

Einsatz von Faserverbundwerkstoffen für hoctourige Rotoren Dr. Täubner, Frank; rosseta Technik GmbH

Einführung

Die Einsparung von Metall und Kupfer wird in der Zukunft eine wichtige Herausforderung für die Konstrukteure von neuen Elektromotoren sein. Ein recht einfacher Weg dahin ist die Steigerung der Drehzahl und Frequenz der Motoren. Bereits jetzt werden schon viele Motore mit Wechselrichtern angesteuert, damit ist man bereits nicht mehr an die traditionellen 50 Hz gebunden. Außerdem reduzieren sich die Preise der Wechselrichter für Standardanwendungen immer weiter. Es macht daher Sinn, sich einmal den Vergleich zweier Motoren gleicher Leistung aber unterschiedlicher Drehzahl anzusehen. In Abbildung 1 sind zwei Motoren mit 15 kW Leistung für die Drehzahlen 3.000 U/min und 35.000 U/min fotografiert.



Abb. 1 : Zwei Motore für 15 kW für 3.000 U/min und 35.000 U/min

Das Foto erfordert jedoch noch eine Richtigstellung, für 35.000 U/min ist nur der Stator fotografiert. In unserem Unternehmen wird daraus ein Motor gebaut, der in einem

Schwungradspeicher eine Kohlenstoffschwunagscheibe bis 50.000 U/min beschleunigt und der in das Speichersystem integriert ist. In der Tabelle 1 sind die Daten beider Motore verglichen:

	Normmotor	Neuentwicklung
Leistung [kW]	15	15
Drehzahlbereich [U/min]	3.000 bis 6.000	35.000 bis 50.000
Durchmesser [mm]	300	100
Länge [mm]	480	140
Volumen [l]	34	1
Masse [kg]	140	3
Kühlung	Luft	Wasser
Rotor	Käfigläufer	Permanentmagnet-Läufer, bandagiert

Tabelle 1 : Technische Daten der Motore aus Abb. 1 im Vergleich

Aus der Tabelle ist zu erkennen, dass bei der Erhöhung der Drehzahl um den Faktor 10 und dem Übergang zu einem fortgeschrittenen Motorkonzept Volumen und Masse um den Faktor 30 reduziert werden können. Das ist natürlich ein starkes Motiv, sich mit den Besonderheiten der hochtourigen Motore zu beschäftigen.

In der rosseta Technik GmbH erfolgte die Entwicklung von hochtourigen leistungsstarken Motoren bereits seit 2002, da diese für den Aufbau von Schwungradenergiespeichern unbedingt benötigt wurden. So wurde für das Schwungradsystem T2 ein Motor mit 500 kW, 25.000 U/min und einer Eisenlänge von nur 300 mm und einem Luftspaltdurchmesser von 155 mm entwickelt und bereits 2003 auf der Hannovermesse vorgestellt.



