



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Jahresbericht 23.11.2012

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

Autoren:

Markus Lindegger dipl.el.Ing.HTL, Circle Motor AG, info@circlemotor.ch

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

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Projektziele

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 auch aufzeigen wird. 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 auch 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.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Die Auftragserteilung des Bundesamts für Energie erfolgte anfangs November, sodass in den drei Wochen bis zur Abgabe des Jahresberichts die beiden folgenden Themen bearbeitet wurden:

Eine **Einleitung**, welche dem grundsätzlichen Verständnis der Seltenen Erden für die Anwendung von Permanentmagneten, sowie der Problematik dieser chemischen Elemente dient.

Einem **Überblick** über gängige Magnetmaterialien.

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 äussere 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 knapp unter 1000 kA/m, eine Remanenz von 1.4 Tesla und mit Legierungszusätzen eine Temperaturbeständigkeit vom 150 °C. Diese Werte 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:

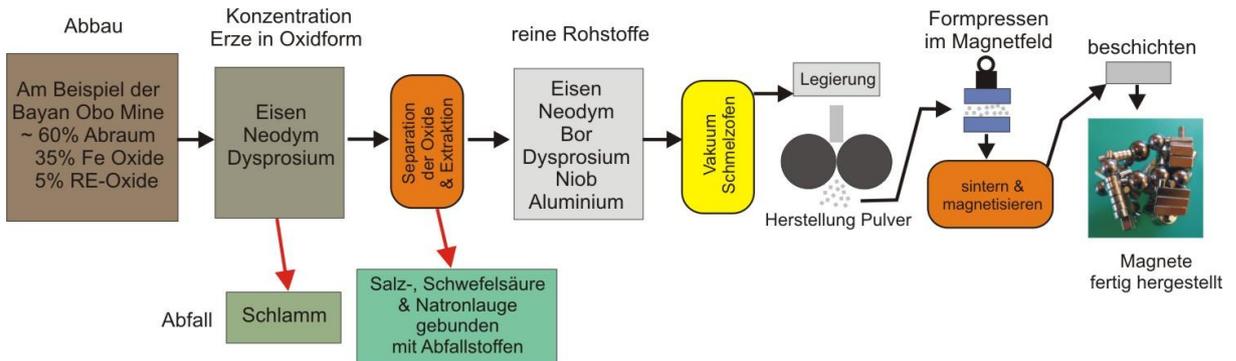
Bastnasit [(Ce,La,Nd) (CO₃)F]

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)



Blockdiagramm 1: zeigt den Herstellprozess der Nd₂Fe₁₄B Magnete

Ökobilanz und Aspekte des Umweltschutzes



Diagramm 2: Gegenüberstellung NdFeB Magnet mit technischen Grundstoffen

Das Diagramm 2 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. Die Preise sind immer noch auf recht hohem Niveau und sind etwa noch doppelt so teuer wie beim Höchststand vor zwei Jahren. [7]

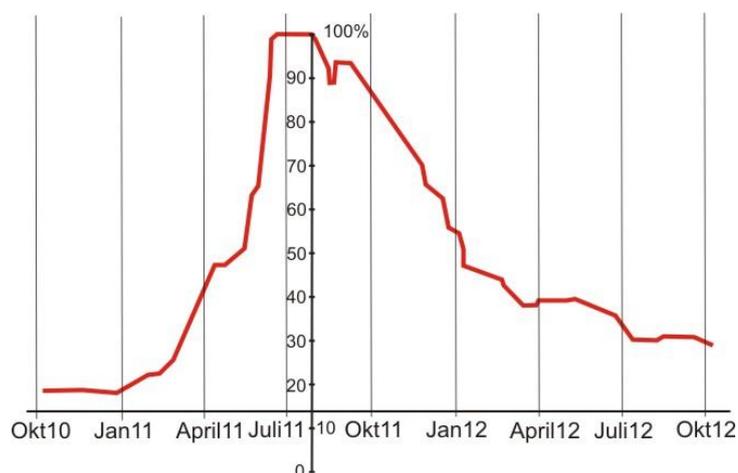


Diagramm 3 zeigt die Preisentwicklung von Neodym Metall Reinheit min 99%, Inlandmarkt China

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].

