

# Erwärmung elektrischer Maschinen – Teil 1

**Was das Drehmoment oder die Leistung betrifft lassen sich elektrische Maschinen grundsätzlich überlasten. Dabei darf die zulässige Temperatur der Isolierstoffe nicht überschritten werden. Teil 1 dieses Beitrags geht auf die thermische Grenzbelastung von Isolierstoffen ein. Es werden Begriffe wie Dauergrenztemperatur, Gebrauchsdauergrenze und Isolierstoffklassen erläutert.**

Prof. Dr.-Ing. Helmuth Biechl  
Werner-von-Siemens-Labor für  
Elektrische Antriebe und Mechatronik  
Fachhochschule Kempten

In diesem Beitrag über elektrische Maschinen und Antriebe befasst sich mit der Erwärmung dieser Betriebsmittel. Die Thematik spielt in der Praxis eine ganz erhebliche Rolle, da elektrische Maschinen, gleich ob Motoren oder Generatoren, grundsätzlich überlastbar sind, was das mechanische Drehmoment oder die Leistung anbelangt. Entscheidend für den elektromechanischen Energiewandler ist in erster Linie die Temperatur der Isolierstoffe, die je nach verwendetem Material einen bestimmten Wert nicht überschreiten darf. Wird durch falsche Auslegung oder auch Betriebsart dieser Wert dennoch überschritten, so altert die Maschine vorzeitig, d.h. sie muss nicht unbedingt sofort ausfallen. Hat also eine Maschine eine derartige thermische Überlastung „überlebt“ bzw. überstanden, so ist das nicht spurlos an ihr vorübergegangen, auch wenn sie noch einwandfrei funktioniert. Man hat durch dieses Vorgehen einen gewissen Teil der Lebensdauer vorzeitig „aufgezehrt“. So muss man sich dann auch nicht wundern, wenn es zu Frühausfällen kommt, die durch Wicklungsschäden hervorgerufen werden. Man kann sich das anschaulich so vorstellen, als wenn die Maschine über ein Gedächtnis verfügen würde. Hat man sie über eine gewisse Zeitspanne thermisch überlastet, so „merkt“ sie sich das und reagiert gleich oder auch erst viel später - unter Umständen im normalen Betrieb- mit einem Ausfall. Mit anderen Worten: Die Maschine wurde vorgeschädigt.

## Wärmeklassen

Um Isolierstoffe, die in elektrischen Maschinen zur Anwendung kommen, zu klassifizieren, teilt man diese nach DIN EN 60034-1 (bzw. VDE 0530, Teil 1) und DIN IEC 60085 in so genannte Wärmeklassen ein, die auch als Isolierstoffklassen bezeichnet werden (alte Bezeichnung). Zu einer Klasse, die mit einem Buchstaben gekennzeichnet wird, gehören all diejenigen Isolierstoffe, die die gleiche höchstzulässige Dauertemperatur aufweisen. Tabelle 1 zeigt eine Auswahl an Isolierstoffen, die in der Praxis vorkommen. Die Einhaltung der zulässigen Temperaturwerte ist mit Rücksicht auf die Lebensdauer der Maschinen unbedingt zu

gewährleisten. Zum Beispiel gilt für die Isolierstoffklasse A, dass jede Temperaturerhöhung um ca. 8°C die Lebensdauer der betreffenden Wicklung gegenüber dem Wert bei der niederen Temperatur halbiert (Montsinger'sche Regel). Eine Temperaturerhöhung um 16°C reduziert die Lebensdauer auf ein Viertel und eine Erhöhung um 24°C sogar auf ein Achtel. Im letzten Fall hieße das, dass aus einer Lebensdauer von ca. 30 Jahren nur noch knapp 4 Jahre werden.

Klasse	Höchstzulässige Dauertemperatur	Isolierstoffe
Y	90°C	Baumwolle, Naturseide, Zellwolle, Kunstseide, Papier, Polyamidfaser, Pressspan, Vulkanfiber, Holz, Formaldehyd-Kunstharz
A	105°C	Wie bei Klasse Y, jedoch nach dem Einbau mit Natur- oder Kunstharzlacken, Schellack usw. getränkt, lackbehandelte Textilien, Drahtlack auf Ölharzbasis
E	120°C	Drahtlacke verschiedener Art, Pressteile mit Zellulosefüllstoff, Papierschichtstoffe
B	130°C	Glasfaser, Asbest, Glimmerprodukte, Pressteile mit mineralischen Füllstoffen
F	155°C	Glasfaser, Asbest, Glimmerprodukte, Drahtlacke auf Imid-Polyesterbasis
H	180°C	Glasfaser, Asbest mit Silikon-Harzen behandelt, Silikon-Kautschuk
C	> 180°C	Glimmer, Porzellan, keramische Stoffe, Glas, Quarz

