Seltenen Erden, wie Dysprosium oder Terbium konnte die maximale Einsatztemperatur bei optimierten Legierungen bis 180°C erweitert werden.

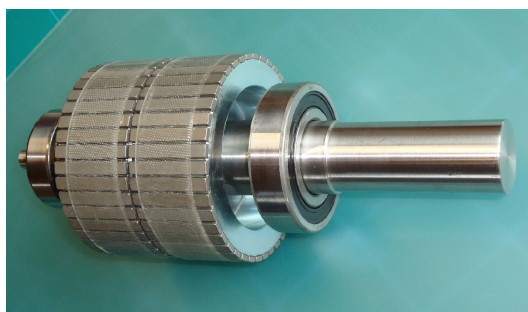


Foto 5 eines Rotors mit Neodymmagneten auf der Oberfläche bestückt.

Neodym, wie auch Samarium-Kobalt Magnete sind sehr spröde und können praktisch nicht bearbeitet werden. Das bei einer allfälligen Bearbeitung anfallende feine Magnetmaterial ist sehr leicht brennbar, ähnlich Schiesspulver. Weiter ist zwingend zu vermeiden, dass zwei Magnet ungebremst aufeinander schlagen. Um her fliegende scharfkantige Splitter und die Gefahr von Quetschungen an der Hand wären die Folgen.

Hartferrit Magnete bestehen aus 90% Eisenoxid und ca. 10% Barium- oder Strontiumoxid, Rohstoffe die preiswert und reichlich vorhanden sind. Magnete aus Hartferrit sind gegen über Feuchtigkeit beständig, da diese ja bereits aus Oxiden bestehen. In der Regel ist keine Beschichtung nötig. Barium- und Strontiumferrite sind Oxidkeramik, die den elektrischen Strom schlecht leiten, was bezüglich den Verlusten in den Magneten von Elektromotoren ein Vorteil ist. Der Aufbau der Magnete erfolgt aus Korngrössen (Weiss'sche Bezirke) in einer Grösse von 1-2 μm durch pressen. Je nach Verfahren: trocken gepresst, nass gepresst, ausrichten mit einem äusseren Magnetfeld, erreichen Hartferrite Werte der Remanenz von 0.2 bis 0.4 Tesla und eine Koerzitivfeldstärke H_{cB} von 0.13 bis 300kA/m. Zudem sind Hartferrite bis 250°C einsetzbar. Der Temperaturkoeffizient von H_{cJ} ist bei Hartferrit Magneten positiv.

Noch aufzuführen sind die beiden Magnetmaterialien, **Samarium-Kobalt** SmCo und **Aluminium-Nickel-Kobalt** AlNiCo.

Die Legierung **Samarium-Kobalt** besteht aus dem Selten Erden Metall Samarium und Kobalt, welches kein Element der Seltenen Erden ist. Am Markt sind zwei Legierungen erhältlich mit der Formel SmCo₅ und Sm₂Co₁₇. Wirtschaftlich haben Samarium-Kobalt Magnete, gegenüber Neodym-Eisen-Bor Magneten den Nachteil, des signifikant höheren Preis. Auch die Remanenz mit durchschnittlich 1Tesla und die Koerzitivfeldstärke H_{cB} von rund 750kA/m sind geringer als bei Neodym-Eisen-Bor. Der Vorteil der Samarium-Kobalt Magnete ist die höhere max. Einsatztemperatur mit 300°C, die gute Korrosionsbeständigkeit und die tieferen reversiblen Temperaturkoeffizienten der Magnetisierung gegenüber Neodym-Eisen-Bor. Samarium-Kobalt Magnete werden deshalb dort eingesetzt, wo die überlegenen Eigenschaften gefordert werden.

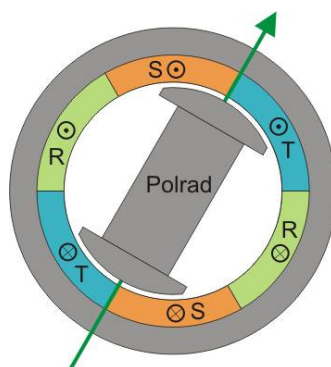
(Die Angaben der Koerzitivfeldstärke H_{cB} der Remanenz B_r beziehen sich auf Raumtemperatur)

Aluminium-Nickel-Kobalt Magnete wurden früher oft verwendet. Im Elektromaschinenbau sind heute AlNiCo Magnete durch Ferrit- und Neodym-Eisen-Bor Magnete praktisch verdrängt. Die Remanenz der AlNiCo Magnete ist mit 0.6 bis 1.2Tesla relativ hoch. Die Koerzitivfeldstärke H_{cB} von AlNiCo beträgt nur 50-100kA/m sodass diese Magnete sehr leicht zu entmagnetisieren sind. AlNiCo Magnete werden heute immer noch in Sensoren verwendet, da dieses Material, nach einer künstlichen Alterung eine stabile Magnetisierung aufweist und der niedrigste Temperaturkoeffizient aller bekannten Magnetmaterialien aufweist.

Alle oben aufgeführten Magnet Materialien sind auch als Kunststoff gebundene Magnete erhältlich. Damit sind ähnliche Gestaltungsmöglichkeiten bei der Formgebung, wie bei den Kunststoffen gegeben. Durch den Anteil von Kunststoff in den Magneten verringern sich die Remanenz und die Koerzitivfeldstärke. Bei Kunststoff gebundenen Ferritmagneten erreicht die Remanenz knapp 0.3 Tesla und die Koerzitivfeldstärke H_{cB} knapp 200kA/m, bei Neodym-Eisen-Bor 0.6 Tesla und 400kA/m.

Magnetisierung eines Rotors durch den Aufnahme Strom

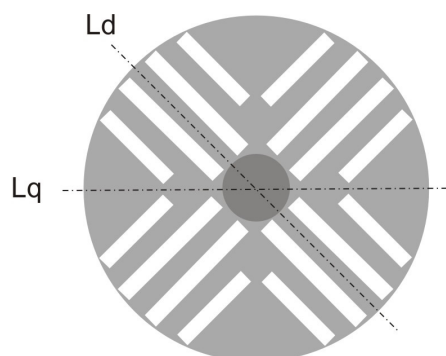
Es ist möglich den Rotor einer el. Maschine nur durch den Aufnahme Strom zu magnetisieren!



Prinzipmodell 6 eines Reluktanzmotors

Das Prinzipmodell 6 erklärt die Magnetisierung einer synchronen elektrischen Maschine durch den Aufnahme­strom, wie dies bei einem Reluktanzmotor realisiert ist. Das Modell besteht aus einem Stator mit einer Drehstromwicklung. Die drei Phasen RST sind auf 6 Zonen verteilt. Am Polrad befinden sich die beiden Polschuhe. Bringt man das Polrad in die Position, wie im Prinzipmodell 6 gezeigt, so kann man sich leicht vorstellen, dass der Strom der Phase R um den Schenkel des Polrads kreist. Die Spulen der Phase R und das Polrad bilden einen Elektromagneten, welcher einen magnetischen Fluss (grüner Pfeil) durch das Polrad erzeugt. Ein Polschuh wird damit zum magnetischen Nordpol und der andere zum Südpol. Der magnetische Fluss schliesst sich über das grau dargestellte, aussen liegende Joch bestehend aus Eisenblech. Damit ist die elektrische Maschine magnetisiert. Betrachtet man die Spulen der Phasen S und T so ist ebenfalls leicht einzusehen, dass der Strom dieser Phasen um die Polschuhe des Polrads kreist. Die Strom durchflossenen Leiter der Phasen S und T liegen im Magnetfeld der Polschuhe und nach dem physikalischen Gesetz des „Strom durchflossenen Leiters im Magnetfeld“ wird auf das Polrad ein Kräftepaar, Drehmoment ausgeübt. Bei einem Drehstromsystem sieht ein sich mit dem Polrad mitbewegter Beobachter eine konstante gleichgerichtete Magnetisierung und ein konstantes Drehmoment. Darin begründet sich der bedeutende Unterschied bezüglich der Effizienz zum Asynchronmotor. Ein, auf dem Kurzschlussläufer eines Asynchronmotors mitrotierender Beobachter sieht ein magnetisches Wechselfeld, das zusätzlich zu den Stromwärmeverlusten im Kurzschlusskäfig bedeutend mehr Eisenverluste im Rotor erzeugt. Eine Magnetisierung des Polrads stets in gleicher Richtung und konstantem Betrag, wie beim Reluktanzmotor ist effizienter. Dazu kommt, dass jede Verlustquelle beim Rotor zusätzlich mit mehr Aufnahme­strom beim Stator kompensiert werden muss, mit der Folge, dass auch die Verluste im Stator ansteigen. Bei einem reinen Reluktanzmotor ist das Polrad nur mit Elektroblech aufgebaut.