Abb. 2 : Rotor des Schwungrads T2 mit dem Läufer des Elektromotors integriert

Zum Aufbau hohtouriger Rotoren

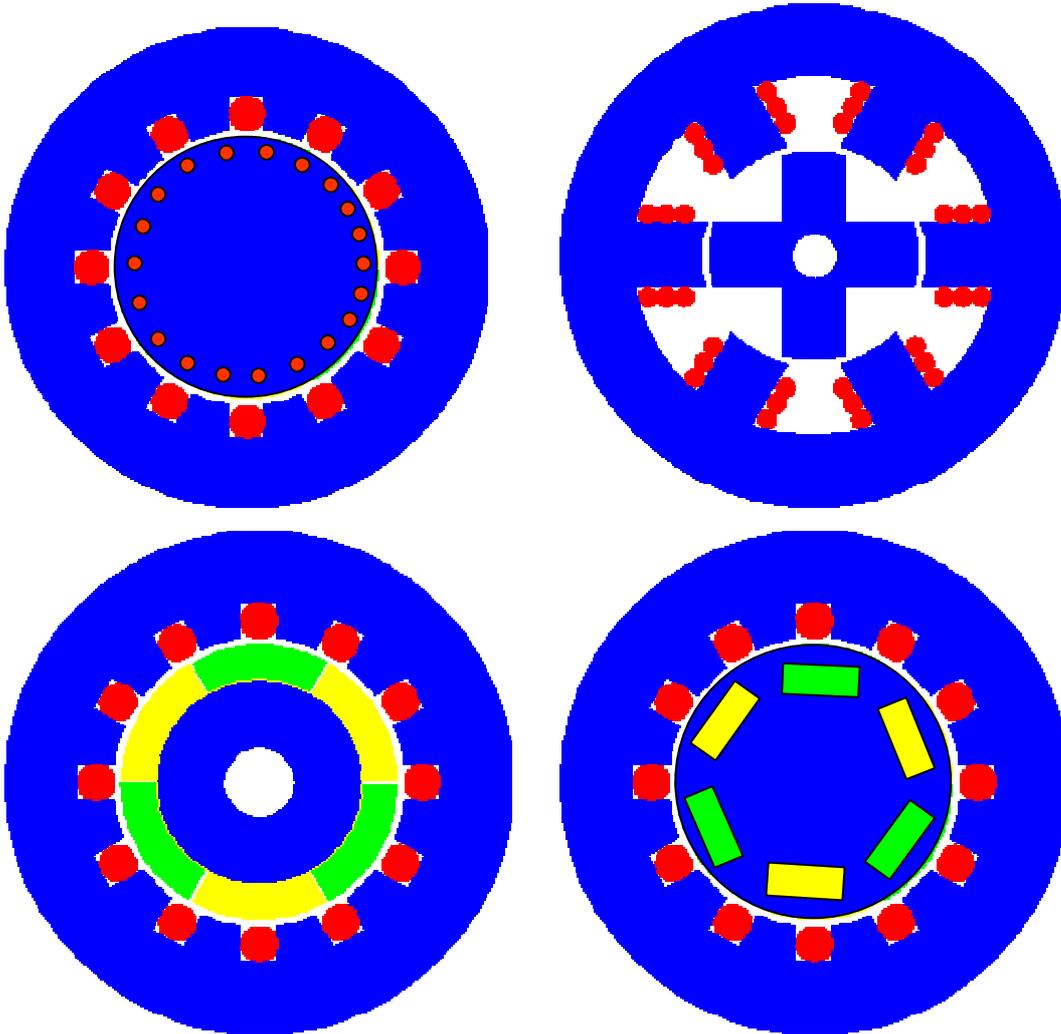


Abb. 3 : Konstruktionsprinzipien für hohtourige Läufer (Käfigläufer, Reluktanzläufer – oben, Magnetläufer mit Oberflächenmagneten und vergrabenen Magneten – unten)

Mit dem herkömmlichen Käfigläufern erreicht man relativ schnell die Festigkeitsgrenzen des Materials. Eine Verstärkung durch Bandagen wird nur selten ausgeführt, da die Käfigläufer im Betrieb sehr heiß werden können und Bandagen aus Faserverbundmaterial nur bis 200°C dauerhaft stabil ausgeführt werden können. Daher sind die hohtourigen Motoren mit Käfigläufern auf relativ geringe Leistungen beschränkt.

Die Lösung erster Wahl sind Rotoren, die mit Oberflächenmagneten bestückt werden und bandagiert sind. Gegenüber den Käfigläufern haben diese den Vorteil eines höheren Wirkungsgrads, einer höheren Leistungsdichte und einer geringeren Rotorerwärmung. Die Leistungsdichte wird dabei direkt durch die Qualität der Bandage bestimmt. Das Ziel der Technologie-Entwicklung in unserem Unternehmen war es, Bandagen zu entwickeln, die die Festigkeit der besten Faserverbundstoffe voll ausschöpfen können.

Daneben gibt es noch Rotorgeometrien mit vergrabenen Magneten, die ohne Bandage auskommen, weil die Magnete in Taschen im Rotorpaket eingesteckt werden. Das geht nur bei relativ geringen Drehzahlen, da sonst die Magnete durch die Fliehkraft zerbrechen.

Der Vollständigkeit halber seien noch die Reluktanzrotoren erwähnt, die völlig ohne Magnete auskommen und sehr hohe Drehzahlen erreichen können. Jedoch beträgt die Leistungsdichte nur 50 % der Rotoren mit Oberflächenmagneten. Daher blieb diese Bauform nur auf wenige Anwendungen beschränkt.

