

EISENVERLUSTE VON NK SUPER E-CORE MATERIALIEN UNTERSCHIEDLICHER DICKE UND VERGLEICH MIT KLASSISCHEN BLECHQUALITÄTEN

H. Mosebach

Die japanische NKK Corporation hat neuartige Elektrolech-Qualitäten entwickelt. Sie zeichnen sich durch einen hohen Siliziumgehalt aus und werden mit einem CVD - Verfahren hergestellt. Die Bleche haben Nominaldicken von 0,05, 0,1, 0,2 und 0,3 mm. Der Siliziumgehalt beträgt bis zu 6,5 % und ist über der Blechdicke im allgemeinen veränderlich. Durch den hohen Anteil an Silizium ist die elektrische Leitfähigkeit reduziert, so daß günstige Voraussetzungen für niedrige Wirbelstromverluste auch bei hohen Frequenzen gegeben sind. Die Materialien weisen z.T. eine verschwindende Magnetostriktion auf. Es sind folglich niedrige Geräuschpegel erreichbar. Die Bleche werden über Marubeni Deutschland GmbH, Immermannstraße 45, Deutsch-Japanisches Center, 40210 Düsseldorf, vertrieben.

Es werden 3 Werkstoffgruppen angeboten:

NK Super HF-Core: Für hohe Frequenzen besonders geeignet

NK Super BR-Core: Bleche mit besonders kleiner Remanenzflußdichte

NK Super E-Core: Besondere Eignung bei Frequenzen bis 5000 Hz

Nach Diskussion mit Marubeni ist für den **Einsatz in elektrischen Maschinen die NK Super E-Core - Qualität am besten geeignet**. Die entsprechenden Daten sind in [1] zu finden. Das Material ist aufgrund der bereits mit bloßem Auge erkennbaren kristallinen Struktur als relativ spröde zu bezeichnen. Es werden eher die dünneren Bleche empfohlen, da das Stanzen der 0,3 mm Qualität offenbar schwierig ist. Ein günstiger Kompromiß zwischen Material- und Fertigungsaufwand scheint bei 0,1 mm Blechen gegeben zu sein. Der hohe Siliziumgehalt bedingt eine gegenüber konventionellen Elektrolechen deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit. Sie wird mit 18,6 W/(mK) angegeben.

Für den Entwurf elektrischer Maschinen ist es erforderlich, die Verlustmechanismen (Hysteresee- und Wirbelstromverluste) durch einfache analytische Ausdrücke zu beschreiben und die spezifischen Eisenverluste [W/kg] als Funktion der Frequenz f und der Flußdichte B_{\max} zu bestimmen. Bei klassischen Elektrolechen wird der Hystereseeanteil üblicherweise als linear mit der Frequenz, der Wirbelstromanteil als quadratisch mit f gehend angesetzt. Beide Anteile werden als quadratisch von B_{\max} abhängig angenommen. Überstreicht man allerdings einen Frequenzbereich, der nennenswert über 50 ... 60 Hz hinausgeht, sind die aus Katalogen entnommenen Meßwerte durch diese Annahmen nicht mehr verifizierbar. Es ist dann zweckmäßig, zwar weiterhin von einem linear mit f zunehmenden "Hystereseeanteil" auszugehen, den Exponenten des "Wirbelstromanteils" und den der Flußdichte jedoch freizugeben.

Die verallgemeinerte Bestimmungsgleichung für die spezifischen Eisenverluste lautet demnach

$$p_{vFe} = \left[v_H \frac{f}{50 \text{ Hz}} + v_W \left(\frac{f}{50 \text{ Hz}} \right)^{x_1} \right] \left(\frac{B_{\max}}{1 \text{ T}} \right)^{x_2} ,$$

wobei ein "Bearbeitungsfaktor" nicht berücksichtigt ist und beim Entwurf geometrie- und technologieabhängig ergänzt werden muß. Zur Bestimmung der 4 Unbekannten sind grundsätzlich minde-

stens 4 Gleichungen erforderlich, die aus einer entsprechenden Zahl von Meßpunkten zu gewinnen sind. Es ist angebracht, als Stützstellen möglichst weit auseinanderliegende Meßpunkte zu nehmen, die den hauptsächlich interessierenden Bereich, zum Beispiel zwischen 50 Hz und 2000 Hz, eingrenzen.

Die Ergebnisse der analytischen Approximation sind in **Tabelle 1** zusammengestellt.