Ergebnisse / Erkenntnisse



Rotor 7 einer Reluktanzmaschine, wie dieser meistens in der Praxis aufgebaut ist.

Nach der Theorie kann der Aufnahme­strom einer el. Maschinen in die beiden Strom Komponenten I_q und I_d zerlegt werden. Die Komponente I_q erzeugt das Drehmoment und die Komponente I_d erzeugt oder schwächt das Magnetfeld. In der obigen Abbildung des Rotors 7 sind die Bezeichnungen L_d , L_q die zugehörigen Achsen, beziehungsweise die zugehörigen Induktivitäten.

Die Firma ABB Schweiz AG stellt im Prospekt „Antriebspaket mit High Output Synchronreluktanzmotor / Optimierte Kosten für Pumpen- und Lüfteranwendungen“ [8] diese Technologie vor. Bezüglich Effizienz sind im Prospekt zwei konkrete Beispiele aufgeführt. Das erste Beispiel ist ein Antriebssystem im Pumpenbetrieb mit 22kW Leistung bei einer Drehzahl von 1500rpm. Dabei erreicht der synchrone Reluktanzmotor inklusive Umrichter einen Wirkungsgrad von rund 91%. Im Vergleich liegt ein IE2 Asynchronmotor inklusive Umrichter etwas über 89%. Das zweite Beispiel ist ein Antriebssystem im Lüfterbetrieb mit 37kW Leistung bei einer Drehzahl von 3000rpm. Dabei erreicht der synchrone Reluktanzmotor inklusive Umrichter einen Wirkungsgrad von rund 92%. Im Vergleich liegt ein IE2 Asynchronmotor inklusive Umrichter bei etwa 90.5%. Der Prospekt gibt für den synchronen Reluktanzmotor 10-20% weniger Verluste an, als beim Asynchronmotor.

Die aufgeführten Baureihen sind:

- 33kW bis 125kW in 8 Baugrößen bei einer Nenndrehzahl von 3000rpm
- 25kW bis 160kW in 11 Baugrößen bei einer Nenndrehzahl von 2100rpm
- 17kW bis 350kW in 18 Baugrößen bei einer Nenndrehzahl von 1500rpm

Angaben zum Wirkungsgrad der Baureihe sind leider im Prospekt nicht vorhanden.

Interessant ist auch die Angabe, dass synchrone Reluktanzmotoren bei gleicher Leistung und Drehzahl signifikant kleiner und mit geringerem Gewicht gebaut werden, als IE2 Asynchronmotoren.

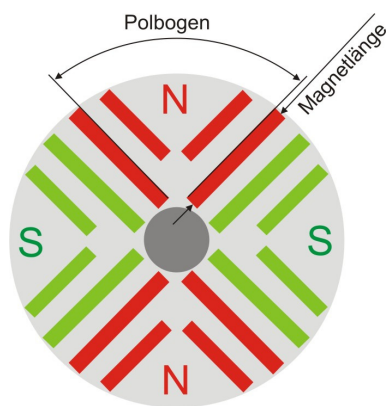
Im Prospekt „*Neue IE4 Motoren für die Prozessindustrie [9]*“ stellt ABB Schweiz AG Asynchronmotoren mit höchstem Wirkungsgrad vor. Die aufgeführten Asynchronmotoren sind in Baureihen mit 1000 / 1500 / 3000rpm gestuft und die Bandbreite der Leistung reicht von 45 / 75kW bis 355kW. Interessant ist weiter die Bekanntgabe von „*New Prozess performance IE3 aluminium motors*“ [10]. Die hier aufgeführten Asynchronmotoren sind ebenfalls in Baureihen mit 1000 / 1500 / 3000rpm gestuft und die Bandbreite der Leistung reicht von 7.5 / 11kW bis 37 / 55kW.

Interessant ist, dass im Leistungsbereich von etwa 10kW bis rund 50kW die IE-Stufe um einen Punkt kleiner ist als im höheren Leistungsbereich von etwa 50kW bis rund 355kW. Diese Aussage stützt eine frühere Aussage [11], dass sich die asynchrone- und die synchrone Technologie bezüglich des Wirkungsgrads bei Industriemotoren im Bereich von 100kW einander annähern und dass bei kleinen Industriemotoren die asynchrone Technologie bezüglich Wirkungsgrad unterlegen ist.

Alle Motorentechnologien ab Seite 10 bis zu dieser Zeile sind ohne Permanentmagnete aufgebaut, somit selbsterklärend auch ohne Metalle der Seltenen Erden.

Der Rotor 7 wie in der Seite zuvor dargestellt, besteht nur aus Eisenblech. Damit ein Drehmoment entstehen kann, muss eine magnetische Vorzugsrichtung vorhanden sein. Diese Vorzugsrichtung wird durch Stanzen von Zonen im Rotorblech erzeugt. Der Ausdruck *Reluktanz* bedeutet, dass im Rotor unterschiedliche Zonen mit verschiedenen Leitwerten für den magnetischen Fluss vorhanden sind.

Legt man nun Permanentmagnete in die Zonen ein, so entsteht eine zusätzliche Magnetisierung des Rotors ohne Energieaufwand von aussen. Diese Art eines Elektromotors wird als „Interior Permanentmagnet Motor“ oder kurz als „IPM Motor“ bezeichnet. Im Sinn dieser Arbeit sind die eingelegten Permanentmagnete unter Verzicht von Seltenen Erden hergestellt.



Rotor 8 einer IPM Maschine

In der Abbildung des Rotors 8 sind die Permanentmagnete mit roter und grüner Farbe angedeutet. Die Permanentmagnete sind so eingelegt, dass sich am Umfang vier Magnetpole ausbilden. Ist der

Polbogen kleiner als die doppelte Magnetlänge, so verdichten sich die Feldlinien am Pol. Diese Massnahme ist sehr geeignet, um die Induktion im Luftspalt einer el. Maschine mit Ferritmagneten zu steigern.

Zwei konkrete Maschinenmodelle mit FEMAG

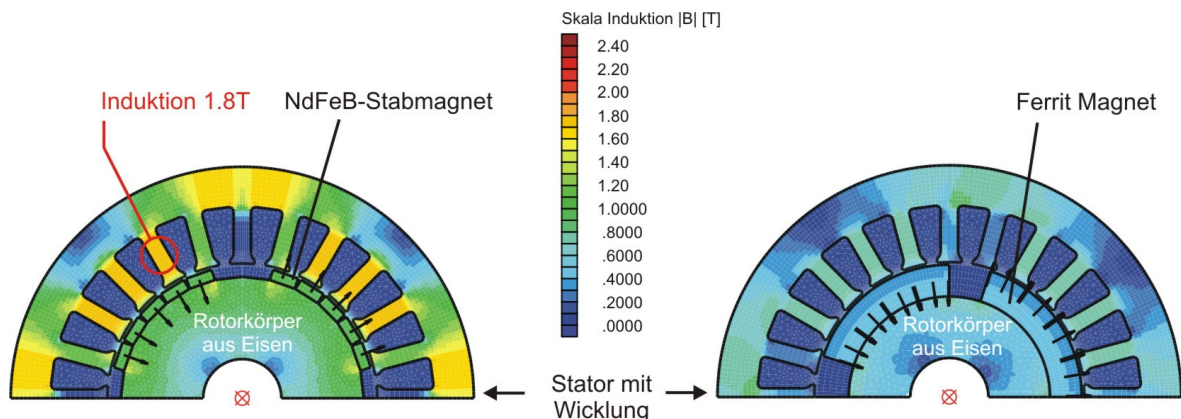
Wirkungsgrad, Leistung, $\cos\phi$ in Funktion des Drehmoments von synchronen el. Maschinen lassen sich mit genügender Genauigkeit aus der Grundformel der Synchronmaschine berechnen. Die Grunddaten dazu sind der Magnetfluss der Permanentmagnete (beim Reluktanzmotor=0), der Kupferwiderstand der Wicklung, die Induktivität, sowie die Eisenverluste. Um eine Aussage von kleinen bis zu grossen Motoren, über dem Geltungsbereich der Leistung bezüglich der Norm IEC 60034-30 zu erhalten, werden zwei grundlegende Maschinenmodelle mit FEMAG, einem finite Element Programm erstellt. Ein Modell besteht aus einem IEC-132 Blechschnitt, welcher bei einem Normmotor mit 4 Polen einer Leistung von 7.5kW entspricht. In diesem Leistungsbereich sind viele Motoren am Markt eingesetzt. Ein zweites Grundmodell eines Kleinmotors ist mit FEMAG in der Baugrösse IEC-71 realisiert. Diese Leistungsgrösse liegt im untersten Bereich der Norm IEC 60034-30. Eine frühere Studie [11] zeigte, dass sich im Bereich von 100kW die Wirkungsgrade der Industrie-Asynchronmotoren zu den Permanentmagnet Motoren einander annähern. Der Norm-Asynchronmotor ist somit im grösseren Leistungsbereich eine gute Alternative bezüglich Verzicht von Seltenen Erden. Mit diesem Vorgehen und weiteren Recherchen sind Aussagen über den ganzen Leistungsbereich der Norm IEC 60034-30 möglich.