Die Folgen des 18. Parteitags der kommunistischen Partei in China vom 8. November 2012 werden die Weichen für die Zukunft neu stellen. Mit grosser Wahrscheinlichkeit wird die neue Führung auch eine Dekade lang regieren und die Industriepolitik neu prägen. Noch offen ist die Politik der neuen Regierung im Umgang mit den Seltenen Erden. [7].

Überblick der gängigen Magnetmaterialien für Elektromotoren.

In Elektromotoren werden heute vorwiegend Neodym-Eisen-Bor Magnete und Magnete aus Hartferrit verwendet.

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 800 bis knapp unter 1000 kA/m. Mit rund 500 kJ/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 lösten sich auch von innen auf, wie Foto 5 zeigt. Durch Zusätze von weiteren Seltenen Erden, wie Dysprosium oder Terbi-um konnte die maximale Einsatztemperatur bei optimierten Legierungen bis 180°C erweitert werden. Ein Zusatz von Kobalt verbessert die Korrosionsbeständigkeit. Die Oberflächen der Magnete sind mit einer Nickel- oder Epoxid Beschichtung nochmals gegen Korrosion geschützt.



Foto 4: neuer Rotor mit Neodymmagneten bestückt



Foto 5: Rotor 15 Jahre alt

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 1-2µm 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 von 0.13 bis 300 kA/m. Zudem sind Hartferrite bis 250 °C einsetzbar.

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 SmCo_5 und $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Wirtschaftlich haben Samarium-Kobalt Magnete, gegenüber Neodym-Eisen-Bor Magneten den Nachteil, des signifikant höheren Preis. Auch die Remanenz mit durchschnittlich 1 Tesla und die Koerzitivfeldstärke von rund 750 kA/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 1.2 Tesla relativ hoch. Die Koerzitivfeldstärke von AlNiCo beträgt nur 50-100 kA/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 knapp 200 kA/m, bei Neodym-Eisen-Bor 0.6 Tesla und 400kA/m.

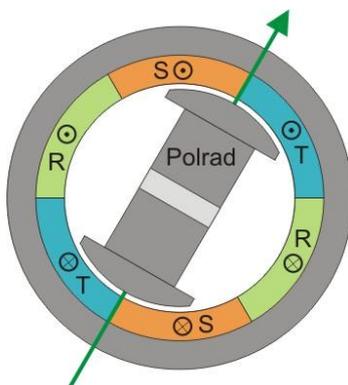
Bewertung 2012 und Ausblick 2013

Die Arbeit im 2012 zeigte die Problematik der Seltenen Erden auf. So entstehen bei der Herstellung Umweltschäden durch offene Deponien mit giftigen und zum Teil radioaktiv verseuchten Schlämmen, wenn der Herstellungsprozess ökologisch nicht zu Ende geführt wird. Die Volksrepublik China hat bei der Produktion von Neodym-Eisen-Bor Magneten faktisch ein globales Monopol. Die wirtschaftliche Abhängigkeit von einem Monopol ist immer unangenehm. Die Marktteilnehmer, welche Neodym-Eisen-Bor Magnete einsetzen, müssen deshalb mit starken Preisschwankungen umgehen können, was bei der Kalkulation der Produkte oft schwierig ist.

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 vermehrt Permanentmagnet-Motoren mit Seltenen Erden zum Einsatz kommen könnten. Eine Verschärfung der Problematik durch Seltenen Erden, wie oben beschrieben, wäre die Folge. Auch deshalb weil die Norm IEC 60034-30 eine globale Norm ist.