Tabelle 1: Wärmeklassen (Isolierstoffklassen) unterschiedlicher Isoliermaterialien (Auswahl aus DIN VDE 0530 T1; EN 60034-1)

Natürlich unterliegt diese Regel statistischen Gesetzmäßigkeiten, so dass die Wicklung auch nach kürzerer oder längerer Zeit ausfallen kann. Im statistischen Mittel gilt die beschriebene Gesetzmäßigkeit jedoch in guter Näherung. Später erkennen Sie, dass die Übertemperatur, d.h. die Differenz zwischen Maschinen- und Kühlmittelintrittstemperatur, proportional zur Verlustleistung verläuft. Wenn wir nun noch bedenken, dass sich die Kupferverluste, d.h. die ohmschen Verluste, quadratisch zum Strom verhalten, so wird klar, dass nur eine geringfügige Überlastung, die über längere Zeit ansteht, zu einer zusätzlichen Temperaturerhöhung führen kann. Wir werden später hierzu noch genauere Betrachtungen anstellen und Berechnungen durchführen. Isolierstoffe und Isoliersysteme sind den Wärmeklassen so zugeordnet, dass die thermische Mindestlebensdauer einer isolierten Wicklung der im Temperaturindex TI angegebenen Stundenzahl, bei normalen elektrischen Maschinen vorzugsweise 20000 Stunden, entspricht (Bild 1). Diese Lebensdauer gilt für Dauerbetrieb bei der Grenztemperatur  $\vartheta_{gr}$ . Ist die Betriebstemperatur kleiner als die Grenztemperatur, so erhöht sich die thermisch bedingte Lebensdauer- ist sie höher, so verkürzt sie sich.

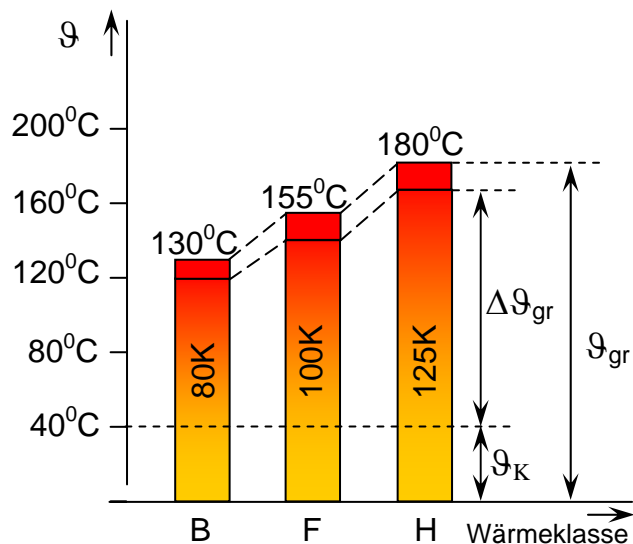


Bild 1: Grenztemperatur  $\vartheta_{gr}$  und Grenzübertemperatur  $\Delta\vartheta_{gr}$  der Wärmeklassen B, F und H (Kühlmitteleintrittstemperatur  $\vartheta_K$  )

