



Leistungsoptimierung und Größenminimierung bei Hochgeschwindigkeitsanwendungen

- I. Einführung
- II. Optimierung eines bürstenlosen Gleichstrommotors für Hochgeschwindigkeitsanwendungen
 - Die verschiedenen Typen von bürstenlosen Gleichstrommotoren, Motoren mit genuteten Statoren versus nutzenlosen Statoren
 - Optimierung von Motoren für die Hochgeschwindigkeitsanwendung
- III. Anwendungsbeispiele
 - Hochgeschwindigkeitsmotoren für medizinische Beatmungsgeräte
 - Hochgeschwindigkeitsmotoren für chirurgische Handwerkzeuge
- IV. Schlussfolgerung

I. Einführung

Gegenwärtig ist eine steigende Nachfrage nach bürstenlosen Gleichstrommotoren für Hochgeschwindigkeitsanwendungen zu verzeichnen. So hat beispielsweise die neue Flügelradtechnologie dazu geführt, dass moderne Beatmungsgeräte kompakter und ruhiger konstruiert werden können. Dieses Einsatzgebiet erfordert Motoren, die Drehzahlen von 50 bis 60 krpm haben und in der Lage sind, eine hohe Beschleunigung und Abbremsung synchron zum Atmungsmuster der Patienten zu leisten.

Weitere Beispiele sind Handwerkzeuge für den Einsatz in der chirurgischen Praxis und bei Zahnärzten. Sie müssen immer leistungsstärker und gleichzeitig immer kleiner sein. Eine Möglichkeit, das zu erreichen, besteht in der Verwendung von bürstenlosen Hochgeschwindigkeitsmotoren, die bei Einhaltung der Volumenvorgaben die nötige Kraft und Leistung erbringen können.

Die mechanische Kraft ist das Produkt aus Drehmoment und Drehzahl. Um die Kraft zu steigern, können wir also entweder das Drehmoment oder die Drehzahl erhöhen. Ganz allgemein gilt: Bei einer gegebenen Technologie hängt das Dauerdrehmoment mit der Motorgröße zusammen. Das Dauerdrehmoment ist jedoch oft durch thermische Erwägungen begrenzt.

Beispielsweise liegt beim Stillstand oder bei geringer Drehzahl der einzige Energieverlust durch den Motor in Form von Joule-Verlusten vor.

Betrachten wir Folgendes:

T	= Motordrehmoment
R _{Th1}	= Thermischer Widerstand Spule-Stator
R _{Th2}	= Thermischer Widerstand Stator-Luft
K	= Motordrehmomentkonstante
R	= Motorspulenwiderstand
P _j	= Energieverlust durch Joule-Effekt
ΔT	= Maximal möglicher Anstieg der Spulentemperatur
ΔT	= (R _{Th1} + R _{Th2}). P _j = (R _{Th1} + R _{Th2}).R.I ² = (R _{Th1} + R _{Th2}). R. T ² / K ²

(R_{Th1} + R_{Th2}). R / K² repräsentiert eine hervorragende Leistungskennzahl zur Charakterisierung des Motors.

Ohne Berücksichtigung der Hochgeschwindigkeitsbeschränkungen wird ein Motorkonstrukteur versuchen, das Drehmoment zu optimieren, das der Motor für eine gegebene Kraft ableiten kann. Die Leistungskennzahl R/ K² ist ein guter Faktor zur Charakterisierung eines Motors. Je kleiner der Wert ist, desto besser ist der Motor. Ein guter Motor sollte einen kleinen Widerstand und eine hohe Drehmomentkonstante besitzen.

Da die Drehmomentkonstante vom Magnetkreis abhängt, besteht eine Aufgabe bei der Motorkonstruktion darin, dass der vom Magneten erzeugte Maximalfluss durch die Windung hindurch geht.

