

Stator

Bilder: BMW, Schaeffler, ale

Partner: © A&W Verlag AG / SVBA-ASETA-ASITA / AGVS/UPSA / Andreas Lerch

Sponsoren: **Derendinger** **TECHNOMAG**

Die Statoren der verschiedenen Drehstrommotoren sind alle ähnlich aufgebaut. Im Unterschied zu den mechanisch kommutierten Gleichstrommotoren, bei welchen das Wechselfeld (= wechselndes Magnetfeld) durch den Kommutator immer im Rotor erzeugt wird, legen die elektrisch kommutierten DC-Motoren (Brushless-Motoren) und die AC-Motoren das Wechselfeld in den Stator, damit der (grosse) Strom nicht über Kohlebürsten vom stehenden Teil auf einen Rotor geleitet werden muss.

Aufgabe

Traktionsmotoren in E-Fahrzeuge sind Drehstrommotoren, deren Statoren die Aufgabe haben, den dreiphasigen Wechselstrom in ein magnetisches Drehfeld zu verwandeln und so den (ebenfalls magnetischen) Rotor mitzuziehen. Um die Magnetfelder zu verstärken, sind Eisenkerne notwendig, welche den Magnetismus sehr gut leiten und dadurch bündeln.

Aufbau

Im Grundaufbau werden bei den Elektromotoren Innenläufer (Bilder 1 und 3) und Aussenläufer (Bild 2) unterschieden. Die Aussenläufer werden häufig bei P2-Hybriden eingebaut.

Material

Statoren von Innenläufermaschinen sind Hohlzylinder. Sie bestehen aus Weicheisen (Elektroblech). Weicheisenkerne müssen ein elektrisch erzeugtes Magnetfeld sehr schnell aufnehmen, aber ebenso schnell wieder abgeben. Die Kennlinie in der Hystereseurve folgt bei einem theoretisch idealen Weicheisenkern der Neukurve x (vgl. «E-Maschinen», Magnetismus). Da dies nie gelingen wird, muss in jedem Magnetisierungs- und Entmagnetisierungsverlauf mit Ummagnetisierungsverlusten gerechnet werden, welche als Wärmeenergie anfallen. Der Weicheisenkern elektrischer Maschinen besteht meist aus Elektroblech. Dies ist eine Stahllegierung mit 2 - 4 % Silizium und etwas Aluminium. Das Material hat eine Dichte von 7.87 kg/dm^3 , einen spezifischen elektrischen Widerstand von $0.1 (\Omega \cdot \text{mm}^2)/\text{m}$, eine Wärmeleitfähigkeit von $80 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ und eine Sättigungspolarisation von bis zu 2.2 T (Tesla).

Wirbelströme

Aufgrund der Wirbelstromverluste besteht der Stator aus einem Stapel von gegeneinander elektrisch isolierten Elektroblechen. Wirbelstrom ist eine spezielle Form der Induktion (vgl. «E-Maschinen», Magnetische Kraft): Wenn sich ein elektrischer Leiter in einem Magnetfeld bewegt, wird in ihm eine Spannung induziert. Da auch der Weicheisenkern einen elektrischen Leiter darstellt, wird auch in diesem Spannung induziert. Durch die Spannung und den elektrischen Widerstand des Weicheisens fliesst ein Strom innerhalb des Kerns und verwandelt seine Energie in (Verlust-) Wärme. Um die Wirbelstromverluste zu verkleinern, werden Weicheisenkerne aus aufeinander gestapelten und gegeneinander isolierten dünnen Blechen gebildet. Bei Traktionsmotoren hat sich eine Blechstärke von 0.35 mm bewährt.

Form

Die Elektroblechstapel bilden die Grundform des Stators und die vorbereiteten Nuten und Lücken werden mit Kupferleitungen gefüllt, welche beim Bestromen das Statorblech in geeigneter Weise magnetisieren.