Zur Auslegung der Bandagen

Faserverbundmaterial, insbesondere mit Kohlenstofffasern eignen sich hervorragend für Läuferbandagen, da die Fasern eine sehr hohe Festigkeit besitzen und nur eine geringe Dichte aufweisen. Außerdem können sie durch die Wickeltechnik genau passend mit relativ geringen Aufwand hergestellt werden. Edelstahlbandagen vertragen durch die große Dichte des Stahls eine wesentlich geringere Fliehkraft und sind schwierig zu fertigen. Daher sind Edelstahlbandagen nur in Ausnahmefällen anzutreffen. Bandagen aus Kohlenstofffasern und Epoxidharz sind für hochtourige Magnetrotoren der Standard. Dabei ist das Unternehmen rosseta Technik GmbH ein wenig stolz, dass es zur Verbreitung dieser Technologie beitragen kann. Um solche Bandagen auszulegen, wurden die Eigenschaften des Materials genau vermessen. In der folgenden Tabelle finden Sie von der rosseta Technik GmbH ermittelten Festigkeitsdaten der eingesetzten Faserverbundmaterialien.

	UTS 50 Normales Harz	IMS 60 HT-Harz
Festigkeit der Fasern (Datenblatt des Herstellers)	4800 MPa	5500 MPa
Festigkeit des Verbundes als UD-Prepeg (Datenblatt des Herstellers)	2474 MPa	2774 MPa
Festigkeit des Verbundes in Wickeltechnik 65% Vol. (rosseta Technik GmbH)	2585 MPa	2930 MPa
Zulässige Belastung bei 0,1 % Ausfallwahrscheinlichkeit und 20 Jahre Dauerbelastung, Raumtemperatur	1000 MPa	1400 MPa
Temperaturabhängigkeit der Festigkeit	820 MPa bei 120 °C	1150 MPa bei 160 °C
	735 MPa bei 140 °C	1020 MPa bei 180 °C
	580 MPa bei 160 °C	810 MPa bei 200 °C

Tabelle 2 : Festigkeiten in Faserrichtung

Die nutzbare Festigkeit des Verbundes muss wesentlich geringer gewählt werden, als das die mittlere Zerreißfestigkeit angibt. Die Bestimmung der zu erwartenden Ausfallwahrscheinlichkeit erfolgt hier durch ein statistisches Verfahren und nicht durch die Einführung von Sicherheitsfaktoren.

Dazu wird die Häufigkeit der Zerreimesswerte mit Hilfe einer Weibull-Verteilung beschrieben. Daraus kann dann schon mit geringeren Messwertzahlen auf Ausfallwahrscheinlichkeiten von 1 : 1000 extrapoliert werden, wie in Abbildung 4 dargestellt. Weiterhin ist die Reduktion der Festigkeit in Folge der Dauerfestigkeit zu berücksichtigen. Daraus ergeben sich dann die relativ geringen aber sicheren Werte von 100 MPa für die Standardfasern und 1400 MPa für hochfeste Fasern. Sofern die Bandagen höheren

Temperaturen ausgesetzt werden reduziert sich die zulässige Festigkeit weiter. Die entsprechenden Messwerte sind ebenfalls in der Tabelle angegeben.

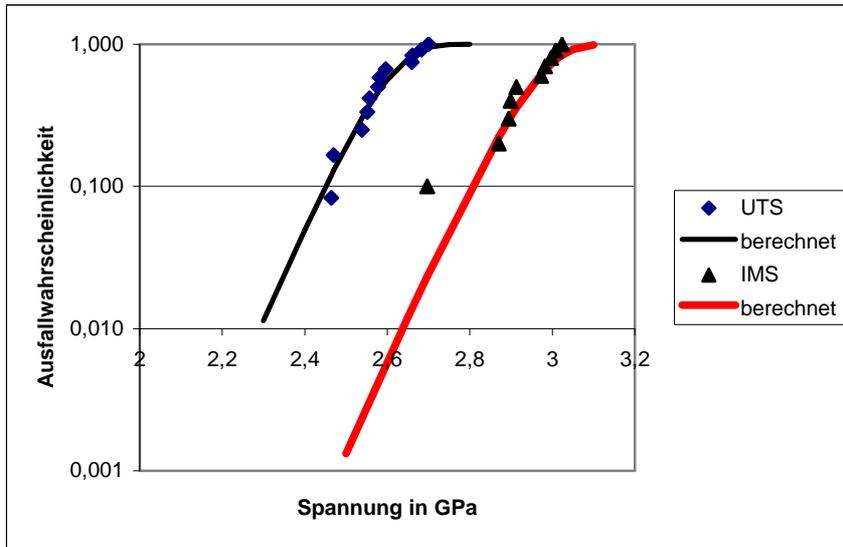


Abb. 4 : Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit für kleine Werte aus einer relativ geringen Anzahl von Messwerten