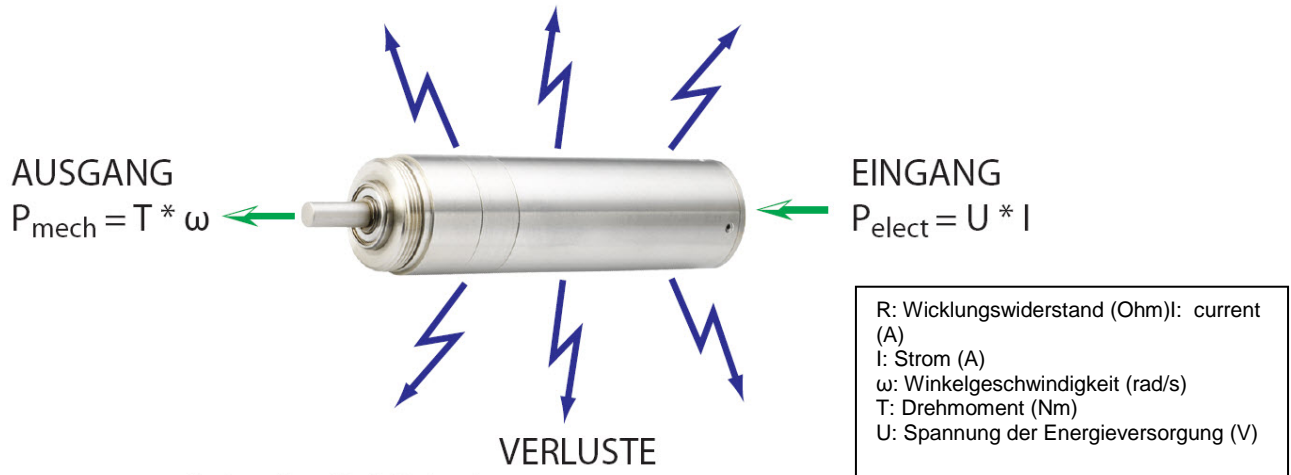
Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Drehmomentkonstante besteht in der Verwendung stärkerer Magnete wie z. B. NeoFe, die heute schon an 50 MGOe herankommen.

Zur Verringerung der Joule-Verluste besteht die Aufgabe darin, einen möglichst großen Drahtquerschnitt und damit den geringsten Kupferwiderstand zu haben.

Nach der Optimierung von R/ K² ist das maximale Drehmoment bei einer gegebenen Motorgröße weiterhin durch dessen thermische Grenze begrenzt. Demzufolge ist der andere Parameter zur Erhöhung der Kraft die Erhöhung der Drehzahl.

Theoretisch erscheint eine Drehzahlerhöhung einfach durch eine Erhöhung der Stromversorgungsspannung erreichbar zu sein. Allerdings führt eine Erhöhung der Drehzahl zur Erzeugung von mehr Wärme durch:

- Eisenverluste,
- Lagerreibungsverluste,
- Verluste durch Erzeugung von Stromwelligkeit.



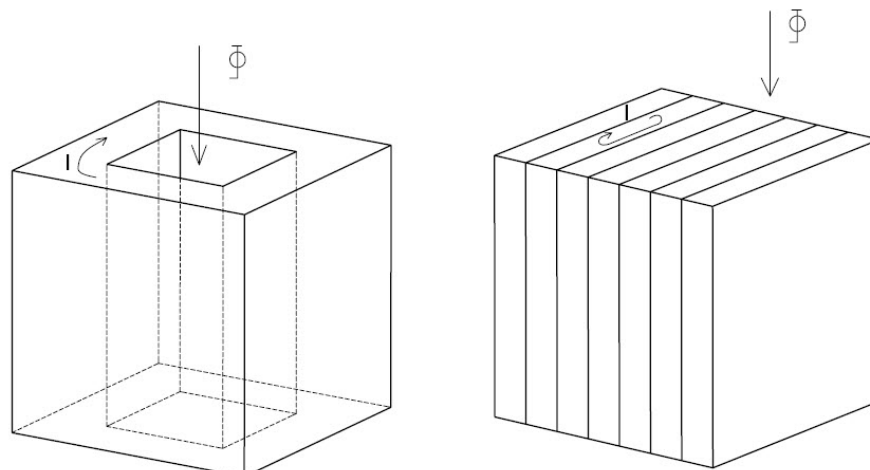
Kupferverluste (Joule-Verluste):

Die Kupferverluste hängt von der Last ab und verhält sich quadratisch zum Strom.