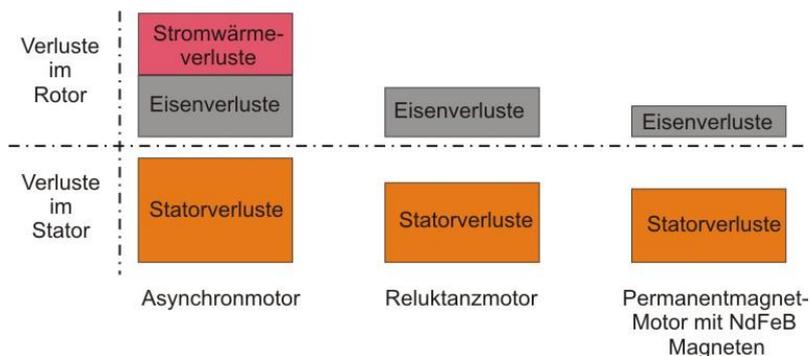
Die Forschungsarbeit im 2013 soll deshalb zeigen, ob effiziente Industriemotoren, ohne den Einsatz von Seltenen Erden möglich sind.

Dazu werden die Funktionsweise und der Aufbau möglicher Motoren ohne den Einsatz von Seltenen Erden beschrieben und die Verlustquellen aufgezeigt, welche in direkter Weise den Wirkungsgrad bestimmen. Als Referenz des Wirkungsgrads dient der Normmotor (Asynchronmaschine), dessen Wirkungsgrad mit der Norm IEC 60034-30 definiert ist. Die alternativen Varianten sind der Permanentmagnet-Motor mit keramischen Magneten, sowie der Reluktanzmotor, dessen Magnetfeld durch den Aufnahme Strom des Motors selber erzeugt wird. Interessant ist zudem die Reluktanzmaschine mit Magneten zu kombinieren. Die dabei verwendeten Permanentmagnete enthalten keine Elemente der Seltenen Erden.



Prinzipmodell 6 eines Reluktanzmotors

Das Prinzipmodell 6 erklärt die Magnetisierung einer synchronen elektrischen Maschine durch den Aufnahme Strom, 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 ist leicht einzusehen, 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 magnetische Nordpol und der andere zum Südpol. Der magnetische Fluss schliesst sich über das grau dargestellt, 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. Da bei einem Drehstromsystem bei konstanten Phasenströmen der Betrag des Drehmoments konstant bleibt, sieht ein sich mit dem Polrad mitbewegter Beobachter, eine konstante gleichgerichtete Magnetisierung des Polrads. 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 ist effizienter. Dazu kommt, dass jede Verlustquelle beim Rotor zusätzlich mit mehr Aufnahme Strom 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. Bringt man am Polrad Permanentmagnete an, so muss nicht die ganze Magnetisierung über den Aufnahme Strom erfolgen und die Effizienz steigt nochmals an. Im Prinzipmodell 6 ist dieser Permanentmagnet mit einem hell grauen Block angedeutet und ist im Sinn dieser Arbeit unter Verzicht von Seltenen Erden hergestellt.



Darstellung 7 zeigt die erwarteten Verluste

Darstellung 7 zeigt die erwarteten Verluste an der Grösse der gezeigten Blöcke. Da bei der Asynchronmaschine die Verluste am Rotor durch Ummagnetisierung und Stromwärme bedeutend sind und der Permanentmagnet-Motor mit Seltenen Erden geringste Rotorverluste verursacht, ist davon auszugehen, dass sich die vorgeschlagenen alternativen Industriemotoren zwischen den beiden anderen Bauarten platzieren werden möglichst nahe am Permanentmagnet Motor mit Seltenen Erden.