Wicklungsarten

Die verteilte Wicklung oder Wellenwicklung (Bild 1) zeigt ihre Vorteile mit einer hohen Drehmomentdichte bei geringen Schwingungen und einem guten Wärmefluss aus der bestromten Wicklung in das Blechpaket des Stators hin zu den Kühlluft- oder Kühlflüssigkeitskanälen. Da die drei Wicklungen durch verschiedene Nuten am Umfang des Stators geführt werden, müssen sie am Ende des Hohlzylinders, welcher den Stator bildet, um die anderen Wicklungen zur nächsten Nut geführt werden. Das muss selbstverständlich isoliert geschehen. So befinden sich an diesen Gehäuseenden (Wickelköpfe) sehr viele stromführende Leitungen und die Wickelköpfe werden gross und dementsprechend können sich an diesen Stellen auch Hotspots bilden, welche für die Isolation und damit für die Funktion der E-Maschine gefährlich sind. Es werden jedoch bei den Wellenwicklungen neue Flechtverfahren entwickelt, welche die Wickelköpfe nicht allzu gross werden lassen und die Eigenschaften verbessern.

E-Maschinen

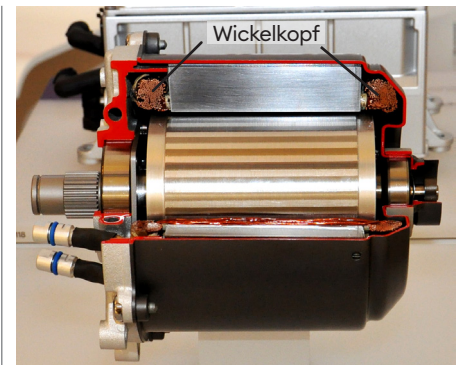


Bild 1: Die Wellenwicklungen werden konventionell mit im Querschnitt runden Kupferdrähten in vielen Windungen aufgebaut.



Bild 2: Anstelle von Drähten mit rundem Querschnitt, werden bei der Hair-Pin-Wicklung vorgefertigte Kupferteile mit rechteckförmigem Querschnitt eingefügt.

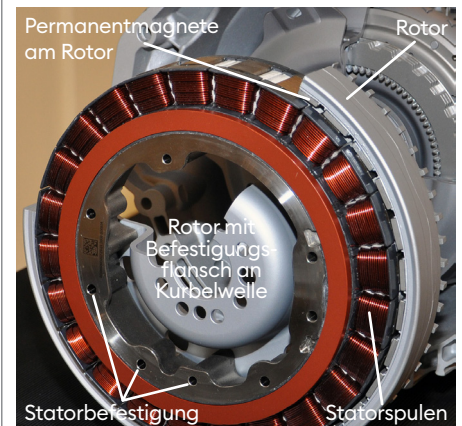


Bild 3: Bei der Einzelzahnwicklung werden zur Erzeugung des Drehfeldes viele einzelne Spulen am Umfang verteilt.

Bei der Hair-Pin-Wicklung (Bild 2) oder I-Pin-Wicklung werden die Wickelköpfe noch einmal verkleinert. Dabei werden U-förmige oder eben haarnadelförmige Kupferstäbe mit rechteckigem Querschnitt in die Nuten eingesetzt, an den Enden des Blechpaketes umgeformt und verschweisst. Die vielen Schweisspunkte stellen die Fertigungstechnik jedoch vor Herausforderungen.

Bei der konzentrierten- oder Einzelzahnwicklung (Bild 3) werden am Statorumfang einzelne Spulen im Eisenpaket integriert. Die Spulenzahl lässt sich bei dreiphasigem Wechselstrom mit der Zahl drei dividieren. Vorteile dieser Bauart werden vor allem bei Maschinen erreicht, welche sehr kurz bauen müssen, also beispielsweise bei Maschinen, welche zwischen Motor und Getriebe eingebaut werden (P2-Hybrid).

	konzentrierte Wicklung		verteilte Wicklung	
	Einzelzahn	Hair-Pin-Wicklung	Wellenwicklung	
Kupferfüllfaktor	+	++	+	
Materialausnutzung	0	+	+	
Frequenzabhängige Verluste	+	-	+	
Statorentwärmung	-	+	++	
Grösse der Wickelköpfe	++	0	0	
Anzahl Schweisspunkte	+	--	++	
Flexibilität in der Produktion	++	-	0	