Die Eigenschaften wie z.B. die thermische Beständigkeit von Isolierstoffen lassen sich zeitraffend durch Alterung bei Temperaturen ermitteln, die höher als die vorgesehene Betriebstemperatur sind. Die Ergebnisse der Lebensdauerprüfungen können dann durch die so genannte Arrhenius-Gleichung beschrieben werden. Sie gibt an, wie hoch im statistischen Mittel die Lebensdauer einer Wicklung bei einer gewissen Temperatur ausfällt, d.h. die Zeit, nach der die Wicklung bestimmte vorgegebene Eigenschaften, zum Beispiel die Durchschlagfeldstärke, verliert. Bild 2 zeigt als experimentelles Ergebnis die Änderung der Durchschlagsspannung einer Wicklung im Verlauf der thermischen Alterung bei den Temperaturen 160  $^{\circ}\text{C}$ , 180  $^{\circ}\text{C}$  und 200  $^{\circ}\text{C}$ . Bild 3 zeigt in einem thermischen Beständigkeitsdiagramm, wie sich bei Lackdraht die Gebrauchsdauer abhängig von der einwirkenden Temperatur verändert. Bei einer festgesetzten Gebrauchsdauer von 20000h ergibt sich eine Grenztemperatur von 147  $^{\circ}\text{C}$ . Der Draht ist somit der Wärmeklasse B zuzuordnen. Derselbe Lackdraht kann mit einer höheren Grenztemperatur versehen werden, wenn die Gebrauchsdauer niedriger gewählt wird. Der Scheibenwischermotor eines Personenkraftwagens zum Beispiel braucht sicherlich nicht für eine Gebrauchsdauer von 20000h bemessen zu werden. Geht man von einer Betriebsdauer von 5000h des gesamten Fahrzeuges aus und nimmt an, dass der Scheibenwischer nur während 20% dieser Zeit eingeschaltet ist, so ergibt sich eine Gebrauchsdauergrenze von 1000h. Aus dem Beständigkeitsdiagramm in Bild 3 lässt sich dann eine Grenztemperatur von 190  $^{\circ}\text{C}$  entnehmen (Wärmeklasse C). Die Wicklung kann somit von einem höheren Strom durchflossen werden. Man sieht an diesen Ausführungen sehr deutlich, dass ein anwendungsoptimierter Entwurf, d.h. ein kostenminimaler Entwurf, die genaue Kenntnis dieser Zusammenhänge voraussetzt. Unter Umständen sind auch für eine spezielle Anwendung minimale Abmessungen eines elektromechanischen Wandlers erforderlich, so dass man die geschilderten Zusammenhänge heranziehen muss. Übrigens bedeutet die Bezeichnung TI/147, dass bei einer Temperatur von  $\vartheta_{gr} = 147^{\circ}\text{C}$  eine Gebrauchsdauergrenze von 20000h vorliegt. Die Angabe TI 1kh/190 bedeutet, dass bei  $\vartheta_{gr} = 190^{\circ}\text{C}$  von einer Gebrauchsdauergrenze von 1kh = 1000h auszugehen ist. Immer, wenn die Gebrauchsdauergrenze von 20000h abweicht, ist sie im Temperaturindex mit anzugeben.

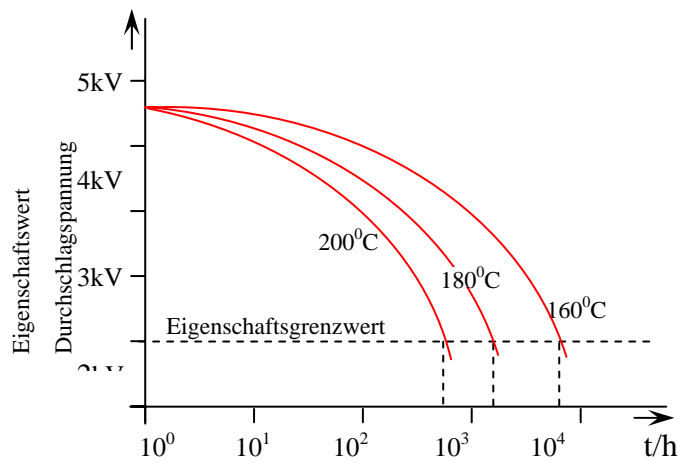


Bild 2: Durchschlagspannung einer Wicklung in Abhängigkeit der Einwirkzeit bei drei unterschiedlichen Temperaturen