Mechanische Verluste:

Die mechanischen Verluste schließen die Reibung im Motor ein (Lager und Kommutierung).

Eisenverluste infolge von Wirbelstrom sind die Verluste, die durch den in der Blechung t zirkulierenden Strom erzeugt werden, der durch den Magnetfluss entsteht.



I Stromfluss im Eisen bedingt durch Veränderung des magnetischen Flusses

Laminierungen reduzieren Wirbelströme erheblich

Wirbelströme in den Laminierungen

Betrachten wir Folgendes:

Φ = Magnetfluss

B = Induktion im Eisen

$$\Phi = \iint B dS$$

Eine Flussschwankung erzeugt einen Strom im Inneren des Materials, wie das ein Transformator in seiner Sekundärspule macht. Die Gleichung für diesen Strom I lautet:

$$0 = RI + \frac{d\Phi}{dt}$$

I = Strom im Inneren des Eisens

R = Widerstand des Eisens

Die Eisenverluste infolge von Wirbelstrom sind $= RI^2 \cong \chi \cdot B^2 \cdot \omega^2$

χ ist ein Parameter, der mit der Konstruktion und der Materialverwendung verknüpft ist.

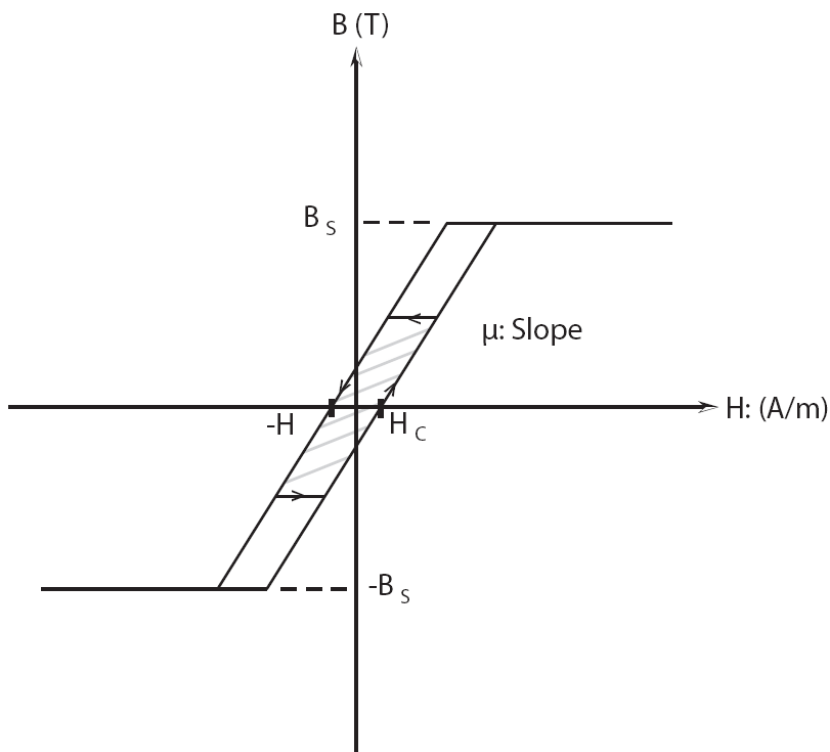
Die Eisenverluste infolge von Wirbelstrom hängen vom Quadrat der Induktion im Eisen und vom Quadrat der Frequenz ab.