Die Untersuchungen der alternativen Motoren erfolgen bei einer Nenndrehzahl von 1500rpm. Die meisten am Markt verwendeten Asynchronmotoren im Umrichterbetrieb, sind mit 4 Polen aufgebaut, welche einer synchronen Drehzahl am Netz von 1500rpm entspricht.

Motor IEC-71

Das FEMAG Grundmodell Abbildung 9 links des Motors IEC-71 wird mit Oberflächenmagneten aus Neodym-Eisen-Bor aufgebaut, wobei die induzierte Spannung hervorgerufen durch die Permanentmagnete bei 1500rpm etwa gleich der Klemmenspannung ist.

Der Aufbau des FEMAG Modells erfolgt mit einem Blechschnitt, wie dieser für IEC-71 Asynchron Motoren mit 4 Polen verwendet wird. Dieser Blechschnitt ist bei der Stanzwerk AG Unterentfelden [12] erhältlich. Die Länge des Eisenpakets in axialer Richtung wird so definiert, wie bei den Norm-Asynchronmotoren üblich. Gemäss dem Katalog von Kienle und Spiess [13] wird für die axiale Länge des Eisenpakets 65mm eingesetzt.



FEMAG Bilder 9:

Rotor mit Neodym-Eisen-Bor Magneten

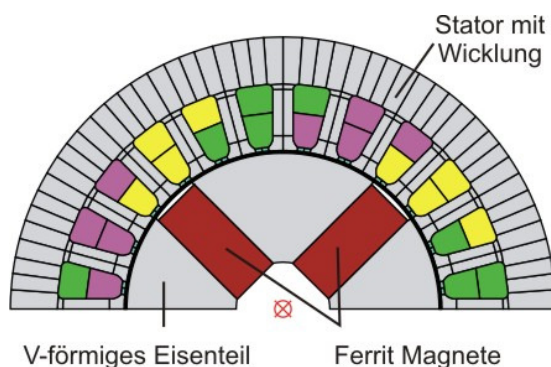
Rotor mit Ferritmagneten

Die Abbildung 9 zeigt zwei FEMAG Bilder mit gleichem Stator. Jedoch ist der Rotor der Maschine links mit Magnetstäbchen aus Neodym-Eisen-Bor bestückt und der Rotor rechts mit Ferritmagneten. Die Farbgebung ist ein Mass der magn. Induktion. In der Statorwicklung fliesst kein Strom. Gemäss der Praxis bei el. Maschinen soll eine maximale Induktion von über 1.8T im Elektroblech vermieden werden. Die limitierende Stelle in unserem Beispiel ist der rot markierte Steg eines Statorzahns. Der gesättigte Zahn ist somit die Barriere für eine weitere Steigerung des mag. Fluss in der gesamten Maschine und ein weiterer Einsatz vom Magnetmaterial beim Rotor wäre deshalb ungünstig. Diese Aussage gilt für Standard Elektroblech mit Silizium legiert.

Wie erwartet ist die Induktion beim Motor rechts mit Ferritmagneten für einen leistungsfähigen Motor zu gering. Obwohl die Ferritmagnete im Bezug zu den Neodym-Eisen-Bor Magneten in radialer Richtung des Motors vergrössert sind, kann die maximale Induktion im Luftspalt theoretisch nur der Remanenz des Ferritmaterials von 0.43T entsprechen.

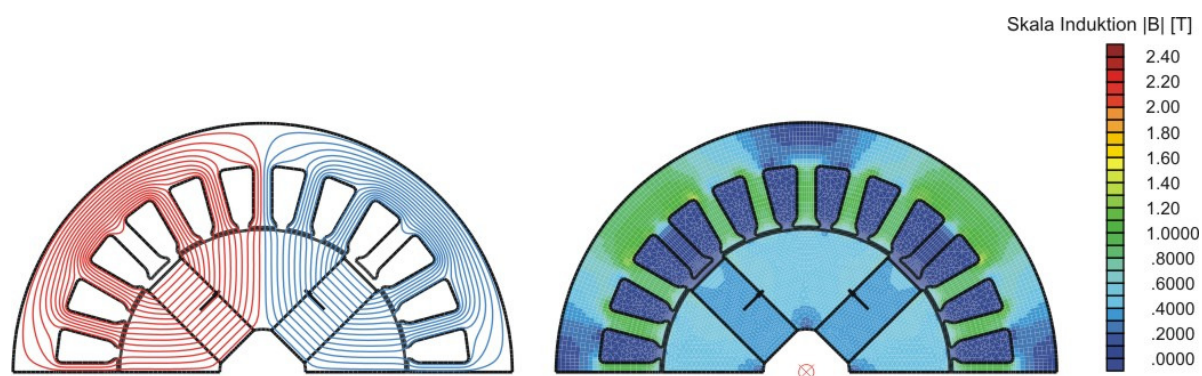
Verwendet man nun einen Rotor wie in Abbildung 8 und legt Ferritmagnete ein, so wird der Wert der induzierten Spannung etwa 1/3 des Rotors mit Neodym-Eisen-Bor Magneten betragen. Die Induktion im Luftspalt mit einem Neodym-Eisen-Bor bestückten Rotor beträgt etwa 1T und bei Ferrit 0.33T. Dazu zu rechnen sind noch etwa 20% für die Flussverdichtung der Ferritmagnete, ein Wert der bei einem Motor mit 4 Polen so angenommen werden darf. Somit beträgt die induzierte Spannung des Rotors mit Feldlinien-Konzentration und Ferritmagneten rund 40% des Rotors mit Oberflächen Neodym-Eisen-Bor Magneten. Beim IPM Rotor ist die Induktivität L_q grösser als L_d . Diese Daten in die Formel des Synchronmotors eingesetzt, ergab gar keine Wellenleistung mehr. Für gute Werte der Leistung und des Wirkungsgrads muss die induzierte Spannung der Klemmenspannung entsprechen oder diese überschreiten. (Oder der Rotor als reiner Reluktanzrotor ohne Permanentmagnete ausgebildet sein).

Interessant ist nun der Ansatz die Feldlinien so zu verdichten, dass der Wert der induzierten Spannung in den Bereich der Klemmenspannung ansteigt. Bei Gleichheit wäre ein zusätzlicher Magnetisierungsstrom I_d nicht mehr nötig. Dies ist auch deshalb anzustreben, weil die Betriebsart nur mit Drehmoment - bildendem Strom I_q die beste Effizienz ergibt und ein Umrichterbetrieb ohne I_d Strom einfacher zu handhaben ist.



Um sich den 4poligen IEC-71 Motor mit Ferritmagneten vorzustellen, ist das FEMAG Modell im Bild10 abgebildet.

