

Über den Wolken

Drastische Reduzierung von Eisenverlusten durch neuen Nickel-Eisen-Werkstoff in Elektromotoren



Robert Brand

Um mit einem solargetriebenen Flugzeug auch nachts fliegen zu können, sind unter anderem extrem energieeffiziente Elektromotoren gefragt. Neue Metallegierungen ermöglichen die Herstellung äußerst verlustarmer Rotor- und Statorpakete. Dadurch soll es sogar möglich werden, nur mit der Kraft der Sonne die Erde zu umrunden.

VACUUMSCHMELZE GMBH & CO. KG

GRÜNER WEG 37
D-63450 HANAU
TELEFON +49 6181 38-0
FAX +49 6181 38-2645
INFO@VACUUMSCHMELZE.COM
WWW.VACUUMSCHMELZE.COM



Alle ressourcensparenden Technologien basieren auf einem weitest gehenden Einsatz regenerativer Energiequellen sowie deren möglichst effizienter Verwendung. Kompromisslos umgesetzt wird dieser Ansatz bei dem Schweizer Projekt „Solar Impulse“. Die Vision eines Motorflugzeuges, das Tag und Nacht ohne Treibstoff allein durch die Kraft der Sonne fliegt, wurde im Jahr 2010 Realität. Damit wurde gezeigt, zu welchen Resultaten bereits heute verfügbare Technik im Stande ist. Entscheidend für den Erfolg des 2003 initiierten Projektes war das Zusammenspiel vieler Komponenten: Neben der komplexen Flugzeugkonstruktion waren dies die effiziente Energiegewinnung mittels Solarzellen, ein leistungsfähiges Batteriesystem und verlustarme Motoren.

Bei einer Flügelspannweite von 63 Metern und einer Solarzellenfläche von rund 200 m² wiegt der Flugzeugtyp HB-SIA lediglich 1600 kg. Die Batterien machen mit etwa 400 kg einen großen Teil des Ballastes aus.

Die Effizienz der Elektromotoren ist von entscheidender Bedeutung, denn aufgrund der limitierten Energiespeicherkapazität der Batterien dürfen diese nicht zuviel Leistung beanspruchen, um auch während der Nacht den Flugbetrieb aufrecht zu erhalten. Die von der Firma Etel konstruierten und gebauten bürstenlosen Gleichstromantriebe leisten dabei durchschnittlich 5 kW und haben eine Maximalleistung von 7 kW. Vier derartige Torque-Motoren befördern das Flugzeug auf eine Höhe von bis zu 8500 Metern bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 70 km/h.

Neue Werkstoffe sind gefragt

Nach dem Erfolg des ersten Prototyps sollen nun die Möglichkeiten einer nachhaltigen Reduzierung des Energieverbrauchs durch einen Flug um die Erde dokumentiert werden. Hierfür muss das bestehende Konzept weiterentwickelt werden. Das neue Flugzeug HB-SIB befindet sich derzeit in der

Dr. Robert Brand ist Leiter zentrale Marketingaufgaben, Halbzeug & Teile bei der Vacuum-schmelze GmbH & Co. KG in Hanau



Konstruktionsphase und wird eine deutliche Spannweitenvergrößerung aufweisen. Das ehrgeizige Ziel der Weltumrundung im Jahr 2014 kann nur durch den Einsatz modernster Technologien und Werkstoffe erreicht werden. Was die Motoren betrifft, so ist geplant, den Wirkungsgrad von 95 auf 98% zu erhöhen. Dies erfordert unter anderem eine signifikante Reduzierung der Eisenverluste in Stator und Rotor. Das gebräuchliche Elektroblech ist werkstoffseitig nahezu ausgereizt, daher könnten die Eisenverluste nur durch eine Verringerung der Blechstärke reduziert werden.

Ein deutlich umfassenderer Ansatz ergibt sich durch die Verwendung von Nickel-Eisen-Legierungen. Grundsätzlich setzen sich auch hier die Eisenverluste aus Hystereseverlust und Wirbelstromverlusten zusammen. Während die Größe der Hystereseverluste durch die Koerzitivfeldstärke H_c bestimmt wird, ist der elektrische Widerstand der entscheidende Werkstoffparameter für die Wirbelstromverluste. Bei einem Nickelgehalt zwischen 35 und 50% ergeben sich um den Faktor 2 bis 5 kleinere Hystereseverluste gegenüber Elektroblech. Gleichzeitig kann der elektrische Widerstand ρ_{el} erhöht werden, was entsprechend kleinere Wirbelstromverluste zur Folge hat. Insbesondere bei schnelldrehenden Motoren oder hohen Wechselfeldern werden derartige Legierungen deshalb schon seit vielen Jahren verwendet. Exemplarisch sind hier magnetische Rückschlüsse in Kleinmotoren in medizintechnischen Anwendungen, bei-

spielsweise in Dentallaboren zu nennen. Eine andere Anwendungsklasse sind Motoren, die permanent über lange Zeiträume betrieben werden. Dort sind die Betriebskosten häufig von entscheidender Bedeutung. Einsparungen beim Stromverbrauch führen insbesondere bei steigenden Energiepreisen zu einer schnellen Amortisation der Investitionskosten.