Zur Verringerung der Eisenverluste verwenden wir dünnere Blechungen mit höherem elektrischen Widerstand.

Je dünner die Blechungen sind, desto länger sind die Stromschleifen, was den Widerstand des Kreises erhöht.

Eisenverluste infolge von Hysterese

Das magnetische Material, das zur Leitung des Magnetfelds verwendet wird, weist Hysterese auf. Die Induktion im Inneren dieses Materials folgt einem Zyklus, der in der folgenden Abbildung beschrieben ist.



B_S : Induktion der Sättigung
 H_C : Koerzitivfeldstärke
 μ : Permeabilität des Werkstoffes

Hysteresekurve von weichmagnetischem Material

Die Verluste infolge Hysterese in dem Material haben folgenden Typ:

$$P_{\text{hyst}} = \int H dB$$

Deshalb gilt:

$$P_{\text{hyst}} = \mu \cdot \lambda \cdot B^2 \cdot w^2$$

Dabei ist μ mit der Permeabilität des verwendeten Materials verknüpft, und der Parameter λ ist mit dem Volumen und der Koerzitivkraft des Materials verknüpft.

Für Motoren, die für Hochgeschwindigkeit konstruiert werden, verwenden wir Material, das ein kleines Koerzitivfeld hat, wie zum Beispiel Fe Ni.

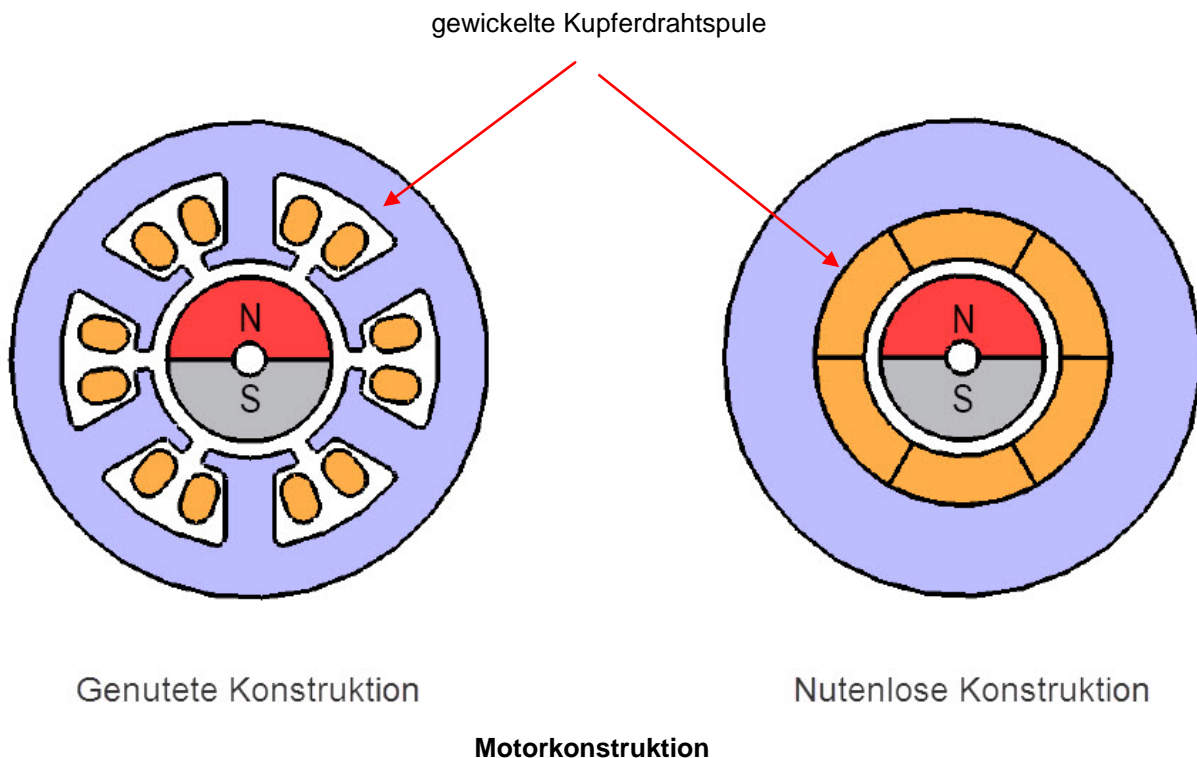
Wie bereits erwähnt, hängen die Eisenverluste vom Quadrat der Induktion in der Eisenblechung und vom Quadrat der Frequenz ab. Aus diesem Grund kann allgemein festgestellt werden, dass Motoren mit einer hohen Anzahl von Polpaaren Drehzahlbegrenzungen haben. In vielen Fällen treten je nach Bauweise bei einem Motor mit 2 Polpaaren mehr Eisenverluste auf als bei einem Motor mit einem Polpaar; dieser Motor hat aber wahrscheinlich einen besseren Wert für R/K^2 .