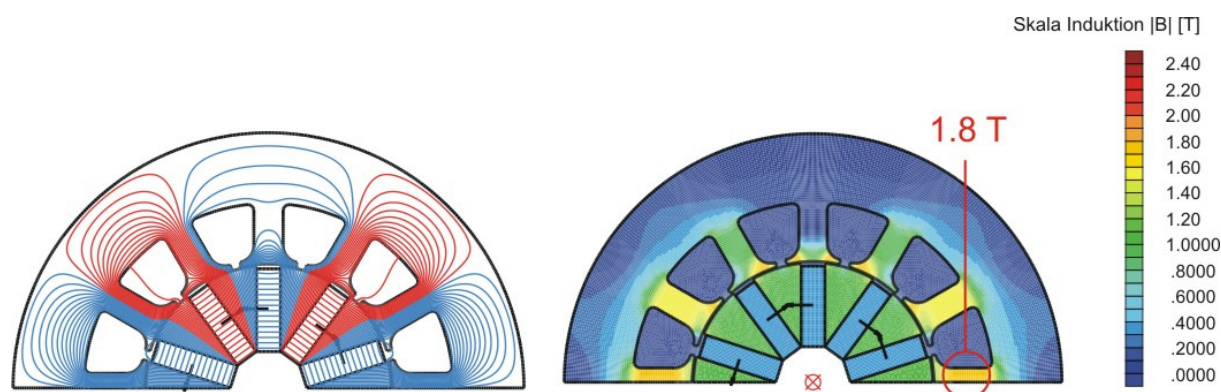
Im Bild 10 ist das Verhältnis der Länge der Magnete in radialer Richtung etwa gleich dem Polbogen. Damit findet keine wesentliche Verdichtung der Feldlinien im V-förmigen Teil des Rotors statt.



Im Bild 11 sind die wenig verdichteten Feldlinien im V-förmigen Teil sehr gut sichtbar.

Im Bild 12 ist die Induktion im Steg noch zu gering.

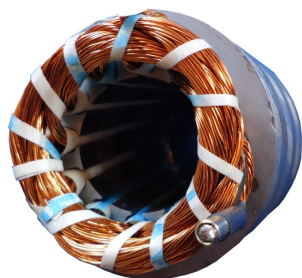
Es liegt nun nahe den Rotor mit mehr als 4 Polen auszuführen. Im Katalog der Stanzwerk AG findet sich ein Blechschnitt für die Baugröße IEC-71 mit 12 Zähnen. Die Circle Motor AG baute eine Permanentmagnet Maschine mit Magneten aus Seltenen Erden in der Baugröße IEC-100 [14]. Dieser Motor ist mit 6 Polen für eine Nenndrehzahl von 3000rpm ausgeführt. Mit den verwendeten Standard Elektroblechen in der Qualität M400-50A liegt der gemessene Wirkungsgrad bei 92%. Die Ummagnetisierung im Elektroblech beträgt dabei 150Hz. In diesem Frequenzbereich arbeiten Elektromotoren immer noch hoch effizient. Mit einer Polzahl von 10 beim Motor IEC-71 und einer Nenndrehzahl von 1500rpm liegt die elektrische Frequenz bei 125Hz und mit dem Blechschnitt mit 12 Zähnen kann die Wicklung des Stators konzentriert ausgeführt werden. Jeder Zahn wird dabei einzeln bewickelt.



Die Bilder 13 zeigen sehr schön die verdichteten Feldlinien und die Induktion im Leerlauf der Maschine.

Der Wert der Induktion beträgt nun im orange dargestellten Steg 1.8T, also einem Wert, wie bei der Maschine mit Neodym-Eisen-Bor Magneten. Damit ist die Voraussetzung gegeben, dass auch bei der Maschine mit Ferritmagneten die induzierte Spannung gleich der Klemmenspannung sein kann.

Die Maschine mit 10 Polen erlaubt eine konzentrierte Wicklung. Bezüglich der Herstellung hat die konzentrierte Wicklung den Vorteil, dass bei entsprechendem Aufbau des Stators jeder Zahn einzeln bewickelt werden kann. Mit dem Verfahren der Einzelzahn-Bewicklung steigt der Füllfaktor in den Nuten an und der Kupferwiderstand sinkt. Beim Stator einer Einzelzahn-Wicklung kann aus wirtschaftlichen Gründen Elektroblech mit Kornorientierung verwendet werden. Beide Massnahmen; Kornorientierung und vergrößerter Kupferfüllfaktor erhöhen die Effizienz der Maschine.



Fotos 14: Stator mit verteilter Wicklung



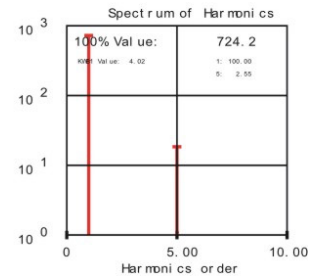
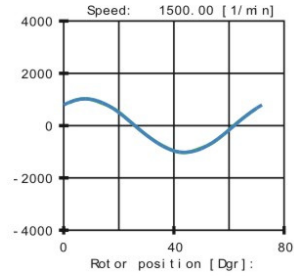
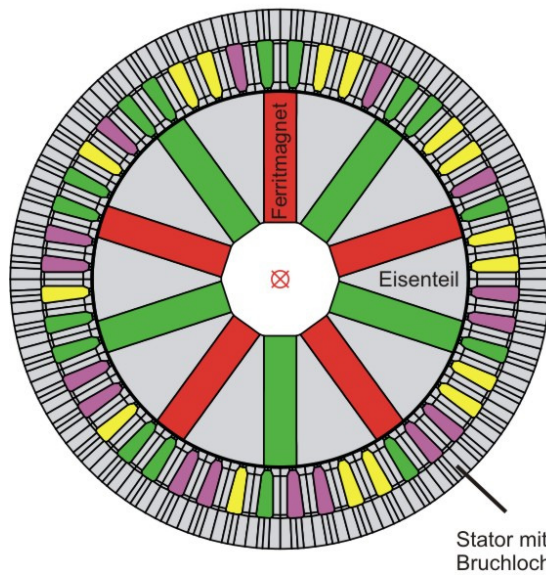
Foto 15: Stator mit konzentrierter Wicklung

Um sich eine verteilte und eine konzentrierte Wicklung vorstellen zu können, zeigen die Fotos 14 und 15 die entsprechende Art der Wicklung.

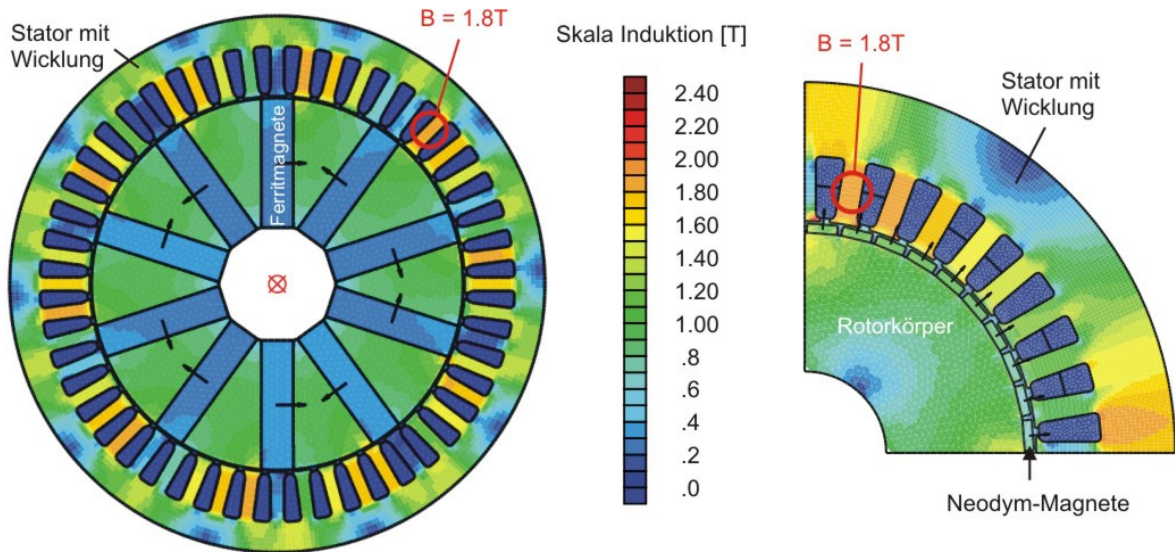
Die Berechnung des **Reluktanzmotors** erfolgt aus dem FEMAG Modell des IEC-71 Motors gemäss Bild 9 links. Dieses Modell trägt Neodym-Eisen-Bor Magnete auf der Rotoroberfläche. Die Induktivität L_d ist bei dieser Magnetanordnung gleich L_q . Der Wert von L_d wird für die Berechnung des IEC-71 Reluktanzmotors variiert. Das Magnetfeld beim Reluktanzmotor wird mit dem Magnetisierungsstrom I_d aufgebaut. Damit der Magnetisierungsstrom die max. Stromdichte von $6A/mm^2$ im Wicklungsdraht nicht überschreitet, ist ein Unterschied der Induktivität L_d/L_q von Faktor 7 nötig. Ob dies bei einem Kleinmotor machbar ist, bleibt noch offen. Ein Reluktanzmotor trägt keine Permanentmagnete, somit ist der Wert für die induzierte Spannung gleich Null zu setzen.