Der wesentliche Nachteil der Nickel-Eisen-Werkstoffe gegenüber Elektroblech liegt in der reduzierten Sättigungsinduktion, was bei der Dimensionierung von Rotor- und Statorpaketen berücksichtigt werden muss. Durch das Zulegieren von Molybdän ist es der Vacuumschmelze gelungen, einen neuen Werkstoff zu entwickeln, der mit Fokus-

ler an als bei Elektroblech. Dies führt dazu, dass in beiden Fällen ein Induktionswert von 1 T bei einer magnetischen Feldstärke von 100 A/m erreicht wird (s. Tabelle).

Minimale Verluste

Neben den Hystereseverlusten sind insbesondere bei schnelldrehenden und Motoren mit hoher Polzahl die Wirbelstromverluste wegen der dann auftretenden hohen Frequenzen von Bedeutung. Dieser Verlustanteil lässt sich am effektivsten durch die Wahl möglichst dünner Bänder reduzieren, wobei die Verarbeitung derartiger Bleche zunehmend aufwändig und kostspielig ist. Bei Verwendung von Ultra-

Der Einsatz von Nickel-Eisen-Legierungen reduziert die Eisenverluste auf rund ein Fünftel

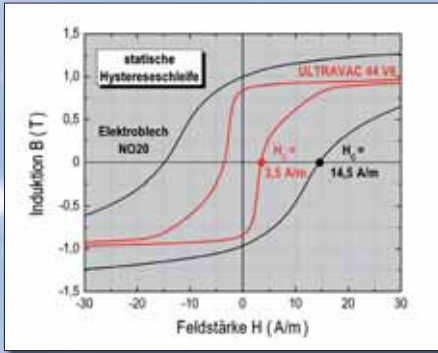
sierung auf geringe Eisenverluste den Anforderungen für hocheffiziente Elektromotoren in idealer Weise gerecht wird. Die Ultravac 44 V6 genannte Legierung wird anlässlich der Messe „coilwinding“ vom 26. bis 28. Juni in Berlin vorgestellt.

Wie in Bild 1 verdeutlicht wird, beträgt die Koerzitivfeldstärke mit 3,5 A/m nur etwa 1/4 Wertes von Elektroblech, was eine entsprechende Reduzierung der Hystereseverluste zur Folge hat. Die Sättigungspolarisation fällt zwar niedriger aus, die statische Neukurve steigt bei kleineren Feldstärken aber schnel-

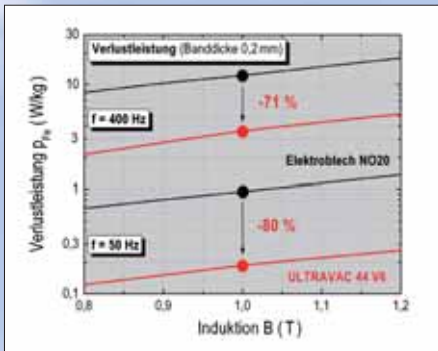
vac 44 V6 werden Wirbelstromverluste wirksam durch einen sehr hohen spezifischen elektrischen Widerstand minimiert. Dieser liegt mit $0,8 \mu\Omega\text{m}$ etwa 50% über dem elektrischen Widerstand von Elektroblech (s. Tabelle).

Auf Grund der herausragenden Werkstoffeigenschaften ergeben sich bei einer Induktion von 1 T extrem kleine Eisenverluste. Bei einer Banddicke von 0,2 mm liegen diese zwischen 70 und 80% unter der Verlustwerten von der Elektroblechqualität NO 20 (Bild 2).

Quelle: SolarImpulse

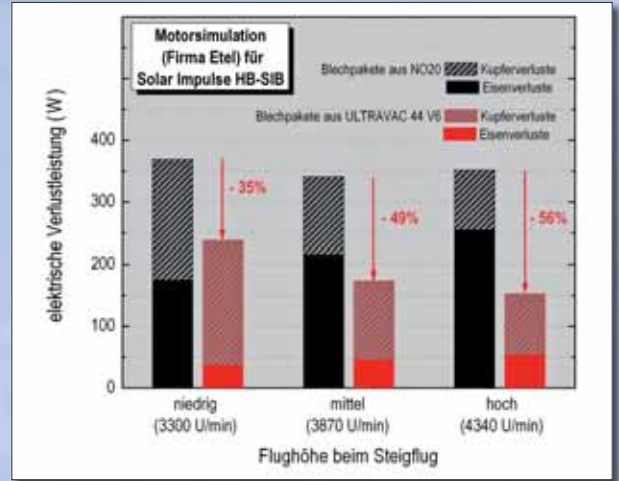


1: Statische Hystereseschleifen von Ultravac 44 V6 und Elektroblech NO 20



2: Eisenverluste von Ultravac 44 V6 und Elektroblech NO 20 bei 50 und 400 Hz in Abhängigkeit von der Induktion

3: Stator- und Rotorpakete für Solar Impulse HB-SIB aus Ultravac 44 V6 mit Banddicke 0,1 mm. Auf den Rotor sind Dauermagnete aus Vacodym 655 HR geklebt.