Nachdem die zulässigen Festigkeiten und Materialdaten ermittelt wurden, kann die Berechnung und Auslegung des Rotors erfolgen. Es bietet sich an, ein FEM-Programm zu nutzen, das in der Lage ist, orthotrophe Materialeigenschaften zu berücksichtigen und iterativ die Beziehungen zwischen der Grenzfläche Faserverbund und Magnete berechnen kann. Dabei sind einfache FEM-Festigkeitsprogramm bereits überfordert. Bei den hier vorgestellten Berechnungen wurde das Programm ANSYS benutzt. Zunächst wird die Geometrie eingegeben und sinnvoll vernetzt, wie in Abbildung 5 für ein Beispiel einer Welle mit vier Magnetsegmenten und Zwischenstücken dargestellt.

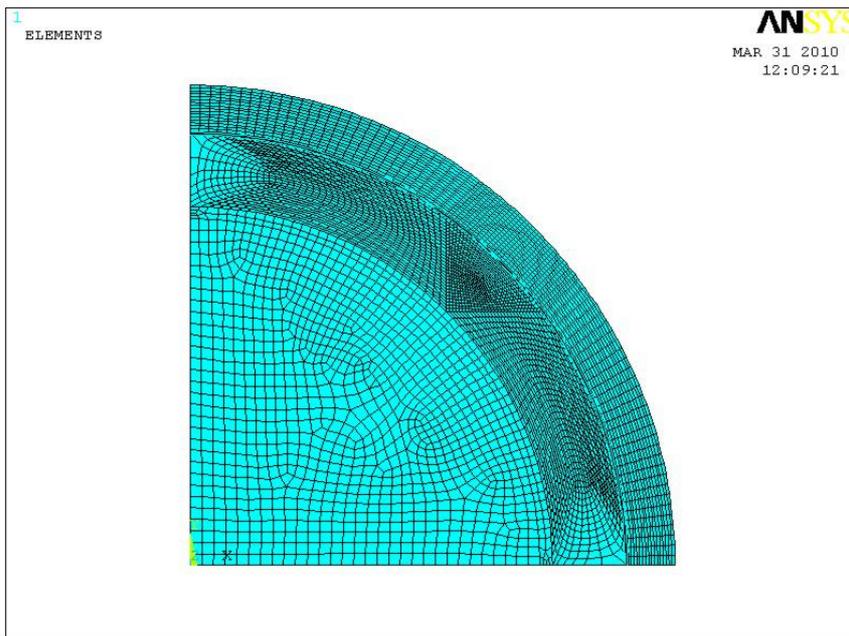


Abb. 5 : Rotorgeometrie mit FEM-Netz

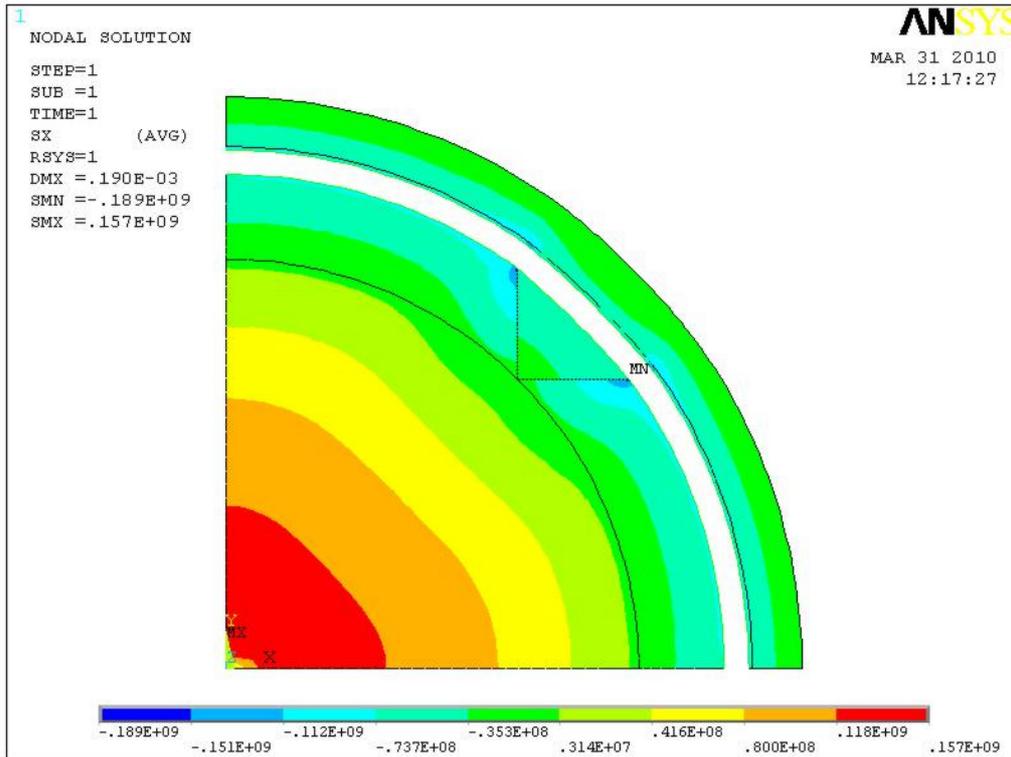


Abb. 6 : Radiale Spannungen im Rotor mit angepasster Bandage für 70.000 U/min

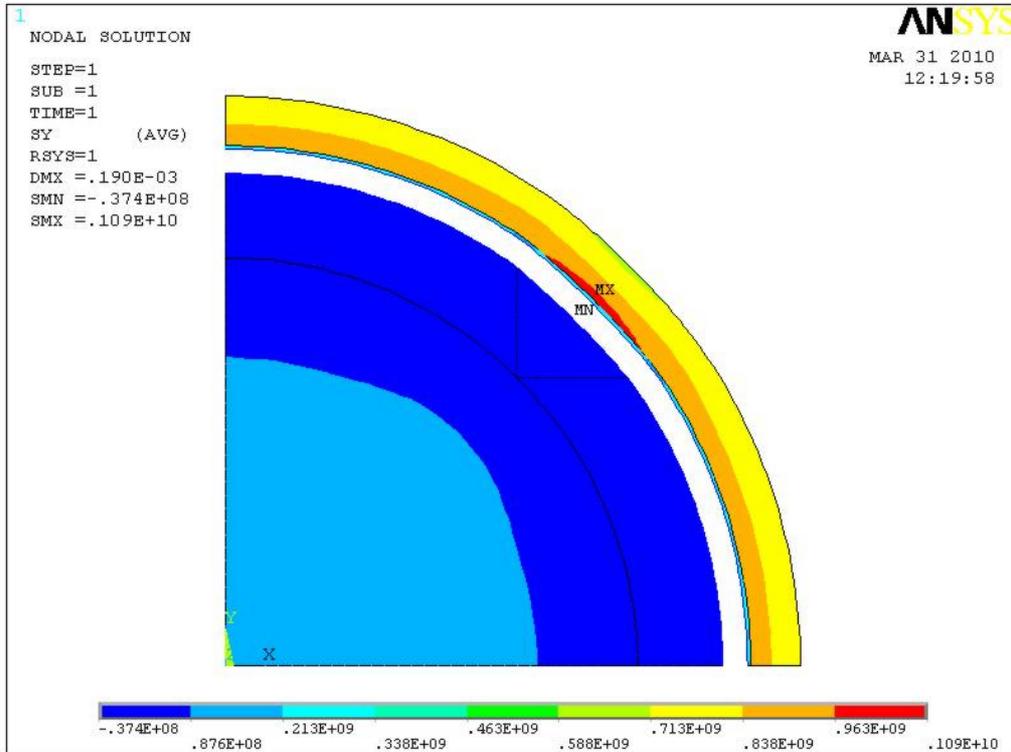


Abb. 7 : Tangentiale Spannungen im selben Rotor