Motor IEC-132

Aus den Erkenntnissen mit dem FEMAG-Modell des IEC-71 Motors ist es nun sinnvoll, das Modell des IEC-132 Motors mit Ferritmagneten ebenfalls mit mehr als vier Polen auszulegen. Für den Aufbau des FEMAG Modells wird ein Standard-Blechschnitt [12] eines Asynchronmotors IEC-132 mit 48 Zähnen verwendet. Würde der Stator mit einer konzentrierten Wicklung ausgeführt, führte dies im Betrieb bei 1500rpm zu unzulässigen Eisenverlusten. Interessant ist es nun die 132er Maschine, ebenfalls mit 10 Polen auszubilden. Pro Pol und Phase können für die Wicklung nur noch wenige Nuten zugeordnet werden, was erfahrungsgemäss zu Oberwellen führt. Es ist zudem auch bekannt, dass die Anordnung der Ferritmagnete im Rotor ebenfalls Oberwellen erzeugen. Eine geeignete Massnahme die Oberwellen zu dämpfen ist der Einsatz einer Bruchlochwicklung. Aus diesem Grund ist die Wicklung im Modell der IEC-132er Maschine mit einer Bruchlochwicklung mit 10 Polen aufgebaut. Gemäss dem Katalog von Kienle und Spiess [13] wird für die axiale Länge des Eisenpakets der Maschine 170mm eingesetzt. Die Grösse des Luftspalts zwischen Rotor und Stator entspricht einem gleichwertigen Asynchronmotor.



FEMAG-Modell 16 mit dem zeitlichen Verlauf der Spannung und dem Spektrum der Oberwellen unter Last



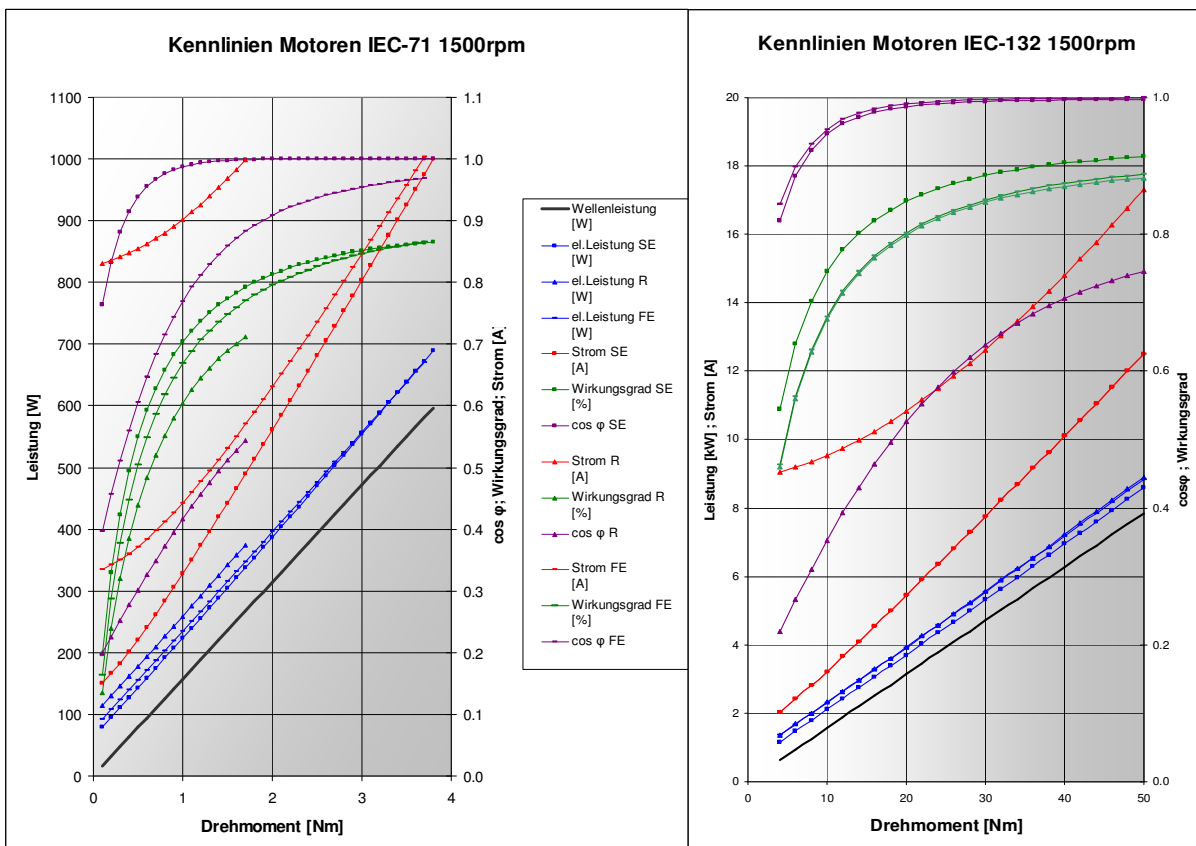
Die FEMAG Bilder 17 mit Verteilung der Induktion

Modell mit Ferritmagneten

1/4 Modell mit Oberflächen Neodym-Eisen-Bor Magneten

Das FEMAG Modell 16 zeigt den Stator mit einer Bruchlochwicklung. Der unterschiedliche Wicklungsschritt bei den Nuten ist sehr gut sichtbar. Im Rotor sind 10 Stück grosse Ferritmagnete eingebaut. In der Darstellung 16 rechts ist der Verlauf der Phasenspannung sinusförmig und das Spektrum der Sinusspannung zeigt nur noch einen Anteil der 5ten Harmonischen. Bei beiden Motoren in den Bildern 17 ist das Elektroblech magnetisch ausgelastet. Die Induktion in den rot markierten Stegen beträgt 1.8T. Im Bild 17 rechts ist das Modell eines IEC-132 Motors mit 4 Polen aus Neodym-Eisen-Bor Magneten gezeigt. Dieses Modell bildet die Grundlage zur Berechnung des Reluktanzmotors in der Grösse IEC-132. Der Unterschied von Faktor 7 bei den Induktivitäten wird gemäss Motor IEC-71 beibehalten.