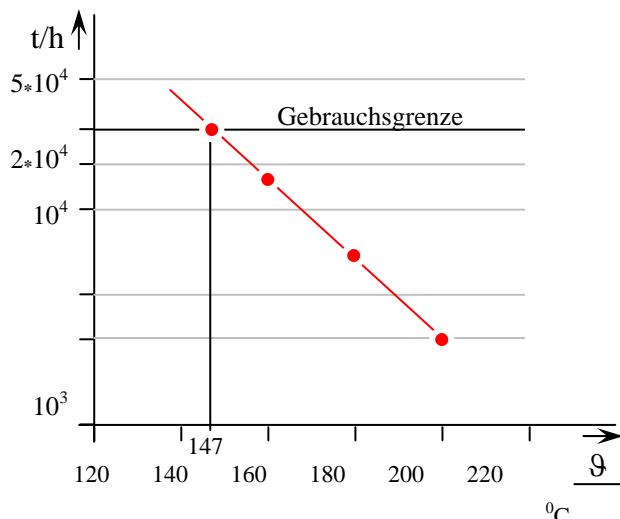


Bild 3: Thermisches Beständigkeitsdiagramm für Lackdraht

Werden in einer elektrischen Maschine mehrere Isolierstoffe verwendet, so legt der Stoff mit der geringsten Grenztemperatur die Wärmeklasse fest. Diese ist immer auf dem Typenschild der Maschine angegeben. Natürlich liegt in einer elektrischen Maschine eine gewisse Temperaturverteilung vor, d.h. nicht an allen Punkten herrscht die gleiche Temperatur. Der heißeste Punkt einer Wicklung (hottest spot = Heisspunkt) liegt erfahrungsgemäß etwa 5 - 15°C höher als der Mittelwert, der beispielsweise über eine Widerstandsmessung bestimmt werden kann. Die mittlere Übertemperatur  $\Delta\theta$  einer Kupferwicklung kann nach Abschnitt 7 in DIN EN 60034-1 wie folgt ermittelt werden:

$$\Delta\theta = \vartheta_2 - \vartheta_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (k + \vartheta_1) + \vartheta_1 - \vartheta_a$$

Dabei ist  $\Delta\vartheta$  die Übertemperatur in K (Kelvin), d.h. die Differenz zur Kühlmiteleintrittstemperatur  $\vartheta_a$ ,  $\vartheta_1$  die Temperatur der kalten Wicklung in °C,  $\vartheta_2$  die Temperatur der Wicklung am Ende der Erwärmungsprüfung in °C,  $\vartheta_a$  die Temperatur des Kühlmittels am Ende der Erwärmungsprüfung in °C und zwar am Kühlmiteleintritt.  $R_1$  ist der Widerstand der Wicklung bei der Temperatur  $\vartheta_1$  (kalt);  $R_2$  ist der Widerstand der Wicklung am Ende der Erwärmungsprüfung (warm).  $k$  stellt den Kehrwert des Temperaturkoeffizienten des Widerstandes bei 20°C dar. Es gilt  $k_{Cu} = 235K$ ,  $k_{Al} = 225K$ . Betrachten wir dazu ein Beispiel: Eine Asynchronmaschine steht über Nacht in einer Maschinenhalle, die am Morgen eine Lufttemperatur von  $\vartheta_{Luft} = 20^\circ C$  aufweist. Der Statorstrangwiderstand wird zu diesem Zeitpunkt mit einer Widerstandsmessbrücke zu  $R_1 = 35m\Omega$  bestimmt. Nach einem mehrstündigen Lauf bei Nennlast messen wir  $R_2 = 51m\Omega$ . Wie groß ist nun die mittlere Wicklungstemperatur  $\vartheta_2$  sowie die maximale Wicklungstemperatur am heißesten Punkt  $\vartheta_{2,max}$ ? Nachdem die Maschine über Nacht nicht in Betrieb war, können wir davon ausgehen, dass sie die Umgebungstemperatur angenommen hat, d.h.  $\vartheta_1 = \vartheta_{Luft}$ . Nun folgt:

$$\vartheta_2 = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (k + \vartheta_1) + \vartheta_1 = \frac{51m\Omega - 35m\Omega}{35m\Omega} (235K + 20^\circ C) + 20^\circ C = 137^\circ C$$

Die mittlere Wicklungstemperatur hat also der Wert  $\vartheta_2 = 137^\circ C$ . Für den Heißpunkt setzen wir an:

$$\vartheta_{2,max} = \vartheta_2 + 15K = 152^\circ C$$

Wir sehen somit, dass die Isolierstoffklasse F mit einer höchstzulässigen Dauertemperatur von  $\vartheta_{gr} = 155^\circ C$  gerade noch ausreicht. Allgemein kann hier festgestellt werden, dass sich die betrachtete Maschine aus diesem Beispiel thermisch sehr knapp an der Grenze bewegt. Wie verhalten sich nun andere Komponenten eines elektromechanischen Energiewandlers hinsichtlich thermischer Belastung? Betrachten wir als erstes Kommutatoren und Schleifringe. Der Verschleiß der Kohlebürsten steigt in Abhängigkeit von der Temperatur ab einem bestimmten kritischen Wert steil an. Dieser ist von der Bürstenart (Graphitzusammensetzung), vom Bürstendruck und der Kommutatorumfangsgeschwindigkeit abhängig. VDE 0530 empfiehlt daher, bei Übertemperaturen von 100K an den Wicklungen die Bürsten besonders sorgfältig auszuwählen, da sonst mit übermäßigem Verschleiß zu rechnen ist. Genauere Angaben sind dem Datenblatt des Kommutators zu entnehmen, das vom Hersteller mitgeliefert wird. Bei der Verwendung von Lagern ist besonders auf die zulässige Grenztemperatur zu achten. Es sind die für die auftretenden Temperaturen geeigneten Lager zu verwenden und die zweckmäßigen, d.h. temperaturbeständigen Wälzlagerfette einzusetzen. Weiterhin ist auf die temperaturabhängigen Nachschmierfristen zu achten. Größere Maschinen, in der Regel ab einigen 10 kW, weisen Thermistoren in den Statorwicklungen auf (z.B. 3 Heißleiter in einer Drehstromwicklung, einer pro Phase), um die Wicklungstemperatur zu überwachen und gegebenenfalls eine Warnung oder gar Netztrennung zu veranlassen (je nach auftretendem Wert). Wir wollen dieses Spezialwissen hier nicht weiter vertiefen.

## Dimensionierung

Der Grund, weshalb wir in dieser Reihe überhaupt auf die Thematik der Erwärmung eingehen, ist folgender: Wie bereits ausführlich geschildert, dürfen elektromechanische Energiewandler thermisch nicht überlastet werden. Die verwendeten Isolierstoffe dürfen keiner höheren Temperatur ausgesetzt sein, als der zulässigen Dauergrenztemperatur, die in der entsprechenden Wärmeklasse festgelegt ist. Allerdings dürfen wir elektrische Maschinen sehr wohl hinsichtlich Drehmoment oder Leistung überlasten, sofern wir unterhalb der zulässigen Dauergrenztemperatur bleiben. Das heißt, dass bei vielen Anwendungen in der Praxis, bei denen die geforderte Leistung nur zeitweise, d.h. nicht im Dauerbetrieb, benötigt wird, eine Maschine durchaus überlastet werden darf. Wir können dann für eine derartige Antriebsaufgabe einen Antriebsmotor wählen, der eine kleinere Bemessungsleistung aufweist. Dies hat vielfältige Vorteile: Zum einen ist dieser Motor preiswerter, zum anderen weist er weniger Gewicht auf und ist von den Abmessungen her kleiner. Wir müssen also diesen Sachverhalt unbedingt berücksichtigen, um einen optimalen Antrieb zu erhalten. Es gibt Beispiele von Fahrzeugantrieben, wo ohne Berücksichtigung dieser Kenntnisse eine Lösung des Antriebsproblems gar nicht hätte realisiert werden können. In der Praxis kommt es bei Antriebsproblemen häufig vor, dass wegen der konstruktiven Besonderheiten des Gesamtsystems geringe Abmessungen des Elektromotors von entscheidender Bedeutung sind. Ziel dieser Ausführungen ist es, berechnen zu können, wie ein elektromechanischer Energiewandler bei einem gegebenen Belastungsprofil leistungsmäßig überlastet werden kann. Am Ende steht ein Resultat, das uns in vielen Fällen mit verhältnismäßig einfachen Gleichungen in die Lage versetzt, diese Umrechnung durchzuführen. Vorher müssen wir allerdings noch einige theoretische Überlegungen anstellen.

## Verluste

Betrachten wir zunächst die Verlustquellen, die in einer elektrischen Maschine auftreten. Die nachfolgende Gleichung enthält alle Einzelverluste, die von praktischer Bedeutung sind:

$$P_V = P_{V,Fe} + P_{V,I} + P_{V,E} + P_{V,R} + P_{V,Z}$$

Dabei gilt:  $P_V$  steht für Gesamtverluste,  $P_{V,Fe}$  für Eisenverluste,  $P_{V,I}$  für Stromwärmeverluste im Hauptstromkreis,  $P_{V,E}$  für Erregerverluste,  $P_{V,R}$  für Reibungsverluste und  $P_{V,Z}$  für Zusatzverluste. Die Eisenverluste  $P_{V,Fe}$  setzen sich aus den Hysteres- und Wirbelstromverlusten zusammen. Da der magnetische Kreis der Maschine kein homogenes Feld aufweist, werden sie für die einzelnen Feldabschnitte getrennt bestimmt. Für die Wirbelstromverluste  $P_{V,W}$  gilt folgende Beziehung:

$$P_{V,W} \sim f^2 \cdot B^2$$

Dabei ist  $f$  die Frequenz des Wechselfeldes und  $B$  der Effektivwert der magnetischen Flussdichte. Man sieht daran, dass die doppelte Frequenz bereits die vierfachen Wirbelstromverluste hervorruft. Die Flussdichte  $B$ , die sich proportional zur Wechselspannung verhält, geht ebenfalls quadratisch ein. Wirbelströme entstehen aufgrund des Induktionsgesetzes durch die zeitliche Änderung des magnetischen

Feldes wenn zusätzlich elektrisch leitfähiges Material vorliegt. Um diese deutlich zu reduzieren, wird bei Wechselfeldern der magnetische Kreis aus einem Paket aus gegenseitig isolierten Blechen aufgebaut (Blechkpaket). Diese sind in der Regel zwischen 0,3mm und 0,5mm dick (überwiegend 0,5mm bei elektromechanischen Energiewandlern und 0,3mm bei Transformatoren) und reduzieren die Wirbelstromverluste erheblich. Allerdings treten immer noch Wirbelströme innerhalb der Bleche auf. Je dünner die Bleche und geringer die elektrische Leitfähigkeit, die durch Zugabe von Silizium reduziert wird, desto kleiner fallen diese Verluste aus. Die Bleche erhalten bereits beim Herstellungsprozess beidseitig eine Isolierschicht, so dass Blechkpakete sehr einfach durch Schichtung, d.h. Stapelung, hergestellt werden können. Sie werden durch Pressbolzen oder Schweißbänder (= Metallbänder, die auf das Statorblechkpaket geschweißt werden) zusammengehalten, wobei allerdings zu beachten ist, dass diese so angeordnet werden, dass keine zusätzlichen Kurzschlusskreise für Wirbelströme auftreten. Hierzu ist die genaue Kenntnis der Verteilung des magnetischen Feldes innerhalb der Maschine erforderlich. Man beachte, dass bei Drehstrommaschinen, die von einem Frequenzumrichter gespeist werden, durchaus Frequenzen von  $f = 150\text{Hz}$  auftreten können. Das ist gegenüber der Speisefrequenz mit  $f = 50\text{Hz}$  der dreifache Wert, was nach obiger Gleichung die 9-fachen Wirbelstromverluste bedeutet. Ein Effekt, der beim Entwurf von umrichter gespeisten Drehstrommaschinen unbedingt zu beachten ist und gegebenenfalls erhebliche Probleme hervorrufen kann, die bis zum so genannten "Eisenbrand" führen können. Dabei handelt es sich um eine starke Erhitzung der Bleche, hervorgerufen durch Wirbelströme, die die Blechisolation zerstören kann und am blauen Erscheinungsbild der Bleche erkennbar wird, was einem Totalschaden des betroffenen Maschinenteils (Rotor oder Stator) gleichkommt. Als nächstes betrachten wir die Hystereseverluste  $P_{V,Hy}$ , für die folgende Abhängigkeit besteht:

$$P_{V,Hy} \sim f \cdot B^2$$

Hystereseverluste entstehen durch das Ummagnetisieren der Elementarmagnete. Je breiter die Hystereseschleife, desto höher fallen diese Verluste aus. Es lässt sich zeigen, dass sich bei konstanter Frequenz die Hystereseverlustenergie proportional zur Fläche der Hystereseschleife verhält. Hersteller von Elektroblechen wählen deshalb die Eisenzusammensetzung so, dass eine möglichst schmale Hystereseschleife mit kleiner Koerzitivfeldstärke entsteht. Abschließend lässt sich feststellen, dass durch Elektrobleche Eisenverluste zwar stark reduziert werden, dass sie jedoch als Teil der Gesamtverluste bei elektromechanischen Energiewandlern nicht vernachlässigt werden können. In Teil 2 über Erwärmung elektrischer Maschinen werden wir noch auf die restlichen Einzelverluste eingehen, die Kühlverfahren kennen lernen und uns dann mit den Betriebsarten, wie zum Beispiel Kurzzeit- und Aussetzbetrieb, beschäftigen.