II. Optimierung eines bürstenlosen Gleichstrommotors für Hochgeschwindigkeitsanwendungen

A- Die verschiedenen Typen von bürstenlosen Gleichstrommotoren

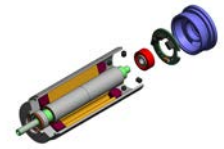
Aus technischer Sicht gibt es zwei Haupttypen bürstenloser Gleichstrommotoren: genutete und nutenlose. Diese Unterscheidung bezieht sich auf die Konfiguration des Motorstators.

Die folgende Zeichnung veranschaulicht genutete und nutenlose Statoren.



Motoren mit genutetem Stator

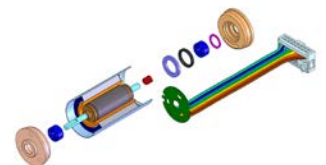
Die Spulen sind im Inneren der Nuten gewickelt. Die magnetische Induktion in der Blechung ist ziemlich hoch, weil der Luftspalt zwischen den Blechungen (Stator) und dem Magneten klein ist. Deshalb können wir einen kleinen Magnetdurchmesser verwenden. Das Kupfervolumen ist durch den Nutraum und durch die Schwierigkeit des Wickelns im Inneren der Nut begrenzt. Die Anordnung der Spule im Inneren der Statornuten bietet den Vorteil einer Reduzierung des thermischen Widerstands der Baugruppe aus Spule und Stator.



Ohne Strom hat der Rotor bevorzugte Magnetpositionen vor der Blechung, was ein Rastmoment oder Selbsthaltungsmoment erzeugt. Eine Möglichkeit, das Selbsthaltungsmoment zu verringern, ist der Versatz der Blechung. Der genutete Motor ist konstruktionsbedingt sehr robust, da die Spule in die Blechung eingeführt wird. Es ist konstruktiv möglich, Motoren zu bauen, die ein großes Verhältnis zwischen Länge und Durchmesser aufweisen.

Motoren mit nutenlosem Stator

Bei einem nutenlosen Motor wird die Spule in einem getrennten externen Vorgang gewickelt und ist vom Typ her „selbsthaltend“ (siehe Abbildung unten). Diese Spule wird dann während der Motormontage direkt in den Luftspalt eingeführt.



Bei dieser Konstruktionsweise verringert sich die magnetische Induktion in der Spule, weil sich der Luftspalt vergrößert. Deshalb wird üblicherweise der Motordurchmesser optimiert, um die ideale magnetische Induktion bei optimalem Kupfervolumen zu erzielen. Typischerweise ist die Induktion in einem solchen Motor konstruktionsbedingt viel geringer als bei einem bürstenlosen genuteten Motor. Der Verlust an Induktion wird üblicherweise durch Verwendung eines größeren Magneten kompensiert. Da die Trägheit eines Rotors dem Quadrat seines Durchmessers folgt, ist die Trägheit bei einem nutenlosen Motor üblicherweise höher als beim genuteten Motor.