Diskussion und Schlussfolgerung



Kennlinienfeld 18 der IEC-71 Motoren

Kennlinienfeld 19 der IEC-132 Motoren

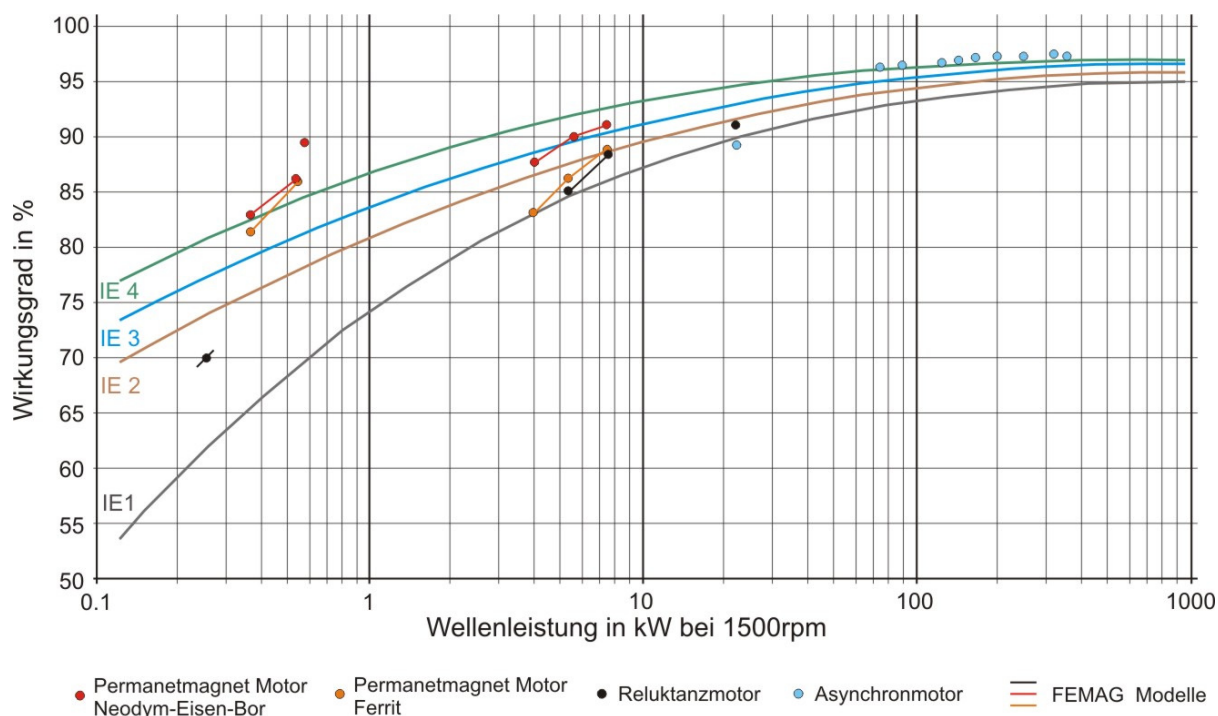
Kurvendiskussion

Bei der Legende betrifft die Bezeichnung SE den Permanentmagnet Motor mit Neodym-Eisen-Bor Magneten, FE den Permanentmagnet Motor mit Ferritmagneten und R den Reluktanzmotor. Die schwarze Linie ist für alle Motoren pro Diagramm gleich und gibt die Wellenleistung an. Die Wellenleistung ist gleich dem Drehmoment multipliziert mit 2π . Die blauen Linien sind die el. Aufnahmeleistungen, die roten die Aufnahmeströme, die grünen die Wirkungsgrade und die violetten Linien geben den Leistungsfaktor an.

Als erstes fällt auf, dass bei der Baugröße IEC-71 die Kurven des Permanentmagnet Motors mit Neodym-Eisen-Bor Magneten und des Permanentmagnet Motors mit Ferritmagneten ähnlich sind. Der Reluktanzmotor zeigt einen Verlauf wie bei einer Asynchronmaschine und fällt im Wirkungsgrad ab.

Bei der Baugröße IEC-132 sind die Linien des Permanentmagnet Motors mit Ferritmagneten und des Reluktanzmotors sehr nahe zusammen. Die Linie des Stroms ist sogar für den Permanentmagnet Motor mit Ferritmagneten und den Reluktanzmotor identisch. Der Unterschied der beiden Motoren zum Permanentmagnet Motor mit Neodym-Eisen-Bor Magneten beträgt bei Nennlast von 7.5kW etwa 3%.

In den folgenden Seiten wird spezifisch für den jeweiligen Typ des Motors auf die Kennlinien 18-20 Bezug genommen.



Die Kennlinien 20 zeigen die Wirkungsgrade bei Standard-Nennleistung der untersuchten Motoren im Bezug zu den Effizienzkassen. Die Punkte des Wirkungsgrads mit einem Strich sind mittels FEMAG Modellen berechnet.

Das Ergebnis dieser Forschungsarbeit ist eine Abschätzung, ob hocheffiziente Elektromotoren für den Einsatz in der Industrie, mittels keramischen Magneten, einer ausgeprägten Reluktanz oder aus einer Kombination von beiden unter Verzicht von Seltenen Erden Magneten möglich sind. **Diese Frage kann positiv beantwortet werden.**

Im hohen Leistungsbereich der Norm IEC 60034-30 ist es wahrscheinlich, dass der Asynchronmotor seinen Platz beibehalten wird. **Diese Aussage begründet sich in einer früheren Feststellung [11], dass sich die asynchrone- und die synchrone Technologie bezüglich Effizienz bei Industriemotoren im Bereich von 100kW einander annähern.** In den Kennlinien 20 oben rechts, sind die Wirkungsgrade der mittels Recherche gefundenen IE4 Asynchronmotoren [9] als blaue Punkte dargestellt. Die Technik der Asynchronmotoren bewährt sich in der Herstellung, im Betrieb und die Steigerung des Wirkungsgrads erreicht im höheren Leistungsbereich IE4. Der Vorteil des Permanentmagnet Motors im höheren Leistungsbereich ist sein geringeres Gewicht und das kleinere Bauvolumen als bei einem vergleichbaren Asynchronmotor [11]. Der Nachteil ist der grössere Fertigungsaufwand beim Montieren der Magnete und beim Zusammenbau des Motors. Zu bemerken sind auch die enormen Zugkräfte, welche die Permanentmagnete auf benachbarte Maschinenteile hervorrufen. Bei bestimmten Anwendungen ist es ein Nachteil, wenn das Magnetfeld in Motor nicht abgeschaltet werden kann.

Konkrete Vorschläge für nächste Schritte nach Projektabschluss können für den Permanentmagnet Motor mit Ferritmagneten im unteren Leistungsbereich der Norm IEC 60034-30 und für den Reluktanzmotor im mittleren Bereich der Norm IEC 60034-30 angegeben werden. Die Ausführungen dazu und die weiterführende Diskussion der Kennlinie 20 folgen deshalb ab Ende der nächsten Seite.

Ökologische und wirtschaftliche Aspekte

Bei den Metallen der Seltenen Erden ist der Herstellungsprozess aufwendig und hinterlässt giftige und bei bestimmten Erzen radioaktive Abfälle. Im globalen Kontext gesehen, ist es im Bezug zur Ökologie besonders angezeigt elektrische Maschinen zu verwenden, die keine Metalle der Seltenen Erden beinhalten. Diese Massnahme ist im Clean Tech Bereich praktisch ein Muss. Damit sind elektrischen Maschinen eingesetzt zur Gewinnung von Elektrizität aus regenerativen Energiequellen, effiziente Elektromotoren und Antriebe in der Elektromobilität gemeint.

In Produkten, bei denen das Gewicht oder die Grösse einer el. Maschine eine untergeordnete Rolle spielt, sollte der Einsatz von Alternativen zu Metallen der Seltenen Erden zwingend geprüft werden. Es macht keinen Sinn in Kleinwind- oder Kleinwasseranlagen Metalle der Seltenen Erden zu verbrauchen und auf der anderen Seite des Globus bewusst Umweltschäden in Kauf zu nehmen. Bei grossen Windparks mit einzelnen Anlagen im MW Bereich, welche mehrere 100kg an Neodym-Eisen-Bor Magneten pro Windgenerator [15] benötigen, ist das Problem insofern entschärft, da das Magnetmaterial bei einem Recyclingprozess konzentriert anfällt.

Bei mittleren und grossen Wasserkraftwerken ist die elektrische Erregung eine etablierte Methode zum Magnetisieren von Generatoren. Die Generatoren sind ohne Wechselrichter mit dem Netz direkt gekoppelt und mit dem Erregerstrom des Generators wird die Blindleistung im Netz gesteuert. Die Übertragung von Strom mittels Schleifringen auf den Rotor einer el. Maschine gehört ebenfalls zu den Massnahmen um ohne Metalle der Seltenen Erden auszukommen. Bezüglich der Standzeiten der mechanisch arbeitenden Schleifringe ist der Einsatz bei Industriemotoren nicht gegeben. Eine berührungslose induktive Übertragung der Energie auf den Rotor hat sich nicht durchgesetzt.

Bei der Planung von Anlagen sollte eine **Ökobilanz** vorliegen, welche der **spätere Abbau** der Anlage und die fachgerechte Entsorgung **der Abfälle** mit einbeziehen.

Ein weiterer Nachteil ist das Monopol von China bei der Förderung und Aufbereitung der Metalle der Seltenen Erden. Ein Monopol ist für die Käufer am Markt immer unangenehm. Die künstliche Verknappung führte im Sommer 2011 zu einer Preisblase bei Magneten aus Neodym-Eisen-Bor. [4,7]

Vergleicht man die **Kosten der Magnete** zwischen den beiden Modellen 17, so sind die Kosten für die **Ferritmagnete** im Modell links nur bei erstaunlichen **20%** gegenüber den Modell mit **Neodym-Eisen Bor- Magneten**. Die Berechnung der Kosten basiert auf einer hohen Stückzahl, direkt in China angefragt.