Die Berechnung der Spannungen erfolgt und muss durch die Variation der Dicke der Bandage und deren Überdeckung mit den Magneten (oder anders gesagt der eingebrachten Vorspannung) so lange variiert werden, bis die maximalen Spannungen nicht zu hoch sind und bei voller Drehzahl die Magnete noch an den Rotor angepresst bleiben. Das erfordert einige Durchläufe, bis alles stimmt. Die genauen Festigkeitswerte sind aus der allgemeinen Darstellung nur schwer abzulesen, daher werden normalerweise die Spannungen radial und tangential noch für den Faserverbund, die Magnete, den Stahlrotor einzeln gezeichnet. Der Aufwand für die Berechnung eines Rotors beträgt nach guter Einarbeitung immer noch einen ganzen Tag. Daher wurde nach einer schnelleren Berechnungsmöglichkeit gesucht und ein analytisches Schalenmodell für die Berechnung der Spannungen in einem zylindersymmetrischen Rotor mit Berücksichtigung der Temperatur, der Vorpressungen und der Drehzahl entwickelt. Daraus lassen sich sehr schnell die notwendige Bandagendicke und die zu erwartenden Spannungen bestimmen. In den beiden folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse für den selben Rotor dargestellt. Man kann eine gute Übereinstimmung mit der FEM-Rechnung erkennen.