Hinsichtlich R/K^2 hat ein nutenloser Motor eine gute Leistungskennzahl, weil das Verhältnis von Induktion zu Kupfervolumen optimiert ist. Ohne Kreisstrom steht der Rotor einer ununterbrochenen magnetischen Leitfähigkeit gegenüber, weshalb es beim nutenlosen Motor kein Rastmoment bzw. Selbsthaltungsmoment gibt. Konstruktionsbedingt sind bei nutenlosen Motoren die Eisenverluste bei hoher Drehzahl erheblich reduziert.

Vergleichsblatt

Leistungsindikatoren	Genutetes Design	Nutenloses Design
R/K^2		Vorteil: nutenlos, dank neuer Magneten und neuer Wicklungstechnologie
RTh^1	Vorteil: genutet. Bessere Wärmeableitung: Spule-Stator	
RTh^2	Same	Same
Trägheit	Vorteil: genutet, wegen des kleineren Luftspalts, der einen kleineren Magnetdurchmesser ermöglicht.	
Eisenverluste		Vorteil: nutenlos, wegen geringerer Induktion in Blechung
Beständigkeit gegenüber mechanischen Stößen und Temperaturwechsel	Vorteil: genutet. Die Spule wird in die Blechung eingeführt.	
Auswirkung neuer Magneten auf Design		Vorteil: nutenlos. Stärkere Magneten bedeuten einen größeren Luftspalt.

Je nach Anwendungsanforderungen ist Portescap in der vorteilhaften Lage, entweder genutete oder nutenlose Motoren anbieten zu können, um eine optimale Leistung zu erzielen: Maximales Drehmoment, reduzierte Wärme, verbesserter Wirkungsgrad, reduzierte Vibrationen,....

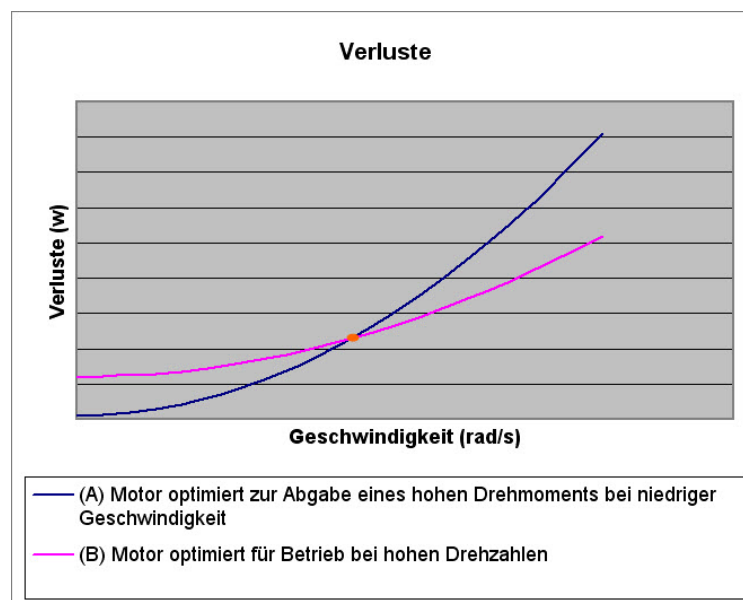
B- Optimierung des Motors für die Hochgeschwindigkeitsanwendung.

Wir haben uns eben mit den verschiedenen Typen der Motortechnologie befasst, aber für beide gelten dieselben physikalischen Gleichungen.