Konkrete Resultate und vorgeschlagene nächste Schritte

Permanentmagnet Motoren

Die Kennlinienfelder 18,20 der IEC-71 Motoren zeigen, dass die Kurven der Wirkungsgrade des Motors mit Neodym-Eisen-Bor Magneten und des 10 Pol-Motors mit Ferritmagneten eng beieinander liegen. Alle Motoren wurden mit der gleichen Qualität des Elektroblechs berechnet. Der 10 Pol Motor arbeitet mit einer höheren el. Frequenz und weist deshalb höhere Eisenverluste auf. Diese Eisenverluste sind verantwortlich für die Differenz des Wirkungsgrads bei tiefer Teillast. Der 10 Pol Motor mit Ferritmagneten trägt eine konzentrierte und der Motor mit Neodym-Eisen-Bor Magneten eine verteilte Wicklung. Der ohmsche Widerstand ist bei der verteilten Wicklung signifikant grösser als bei der konzentrierten Wicklung, da die verteilte Wicklung mehr Kupfer in den Wicklungsköpfen benötigt. Der 10 Pol Motor mit Ferritmagneten weist einen kleinen Wicklungswiderstand und grössere Eisenverluste auf. Beim Motor mit 4 Polen und Neodym-Eisen-Bor Magneten ist es genau umgekehrt. Diese Gegebenheit führt dazu, dass der Wirkungsgrad bei beiden Modellen mit Permanentmagneten der Grösse IEC-71 ähnlich verläuft. Bezüglich wirtschaftlicher Herstellung und gutem Wirkungsgrad ist es vorteilhaft den Stator mit einer konzentrierten Wicklung zu fertigen. Ebenfalls vorteilhaft ist das Verfahren der Einzelzahn Bewicklung. Durch diese Massnahme steigt der Kupferfüllfaktor im Nutenraum an. Zudem ist es wirtschaftlich möglich beim Einzelzahn Verfahren verlustarmes Blech einzusetzen und die Richtung des magnetischen Flusses in die Kornrichtung des Elektroblechs zu legen. Beide Massnahmen, sinkende spezifische Kupferverluste und verlustarmes Blech erhöhen den Wirkungsgrad. Diese Massnahmen sind auch bei Motoren mit Neodym-Eisen-Bor Magneten möglich. Als Anhaltspunkt welche Wirkungsgrade bei Baugrössen um IEC-71 möglich sind, zeigt ein an der Hochschule Luzern gebauter Generator [16] in der Grösse IEC-80. Bei 1500rpm beträgt der gemessene Wirkungsgrad 89.2%, welcher in der Kennlinie 20 als roter Punkt links oben eingetragen ist. Dieser Generator trägt eine verteilte Wicklung. Im Eisenkörper des Rotors sind 4 Neodym-Eisen-Bor Magnete, gemäss Bild 10 eingelegt. Der 10 Pol Motor mit Ferritmagneten und der Motor mit Neodym-Eisen-Bor Magneten sind bezüglich der magnetischen Induktion im Elektroblech des Stators gleichwertig. Die Verluste werden somit vorwiegend durch die el. Frequenz und das Oberwellenverhalten bestimmt. Es ist deshalb davon auszugehen, dass der Unterschied des Wirkungsgrads im unteren Leistungsbereich der Norm IEC 60034-30 zwischen einem Permanentmagnet Motor mit Ferritmagneten und einem Permanentmagnet Motor mit Neodym-Eisen-Bor Magneten sehr gering bleibt. Der Wirkungsgrad eines Reluktanzmotors fällt in diesem Leistungsbereich signifikant ab.

Die Norm IEC 60034-30 wird neu mit einer Leistungsuntergrenze von 120W erweitert. Weltweit sind im Kleinleistungsbereich enorm viele Motoren im Einsatz und eine Steigerung des Wirkungsgrads durch Forschung und Entwicklung kann in diesem Leistungsbereich gut 10% erreichen. **Das Potenzial zum Sparen von el. Energie ist bei Kleinmotoren enorm!** Im höchsten Leistungsbereich wird an zehntel Prozent des Wirkungsgrads gearbeitet.

Die Kennlinien des Wirkungsgrads der Permanentmagnet Motoren steigen im rechten Bereich des Kennlinienfelds 18,19 immer noch leicht an. Der max. Wirkungsgrad bei einer nominalen Stromdichte von 6A/mm^2 im Wicklungsdraht ist bei den Motoren der FEMAG Modelle noch nicht erreicht. Die Standard Gehäuse sind für die Permanentmagnet Technik nicht angepasst, wenn beim Permanentmagnet Motor die gleiche axiale Baulänge des Eisenpakets verwendet wird, wie beim entsprechenden Asynchronmotor. Bei der Verwendung im untersten Leistungsbereich der Norm IEC 60034-30 soll, bei gegebener Normgrösse der Flansche, das Statorgehäuse und das Eisenpaket in axialer Richtung verkleinert werden. Damit schiebt sich der Punkt des maximalen Wirkungsgrads in den linken Bereich des Kennlinienfelds. Es ist sinnvoll, die Stufung der Nennleistungen bei den alternativen Motoren so zu belassen wie bei den Normmotoren.

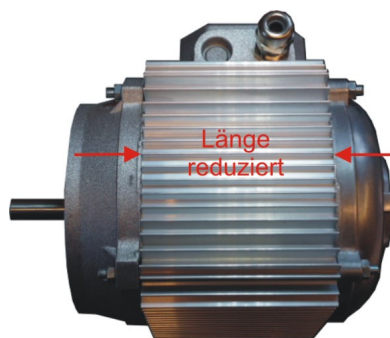


Foto 21 zeigt den Aufbau eines Permanentmagnet Motors mit Normflanschen und reduziertem Statorgehäuse, das in eleganter Weise aus einem Aluminium Strangpressprofil hergestellt ist.

Vorgeschlagene nächste Schritte nach Projektabschluss zu den Permanentmagnet Motoren im unteren Leistungsbereich der Norm IEC 60034-30.

Die FEMAG Modelle sind so ausgelegt, dass eine Abschätzung möglich wird, ob hoch effiziente Industriemotoren unter Verzicht von Metallen der Seltenen Erden möglich sind. Der Aufbau der Modelle basierte auf Erfahrung und empirischen Vorgehen. Der Einfluss des magnetischen Rastmoments und der Oberwellen wurden noch nicht vertieft untersucht. Konkrete Motoren könnten aus den FEMAG Modellen noch nicht gebaut werden.

Diese Studie erkennt die globale ökologische Auswirkung, wenn mit den alternativen el. Maschinen Metalle der Seltenen Erden eingespart werden. Es wird deshalb vorgeschlagen erarbeitetes Wissen zu den alternativen el. Maschinen, als Generator wie auch als Motor möglichst weiterzugeben. Eine Idee ist es ein Drehbuch für eine Permanentmagnet Maschine mit Ferritmagneten so zu beschreiben, dass eine Fachkraft diese Art Maschine versteht und bei entsprechenden Fähigkeiten auch herstellen kann. Wenn der Bau dieser Maschine gewünscht wird, könnte diese im Motorbetrieb mit Vektorregelung auf einem Prüfstand gemessen werden. Eine Recherche zeigte, dass praktisch alle namhaften Herstellern von Umformern (Siemens, ABB, Yaskawa, Hitachi) Geräte mit Vektorregelung anbieten. Zudem wird der geberlose Betrieb von Permanentmagnet Motoren beworben. Somit könnte die Effizienz des vorgeschlagen Motor zusammen mit einem Vektorumformer im geberlosen Betrieb bestimmt werden. Die Kennlinien und die Erfahrungen könnten mit einem Bericht veröffentlicht werden.

Elektromotoren für den Antrieb von Pumpen, Lüftern, Kompressoren sind die grössten Verbraucher von Elektrizität. Mit effizienten Motoren im **Umrichterbetrieb** und optimierten Betriebsprozessen ist das **grösste Sparpotenzial** gegeben. [17]

Reluktanzmotor

Das Kennlinienfeld des Reluktanzmotors aus dem FEMAG Modell des IEC-71 zeigt ähnliches Verhalten wie ein Asynchronmotor. Der Aufnahme Strom in Funktion des Drehmoments ist über den gesamten Bereich hoch. Ein grosser Teil des Stroms wird benötigt um dem Luftspalt (im Beispiel 0.3mm) zu magnetisieren. Aus wirtschaftlichen Gründen kann der Luftspalt bei Kleinmotoren nicht beliebig verkleinert werden. Beim verkleinern der Baugrösse wird das Verhältnis der Wellenleistung zur Magnetisierungsleistung immer ungünstiger und der Wirkungsgrad nimmt ab. Deshalb ist ein effizienter Betrieb von Reluktanz- und Asynchronmotoren erst ab einer gewissen Baugrösse möglich, welche deutlich über dem von Permanentmagnet Motoren liegt. Die Kennlinien 20 zeigen im Bereich von 10kW den Übergangsbereich.