Tabelle 1:

Verlustkennziffern von NK Super E-Core Blechen und klassischen Blechqualitäten

Material	v_h [W/kg]	v_w [W/kg]	x_1 [-]	x_2 [-]
05 EX 2500	0,646	0,0329	1,67	1,89
10 EX 900	0,344	0,101	1,56	1,83
20 EX 1050	0,248	0,140	1,67	1,84
30 EX 1200	0,325	0,162	1,70	1,78
V 250 –35 A	0,578	0,317	1,77	1,93
HF 20	0,381	0,449	1,54	2,07

Die Ergebnisse beziehen sich auf eine reine Wechselmagnetisierung, d.h. auf Meßwerte, wie sie mit dem Epsteinrahmen oder vergleichbaren Anordnungen gewonnen werden. Bei einer zweidimensionalen rotierenden Magnetisierung (wie in Teilen des Jochs einer elektrischen Maschine gegeben) sind sowohl bei klassischen Blechen als auch den NKK-Materialien 2 ... 3 fach höhere Verluste zu erwarten (Dr. Sievert, PTB, Oktober 1999).

Die Zahlenwerte für den Hystereseverlustanteil zeigen ein ausgeprägtes Optimum für die Sorte 20 EX 1050. Die dünnste Blechdicke weist interessanterweise fast die 3-fachen Hystereseverluste auf.

Bei den Exponenten von Frequenz und Flußdichte unterscheidet sich vor allem der Exponent von f durchaus erheblich vom idealisiert anzunehmenden Wert $x_1 = 2$. Dies gilt nicht nur für die neuartigen Bleche, sondern auch für die aus Vergleichsgründen mit aufgenommenen klassischen Materialien

V 250 – 35 A und HF 20. Die Werte von x_2 liegen demgegenüber deutlich näher am üblichen Ansatz.

Der Wirbelstromverlustanteil v_w zeigt bei den NKK-Blechen insofern ein erwartetes Verhalten, als er mit zunehmender Blechdicke monoton ansteigt. Die übliche Proportionalität zum Quadrat der Blechdicke [2] kann jedoch nicht wiedergefunden werden. Dies könnte an der über der Blechdicke variablen Siliziumkonzentration und der entsprechend ortsveränderlichen Leitfähigkeitsverteilung liegen.

Für die Anwendung in elektrischen Maschinen ist in erster Linie der obere Flußdichtebereich in besonderer Kombination mit höheren Frequenzen interessant. **Tabelle 2** zeigt daher für die beispielhafte Flußdichte von $B_{max} = 1,0$ T die spez. Eisenverluste für verschiedene Frequenzen von 50 bis 5000 Hz. Die Werte wurden sämtlich mit den analytischen Approximationsgleichungen ermittelt.

Tabelle 2:

Spez. Eisenverluste von NK Super E-Core Blechen und klassischen Blechqualitäten bei $B_{\max} = 1\text{T}$

Frequenz: Material	50 Hz [W/kg]	200 Hz [W/kg]	400 Hz [W/kg]	1000 Hz [W/kg]	2000 Hz [W/kg]	5000 Hz [W/kg]
05 EX 2500	0,68	2,9	6,2	18	41	137
10 EX 900	0,45	2,3	5,3	18	46	168
20 EX 1050	0,39	2,4	6,5	26	76	331
30 EX 1200	0,49	3,0	8,2	33	99	439
V 250 – 35 A	0,90	6,0	17	75	240	1157
HF 20	0,83	5,3	14	53	147	578
NO 10	-	-	13	-	-	-
NO 15	-	-	14	-	-	-
NO 20	-	-	15	-	-	-

Es ist auch hier interessant, die neuen Materialien mit klassischen Elektrolechqualitäten für mittlere Frequenzen zu vergleichen. Vollständige Unterlagen standen in diesem Zusammenhang nur über die Materialien V 250 – 35 A und HF 20 zur Verfügung, während für die Qualitäten NO 10, NO 15 und NO 20 der EBG [3] nur einzelne Verlustwerte für 400 Hz und 1T vorlagen. Die Approximation ist daher nur für die beiden erstgenannten Materialien möglich.

Das jeweilige Minimum der Verluste für eine bestimmte Frequenz ist durch Schattierung hervorgehoben. Die dünnste Blechstärke ist bei der gewählten Flußdichte offenbar nur bei besonders hohen Frequenzen den anderen Qualitäten überlegen. Bei Frequenzen bis ca. 1000 Hz treten die kleinsten Verluste bei Blechdicken von 0,1 bzw. 0,2 mm auf. Vor dem Hintergrund des Fertigungsaufwandes scheint es selbst bei Frequenzen bis über 2000 Hz vorteilhaft, die Sorte 10 EX 900 zu nehmen.

Literatur

- [1] NK Super E-Core Technical Data,
Druckschrift der Marubeni Deutschland GmbH, 40210 Düsseldorf
- [2] K. Küpfmüller: Theoretische Elektrotechnik, Springer 1965
- [3] STABOCOR, STABOPERM, STABOPOL,
Druckschrift der EBG, Ausgabe 01/97