4: Simulation der Verlustleistung der Motoren bei verschiedenen Phasen des Steigfluges. Der Gesamtverlust der Stator- und Rotorpakete aus Ultravac 44 V6 liegt deutlich unter den Werten für Elektroblech NO 20.

Mit Ultravac 44 V6 engagiert sich nun die Vacuumschmelze als offizieller Lieferant für die neue Generation des Solar-Impuls-Flugzeuges HB-SIB. Entscheidend dabei ist aber nicht nur die Materialbereitstellung, sondern die Fertigung kompletter Statoren und Rotoren. Neben dem reinen Werkstoff-Knowhow wurden in den letzten Jahren verstärkt Verfahren entwickelt, um die Legierungseigenschaften möglichst optimal in Blechpakete umzusetzen. Für das Solar-Impuls-Projekt werden hierfür 0,1 mm dünne Bleche verwendet. Mit einer bisher nur für Motorsportanwendungen verwendeten Technologie erhält man eine Packungsdichte von rund 98% bei gleichzeitig hervorragender Isolation zwischen den Bandlagen.

Gegenüber der aktuellen Version sind die neuen ETEL-Motoren bei einer etwa doppelt so hohen Maximalleistung von etwa 13 kW auch ungefähr doppelt so schwer. Der Stator hat einen Außendurchmesser von 165 mm bei einer Bauhöhe von 60 mm (Bild 3). Auf den Rotor werden Neodym-Eisen-Bor-Magnete geklebt, die ebenfalls von der Vacuumschmelze geliefert werden. Die Permanentmagnete des Typs Vacodym 655 HR wurden aus Einzelmagneten zu einem System verklebt und mit Vaccoat 20011 beschichtet. Die Beschichtung zeichnet sich durch sehr gute Korrosionsbeständigkeit insbesondere gegen Feuchtigkeit und Salzsprühnebel aus.

Das entscheidende Argument für den Wechsel der weichmagnetischen Kompo-

nenten von Elektroblech auf Ultravac 44 V6 ist die Reduktion der Gesamtverluste des Motors bzw. die Erhöhung dessen Effizienz. Bild 4 zeigt die Simulationsergebnisse der FEM-Rechnungen der elektrischen Motorverluste für die verschiedenen Phasen des Steigfluges von Solar Impulse HB-SIB. Während die Kupferverluste gegenüber Elektroblech NO 20 nahezu gleich sind, ermöglichen die Statoren und Rotoren aus Ultravac 44 V6 rund 80% niedrigere Eisenverluste. Bei der Gesamtverlustbetrachtung führt dies zu einer Reduzierung zwischen 35 und 56%. Damit steigt der Wirkungsgrad der Motoren von 96 auf herausragende 98%.

Der Einsatz eines neuen Werkstoffes, dessen Weiterverarbeitung zu Statoren und Rotoren mit höchster Packungsdichte sowie die Verwendung stärkster Dauermagnete bilden so die Grundlage zur Entwicklung neuer Motoren mit geringsten Eisenverlusten und maximaler Effizienz. Legierungsentwicklung und die stetige Verbesserung bekannter Technologien leisten damit einen entscheidenden Beitrag zu neuen, ressourcenschonenden Konzepten. Mit dem geplanten Flug um die Welt allein mit der Kraft der Sonne zeigt das Projekt Solar Impulse das immense Potenzial innovativer Technologien zur Ressourcenschonung und der Nutzung erneuerbarer Energien.

Eigenschaft	Einheit	Elektroblech NO 20	ULTRAVAC 44 V6
elektrischer Widerstand ρ_{el}	$\mu\Omega m$	0,52	0,80
Koerzitivfeldstärke HC	A/m	14,5	3,5
Induktion B bei	H = 10 A/m	T	0,77
	H = 20 A/m	T	0,83
	H = 50 A/m	T	0,93
	H = 100 A/m	T	0,99
	H = 200 A/m	T	1,05
	H = 500 A/m	T	1,18
Verlustleistung pFe (Banddicke 0,2mm)	1 T / 50 Hz	W/kg	0,95
	1 T / 400 Hz	W/kg	12,2
	1 T / 2500 Hz	W/kg	205

Vergleich Elektroblech NO 20 und Ultravac 44 V6