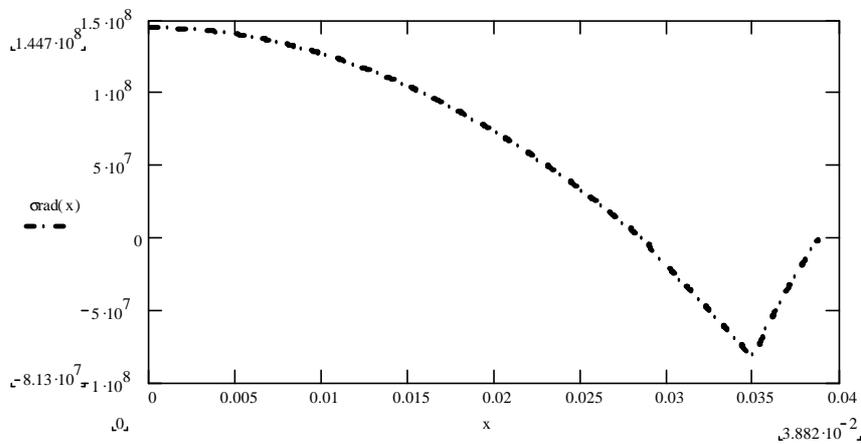


Abb. 8 : Radiale Spannung über dem Radius

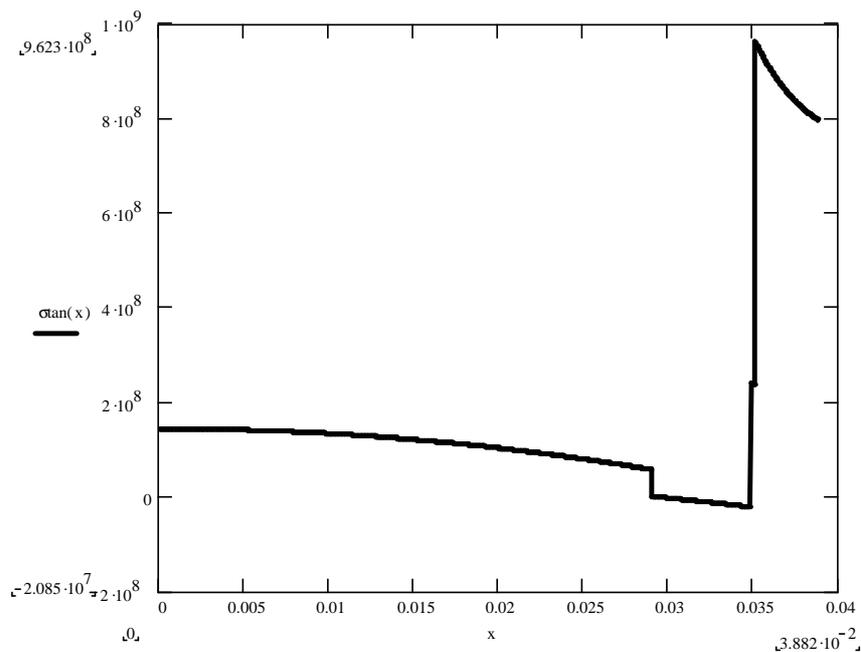


Abb. 9 : Tangentiale Spannung über dem Radius

Technische Realisierung von hohtourigen Rotoren

Der Aufbau der Rotoren beginnt nach der Bearbeitung der Stahlwelle und gegebenenfalls dem Aufbringen eines Rotorblechpaketes mit dem Kleben der Magnete. Insbesondere enggepackte oder packetierte Magnetanordnungen erfordern gute Klebeverbindungen, die nur mit einem Zwei-Komponenten-Epoxidharz und einer guten Vorbereitung der Flächen zu haben sind. Bei aufwendigen Strukturen ist das Kleben unmagnetisierter Magnetstücken und die nachträgliche Aufmagnetisierung eine zu beachtende Alternative.