Wirkungsgrad, Leistung, Leistungsfaktor der vorgeschlagenen alternativen Elektromotoren lassen sich auch ohne den Bau von el. Maschinen mit genügender Genauigkeit bestimmen, wie Bild 8 und Diagramm 9 zeigen. Die Berechnungsbasis ist die Grundformel der Synchronmaschine. Die benötigten Grunddaten dazu sind der Magnetfluss der Permanentmagnete (beim Reluktanzmotor = 0), der Kupferwiderstand der Wicklung, die Induktivität, sowie die Eisenverluste. Diese Daten werden mit *FEMAG*, einem finiten Elementprogramm für elektrische Maschinen bestimmt.

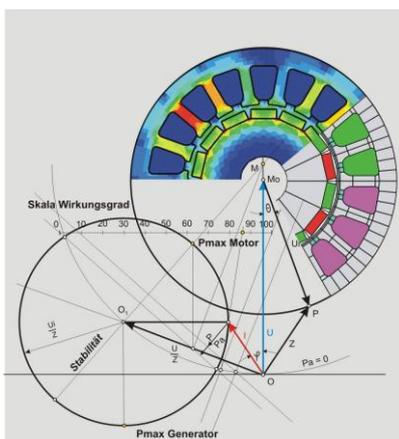
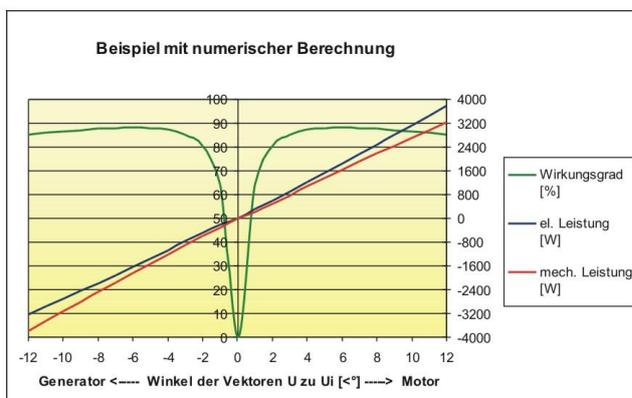


Bild 8 zeigt ein FEMAG Maschinenmodell, sowie die mittels einer Ortskurve bestimmten Betriebsdaten der el. Maschine



In der Tabelle 9 sind die Betriebsdaten der el. Maschine numerisch aus FEMAG aufbereitet

Um eine Aussage von kleinen bis zu grossen Motoren, über den Geltungsbereich der Leistung bezüglich der Norm IEC 60034-30, zu erhalten, werden zwei *FEMAG* Maschinenmodelle erstellt. Ein Modell mit einem IEC 132 Blechschnitt mit 4 Polen, was einer Leistung von 7.5kW entspricht. In diesem Leistungsbereich sind viele Motoren am Markt eingesetzt und ein weiteres Modell eines Kleinmotors in der Baugrösse IEC71. Dies entspricht etwa der Leistungsuntergrenze bezüglich einer guten Effizienz, da der Luftspalt im Motor nicht beliebig verkleinert werden kann. Der Bereich von ca. 100kW stellt die Obergrenze dar, da eine frühere Studie zeigte, dass sich hier die Wirkungsgrade der Asynchronmaschine und der Permanentmagnet-Maschine einander annähern. Die beiden *FEMAG* Modelle werden mit Oberflächenmagneten aufgebaut und die Induktivitäten bestimmt. Für Rotoren mit Reluktanz wird die Induktivität bezüglich den bekannten Grenzen von L_d/L_q verändert. Die Beurteilung der alternativen Motoren erfolgt aus den Diagrammen zum Wirkungsgrad, Leistung, Leistungsfaktor bei einer Wieldrehzahl von 1500rpm.

Die Forschungsarbeit und die Resultate werden in einem Bericht verfasst. Es wird eine Empfehlung für weitere Forschung vorgeschlagen, wenn effiziente Elektromotoren ohne den Einsatz von Seltenen Erden aufgezeigt werden können.

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
- [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

Abbildungen und Darstellungen:

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