Tatsächlich sollten wir, um ein Drehmoment zu erreichen, einen Motor mit einem guten Wert für R/K^2 haben. Wir wissen, dass sich dieser Wert erhöht, wenn wir die durch den Magneten erzeugte Induktion erhöhen. Obwohl wir auch gesehen haben, dass die Eisenverluste vom Quadrat der Induktion sowie vom Quadrat der Rotordrehzahl abhängen. Die folgende Abbildung veranschaulicht zwei Motoren:

- A. Einen Motor mit hohem R/K^2 -Wert, der bei geringer Drehzahl geringe Verluste aufweist (hauptsächlich Joule-Verluste), aber bei hoher Drehzahl hohe Verluste hat (Joule-Verluste + Eisenverluste).
- B. Ein Motor mit einem geringeren R/K^2 -Wert

In der Optimierungsphase werden die Verluste durch unsere Konstruktionsingenieure entsprechend dem Arbeitspunkt der jeweiligen Anwendung optimiert. Der Arbeitspunkt wird durch Drehmoment und Drehzahl definiert.



III. Anwendungsbeispiele

- Hochgeschwindigkeitsmotoren für Beatmungsgeräte



Gebläse mit Motor für Beatmungsgerät

Ein für solche Anwendungen vorgesehener Motor muss in der Lage sein, synchron zum Atemmuster des Patienten in wenigen Millisekunden von wenigen Tausend Umdrehungen pro Minute (rpm) auf 50 Krpm anzusteigen. Um das Flügelrad in Drehbewegung zu versetzen, wird lediglich ein Drehmoment im Bereich von wenigen Hundertstel Newtonmetern benötigt. Der Hauptteil des Drehmoments wird zum Beschleunigen und Abbremsen des Flügelrads verwendet. Die Steuerung der Motortemperatur ist entscheidend für die Umgebung (die vom Patienten eingeatmete Luft) aber auch für die Haltbarkeit der Kugellager im Inneren des Motors.

Portescap, Wegbereiter bei Ventilationsmotoren, hat kürzlich eine neue Motorfamilie für diese spezielle Anwendung entwickelt, bei der die Joule-Verluste im Verhältnis zu den Eisenverlusten optimiert wurden, um den immer strengeren Anforderungen gerecht zu werden.

- Motoren für chirurgische Handwerkzeuge

Motoren für chirurgische Handwerkzeuge müssen bei hoher Drehzahl laufen, um in einem leichten Gehäuse Kraft zu erzeugen. Sie müssen bei niedriger Temperatur laufen, um dem Chirurgen die Arbeit zu erleichtern, und außerdem müssen sie in der Lage sein, die Sterilisation im Autoklav zu überstehen.

Dank Optimierung des Magnetkreises ist es Portescap gelungen, einen Motor mit 16 mm Durchmesser zu entwickeln, der bei Drehzahlen von bis zu 80.000 Umdrehungen pro Minute (rpm) ein Drehmoment von wenigen Hundertstel Newtonmeter liefern kann, ohne dass die Gehäusetemperatur 43 °C übersteigt.

Die über 20-jährige Erfahrung von Portescap bei der Herstellung von Motoren, die mittels Autoklav sterilisierbar sind, hat zu einem Design geführt, das laut Kundenberichten selbst nach mehr als 1.000 Autoklavzyklen in ihren chirurgischen Handwerkzeugen noch voll funktionstüchtig ist.



IV. Schlussfolgerung

Bei Elektromotoren gibt es dank neuer marktverfügbarer Materialien eine kontinuierliche Weiterentwicklung. Heute erreichen NeoFe-Magnete 50 MGOe und neue Blechungsmaterialien zeichnen sich durch geringere Verluste aus, was den Einsatz von Elektromotoren bei sehr hohen Drehzahlen ermöglicht. Für jede Anwendung ist es entscheidend, die technischen Vorgaben detailliert zu verstehen, um das optimale Design anbieten zu können. Portescap hat einige Motortechnologien entwickelt, um für jede Anwendung eine optimale Lösung anbieten zu können.

Norbert Veignat

Portescap

www.portescap.com