Nachdem die Magnete, Füllstücke für Zwischenräume und die Magnetendringe (am besten aus einem Glasfaserverbund) aufgeklebt sind, wird der Rotor zylindrisch auf ein vorgegebenes Maß geschliffen.

Die Bandagen werden in der Faserwickeltechnologie aus Kohlenstofffasern und Epoxidharz genau passend hergestellt und auf den Rotor aufgepresst. In der Anfangszeit der Technologie-Entwicklung kam es ab und an vor, dass der Kohlenstofffaser-Verbund beim Aufbringen auf den Rotor im Inneren geschädigt war. Dadurch kam es sporadisch zu Ausfällen, die zunächst unerklärlich waren. Nachdem jedoch eine Schutzschicht unter den Kohlenstofffasern eingesetzt wurde, lieferte die verbesserte Technologie vollkommen stabile und reproduzierbare Ergebnisse.

Seit 2002 wurden in der roseta Technik GmbH viele tausende Bandagen und Rotore für Fremdfirmen und den Eigenbedarf hergestellt und die alle zuverlässig ohne Ausfall bei den Kunden laufen.



Abb. 10 : Herstellung der Bandagen auf der Wickelmaschine,

Abb. 11 : Musterrotoren, links Glasfaserbandage, rechts Kohlenstofffaserbandage

Direktwicklung

Diese Technologie zur Bandagierung erfüllt höchste Ansprüche, ist aber auch relativ aufwendig und damit für eine Reihe von Einsatzfällen zu teuer. Deshalb wurde eine zweite Technologie entwickelt, die von der Leistungsfähigkeit zwischen der genannten Kohlenstofffaserbandage und der einfachen Bewicklung mit Isolierglasbändern steht. Dabei wird eine hochfeste Glasfaser unter möglichst großer Vorspannung direkt auf den Rotor gewickelt. Das hat den Vorteil, dass die Magnete nicht beschliffen werden müssen und das Aufpressen der Bandagen entfällt ebenso. In der Abbildung 12 ist die Bandagierung eines 2 m langen Rotors mit ca.3000 Magnete in Direktwicklung zu sehen.

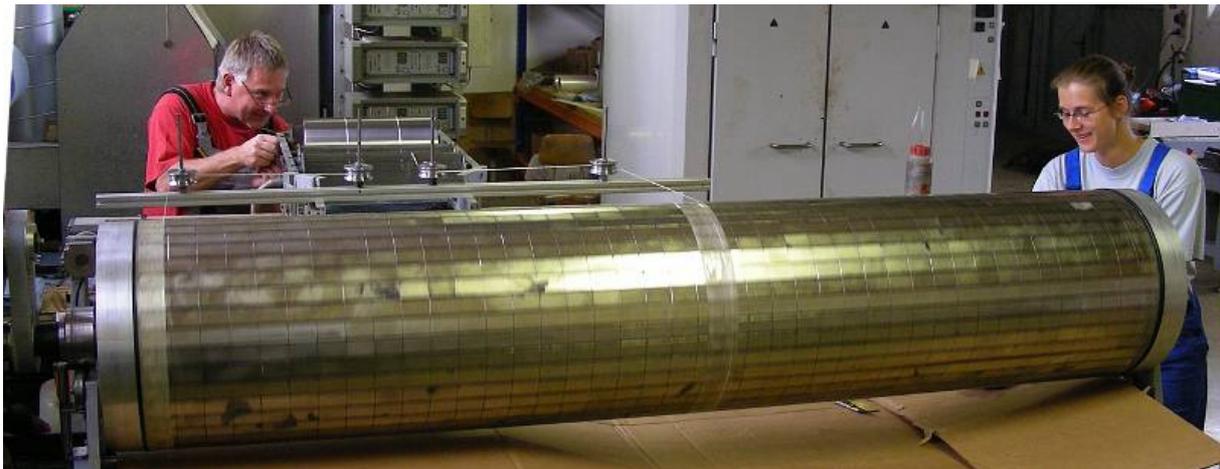


Abb. 12 : Direktwicklung für einen 2 m langen Rotor

Interessanter Weise sind Glasfasern für die Direktbewicklung besser geeignet als Kohlenstofffasern. Das wurde in Vergleichsmessungen eindrucksvoll ermittelt. In der Direktwicklung beträgt die Leistungsfähigkeit der Kohlenstofffasern nur 65 % der Glasfasern. Das entsteht durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Glasfasern sind ähnlicher zum Stahl und verlieren bei der Abkühlung nach der Temperung nahezu keine eingebaute Spannung.