Der Reluktanzmotor benötigt im Rotor keine Flussverdichtung wie beim Permanentmagnet Motor mit Ferritmagneten und 10 Polen. Der Rotor des Reluktanzmotors wird deshalb meist mit 4 Polen ausgeführt, auch beim Betrieb mit 3000rpm. Zu bemerken ist, dass die Eisenverluste bei den vorgeschlagenen Permanentmagnet Motoren mit hohen Polzahlen und Ferritmagneten bei Drehzahlen von 3000rpm signifikant steigen.

Im Kennlinienfeld 20 sind die Kurven des Wirkungsgrads bei der Baugrösse IEC-132 des Permanentmagnet Motors mit Ferritmagneten und die des Reluktanzmotors nahe beieinander. Der Permanentmagnet Motor mit Neodym-Eisen-Bor Magneten hebt sich um etwa 3% ab.

Die Kriterien für den Einsatz eines Reluktanzmotors werden nicht alleine die Effizienz sein, sondern auch Aspekte der Wirtschaftlichkeit und Robustheit betreffen. Der Rotor des Reluktanzmotors besteht nur aus Eisenblech. Es müssen weder Magnete eingebaut, noch muss Aluminium oder Kupfer in den Rotor eingegossen werden. **In genialer Weise wird Fertigungsaufwand beim Rotor mit Intelligenz in modernsten Vektorumformern ersetzt.** Der Reluktanzmotor benötigt Erregerleistung, aber im Gegensatz zum Asynchronmotor gibt es keine Stromwärme- und Ummagnetisierungsverluste im Rotor.

Der Reluktanzmotor ist für den Einsatz im mittleren Leistungsbereich der Norm IEC 60034-30 sehr interessant. Gegenüber dem Permanentmagnet Motor sticht das Argument des einfacheren robusten Aufbaus.

Vorgeschlagene nächste Schritte nach Projektabschluss zu den Reluktanzmotoren im mittleren Leistungsbereich der Norm IEC 60034-30.

Bei Recherchen zur Effizienz von Reluktanzmotoren zeigten sich nur punktuelle Resultate. Ein Wert des Wirkungsgrads eines Reluktanzmotors plus Umrichter ist in der Kennlinie 20 bei 22kW eingetragen. Wenig tiefer findet sich zum Vergleich der Punkt eines angegebenen Asynchronmotors im Umrichterbetrieb. [8]

Aufschlussreich wäre es deshalb ein Reluktanzmotor mit zugehörigem Umformer auf einem Prüfstand zu messen, die Kennlinien des Wirkungsgrads aufzunehmen und die Erfahrung mit dieser Technik in einem Bericht festzuhalten.

Die FEMAG Modelle der Reluktanzmotoren der Grösse IEC-71 und 132 basieren auf einem Unterschied der Induktivitäten von Faktor 7. Die Differenz des Wirkungsgrads bei Nennlast und Baugrösse IEC-132 zwischen dem Reluktanzmotor und dem Permanentmagnet Motor mit Neodym-Eisen-Bor Magneten beträgt 3%. Eine Differenz die zu Überlegungen anregt. Bei der Berechnung des Reluktanzmotors ist aufgefallen, dass der Wirkungsgrad mit zunehmendem Unterschied der Differenz der Induktivitäten ansteigt. Es wäre deshalb sinnvoll mit einer FEMAG Analyse zu prüfen, ob der angenommene Faktor in der Praxis machbar ist, oder sogar noch vergrössert werden könnte. Die Vektordiagramme zum Reluktanzmotor könnten dargestellt und diskutiert werden.

Für den **mittleren Leistungsbereich** der Norm IEC 60034-30 gibt es noch eine offene Frage? Es gibt Servomotoren mit konzentrierter Wicklung und mit der Herstellungstechnik der Einzelzahn-Wicklung. Diese Art von Motoren mit Ferritmagneten aufgebaut, könnte eine Konkurrenz zum Reluktanzmotor sein. Ist die Servotechnik mit Ferritmagneten für den Markt der Industriemotoren konkurrenzfähig? Die Konkurrenzfähigkeit bezieht sich auf den Preis und auf die Einsparung von Energie.

Vorgeschlagene nächste Schritte nach Projektabschluss zur Ökologie.

Beim Ausführen dieses Berichts fand eine Sensibilisierung gegenüber Rohstoffen und ökologischen Aspekten statt.

Gibt es Recyclingverfahren für Metalle der Seltenen Erden? Gibt es diese speziell für Neodym-Eisen-Bor? Wie aufwändig und energieintensiv sind diese?

Wie sind die Entsorgung und das Recycling für elektrische Maschinen in der Schweiz organisiert?

Wird an Recyclingverfahren von Elektromotoren geforscht? In modernsten Anlagen zur Verbrennung von Kehricht werden Metalle zu Granulat verarbeitet und automatisch sortiert. In der Landwirtschaft wird an der Rückgewinnung von Phosphor aus biologischen Abfällen geforscht. Ist eine Art Schredder vorstellbar, der komplette Elektromotoren in Granulat zerlegt und dieses nach der Art der Rohstoffe sortiert?

Das Kupfer der vielen Kleinstmotoren im Stahlschrott versprödet bei der Aufbereitung, ohne aufwändige Gegenmassnahme, den Baustahl!

Die FHO Fachhochschule Ostschweiz; Institut für Wissen Energie und Rohstoffe Zug wäre eine Ansprechstelle für diese Fragen.

Eine der vorliegenden Studie entsprechende, wäre auch für elektrische Antriebe im Bereich der Elektromobilität angezeigt. Bei einer globalen Zunahme der Elektrofahrzeuge wird der Bedarf an Magnetmaterial enorm ansteigen. In einem Hybridauto sind 20kg Metalle der Seltenen Erden verbaut [15]. Die Konstruktion von Antriebsmotoren für Fahrzeuge ist unterschiedlich zu den Industriemotoren.

Referenzen

- [1] Beilage der Schweizerischen Handelszeitung: Haustech September 2012, Nr 9 Artikel: Nachhaltiger Umgang mit Energie
- [2] CHEMIE, Fakten und Zahlen: VEB Fachbuchverlag Leipzig 1977, bewusst alte Quelle aufgeführt. Hier wird bereits beschrieben, dass gewisse Erze der Seltenen Erden Radioaktivität aufweisen
- [3] Bayan Obo Mine: (41°47'53"N 109°58'31"O)
- [4] Aluminium Unfall in Ungarn: (47°5'10"N 17°29'49"O)
- [5] Newsletter September 12 der Bomatec AG, HÖri
- [6] Globale Aluminium Produktion: www.aluinfo.de
- [7] Newsletter Oktober 12 der Bomatec AG, HÖri
- [8] Prospekt: Antriebspaket mit high output Synchronreluktanzmotor / Optimierte Kosten für Pumpen- und Lüfteranwendungen. ABB Schweiz AG, erhalten am Motor Summit 2012 in Zürich
- [9] Prospekt: Neue IE4 Motoren für die Prozessindustrie. ABB Schweiz AG
erhalten am Motor Summit 2012 in Zürich
- [10] Prospekt: New process performance IE3 aluminium motors. ABB Schweiz AG
erhalten am Motor Summit 2012 in Zürich
- [11] Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanentmagnet Motoren.2006
Studie des Bundesamts für Energie, durchgeführt von den Hochschulen Luzern / Wallis und der Circle Motor AG
- [12] Katalog: gestanzte Elektrobleche, Stanzwerk AG, Unterendfelden (CH), Ausgabe 1998
- [13] Katalog: Bauelemente für Normmotoren, Kienle+Spiess, Sachsenheim (D)
- [14] Effizienter IEC Permanentmagnet Motor 2008
Auftrag des Bundesamts für Energie, durchgeführt von den Hochschulen Luzern / Wallis und der Circle Motor AG
- [15] onyx forum, Information der BKW-Gruppe, Ausgabe 1.März 2013, Kurzartikel über Seltene Erden: Seite 13
- [16] Diplomarbeit Adrian Ambord, Daniel Blaser, Kleinstgenerator,
Hochschule Technik & Architektur Luzern, 24.11.2000
- [17] www.topmotors.ch

Abbildungen Darstellungen, Fotos:

Alle Abbildungen, Diagramme, Fotos sind von der Circle Motor AG erstellt.