In der Abbildung 13. sind die erreichbaren Rotordurchmesser für beide Technologien in Abhängigkeit von der Magnetdicke und der Drehzahl eingetragen.

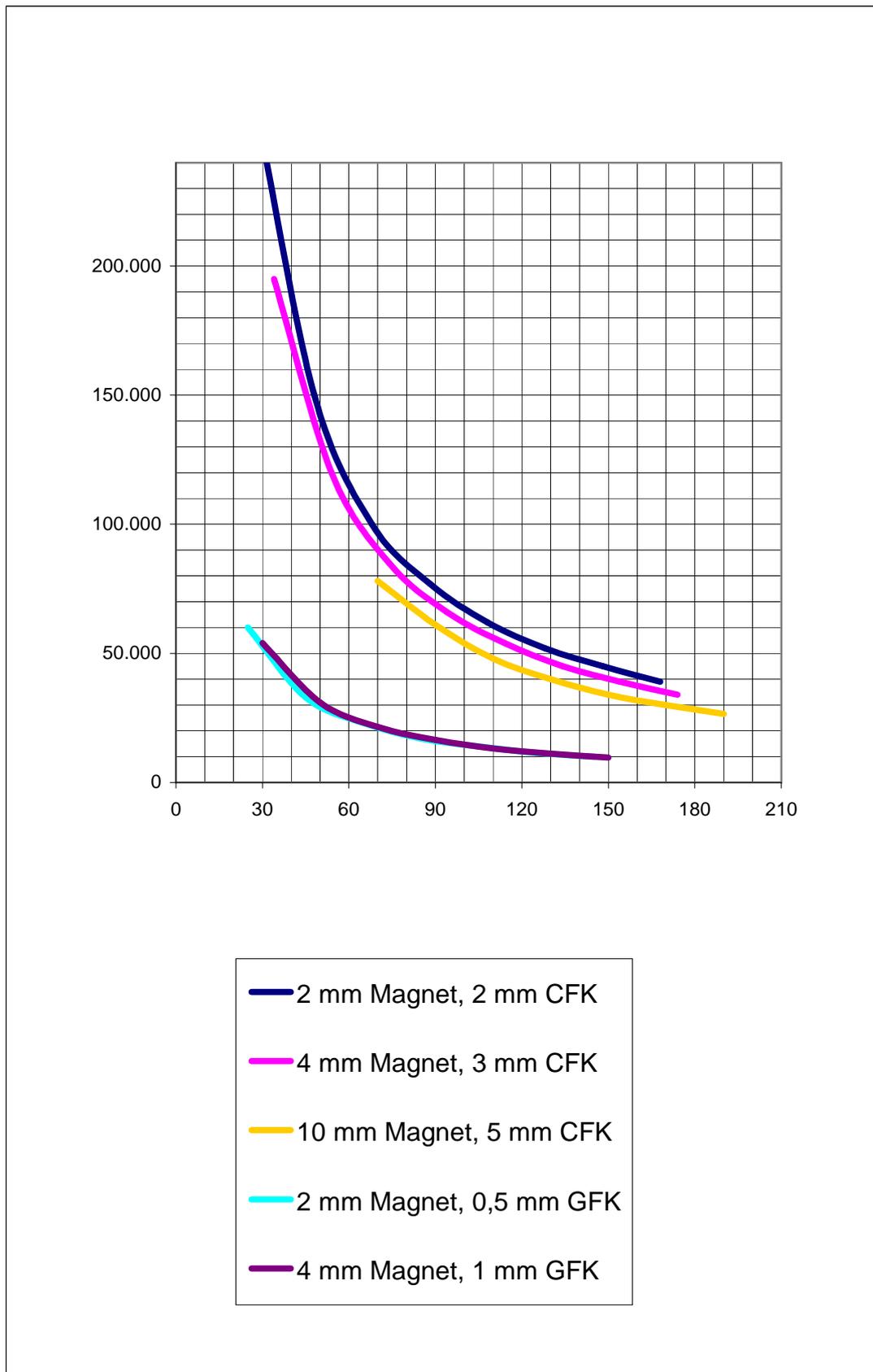


Abb. 13 : Vergleich der Direktwicklung (GFK) mit der Bandagierung mit Kohlenstofffaser-Bandagen (CFK)