



elektro auto mobil

E-Pick-ups im Anmarsch

Die Ikone des American
Way of Drive absolut
emissionsfrei



Ausgabe 01/2019 | Februar/März 2019

www ID. Neo

Elektrisch für alle

► Wann? ► Wie weit? ► Was wird er kosten?

Kia e-Niro & Kia e-Soul

Erster Fahrbericht

Zwei Kompakt-SUV,
die überzeugen



Jaguar I-Pace im 14-Tage-Test

Wie bewährt sich
der britische Luxus-
stromer im Alltag?



800-Volt-Ladetechnik. Nie mehr Ladeweile!

Volle 200 km Reichweite in nur
10 Minuten nachladen.

Komplettübersicht aller neuen Plug-in-Hybride 2019

So behalten Sie in der Flut der neuen
Modelle die Übersicht.

Die Velomobile kommen

Pedelec? Auto? Oder ein
bisschen von beiden?



Mehr Leistung pro Kilo

Von Reinhard Huschke | Fotos: Hersteller

Magnetfreie Rotoren, effizientere Kühlung, engere Wicklungen – mit unterschiedlichen technischen Ansätzen versuchen die Motorenentwickler, die Leistungsdichte der elektrischen Maschinen weiter zu erhöhen. Manche Konzepte sind kurz vor der Praxis, bei anderen braucht es noch einen längeren Atem.

Dafür dass die in der (heutigen) Elektromobilität eingesetzten Drehstrommotoren noch eine relativ junge Technologie sind, gibt es inzwischen schon eine erstaunliche Vielfalt an Motortypen und -untertypen (vgl. elektroautomobil 05/17, S. 82 ff.), wobei jede Variante ihre spezifischen Vor- und Nachteile hat. „Ausentwickelt“ ist die E-Maschine aber noch lange nicht, wie die im Folgenden vorgestellten Konzepte zeigen.

Leicht und günstig, aber laut: die geschaltete Reluktanzmaschine

In Foren und sozialen Medien machte die vermeintliche Sensation bereits die Runde: Das Tesla Model 3 hätte nicht die bei Tesla übliche Asynchronmaschine (ASM), sondern einen neuartigen Reluktanzmotor. Damit sei Tesla der Konkurrenz wieder mal um Jahre voraus. Auch wenn sich das Ganze schnell als Fake News entpuppte – das Model 3 hat einen bewährten permanenten Synchronmotor mit innenliegenden Magneten (IPM), wie er auch im BMW i3 eingebaut ist –, wird die sogenannte „geschaltete Reluktanzmaschine“ (Switched Reluctance Machine, SRM) tatsächlich als heiße Kandidatin für die Elektromobilität gehandelt. Bei der SRM wird das Drehmoment nicht wie bei allen anderen E-Motor-Typen (überwiegend) mittels elektromagnetischer Induktion, also der Lorentzkraft, erzeugt, sondern durch die sogenannte „Reluktanzkraft“. Diese versucht, den magnetischen Widerstand zu minimieren, indem sie die Pole von Stator und Rotor so zueinander ausrichtet, dass die magnetische Flussdichte maximal wird.

Reluktanzmotoren sind eigentlich nichts Neues – das Prinzip ist seit 1839 bekannt und damit noch um einige Jahrzehnte älter als das der Induktionsmaschine. In Nischenanwendungen in der Industrie sind Reluktanzmaschinen auch längst im Einsatz, außerdem in Haushaltsgeräten wie der bekannten Küchenmaschine „Thermomix“. Auch für die Elektromobilität wäre die potenziell kostengünstigere Bauweise, die ohne teure Seltenerd-Permanentmagnete auskommt, attraktiv. „Im Prinzip besteht der Rotor nur aus gestanztem bzw. gelasertem Blech, das auf eine Welle geschoben wird“, beschreibt Andreas Lohner, Professor am Institut für Automatisierungstechnik der Technischen Hochschule Köln, die Konstruktion. „Der Rotor erhält damit eine hohe mechanische Festigkeit, sodass sehr hohe Drehzahlen möglich sind.“ Wegen des Fehlens „bremsender“ Magnete im Rotor ist zudem der Leistungsabfall bei hohen Drehzahlen weniger ausgeprägt als bei permanent-erregten Motoren. Da die Leistung proportional zur Drehzahl steigt, könnte man eine SRM mit Getriebe somit deutlich kompakter und leichter bauen als andere E-Maschinen gleicher Leistung.

Warum konnte sich der Reluktanzmotor trotz so überzeugender Vorteile in der Elektromobilität noch nicht durchsetzen?

Laut Andras Lohner ist vor allem das NVH-Verhalten der SRM problematisch. NVH steht für „Noise, Vibration, Harshness“



Reluktanz im Rad: Am Institut für Automatisierungstechnik der TH Köln wurde ein Radnabenmotor mit integrierter Leistungselektronik auf der Basis einer geschalteten Reluktanzmaschine entwickelt. Der Motor soll demnächst in einem umgerüsteten Ford Focus Electric getestet werden. (Foto: TH Köln)

(Geräusch, Vibration, Rauigkeit). Will heißen: Das Ding ist laut. Die Geräuschentwicklung liegt zum einen am „blockförmigen“ Ein- und Ausschalten des Statorstroms sowie an einer radialen Komponente der Reluktanzkraft, die das Blechpaket des Rotors während der Drehbewegung rhythmisch komprimiert. Diese Effekte sind prinzipbedingt und lassen sich daher nicht eliminieren. „Man kann aber versuchen, sie über ein gezieltes Motordesign sowie eine geeignete Ansteuerung durch die Leistungselekt-



Kühlung von innen: In den Kupfer-Hohldrähten des Capcooltech-Motors fließt eine Wasser-Glykol-Mischung, die den Motor auf Temperatur hält.

Foto: Dynamic E Flow GmbH

ronik zu mindern“, erläutert Lohner. „Damit handelt man sich aber wiederum Nachteile bei Leistungsdichte und Wirkungsgrad ein.“ Die Leistungsdichte einer ASM hält Lohner trotzdem für erreichbar, die IPM bleibe aber wohl überlegen – aber wegen der seltenen Erden eben auch mit höheren Kostenrisiken behaftet.

Ob das geräuschvollere Auftreten des Reluktanzmotors wirklich so störend wäre, könne man außerdem in Frage stellen. „Elektroautos sollten eigentlich hörbar sein“, meint Andreas Lohner. Autos mit SRM müssten dann auch keinen Geräuschgenerator mehr an Bord haben.

Von kühl bis eisig: mehr Leistung durch neue Kühlkonzepte

Obwohl ein E-Motor nur wenige Prozent der zugeführten Energie in Wärme umwandelt, stellt diese dennoch einen leistungsbegrenzenden Faktor dar und muss möglichst effizient abgeführt werden. Üblich ist heute eine Außenkühlung des Stators mit einem Wasser-Glykol-Gemisch, aber auch von innen gekühlte Stator- und Rotoren sind, vor allem bei höheren Leistungen, üblich. Um höhere Drehzahlen und Leistungsdichten zu erreichen, können beispielsweise die Wicklungsköpfe des Stators mit kühlendem Öl besprüht oder Wasserkanäle durch Statorwicklungen und Rotorwellen geführt werden.

Ein noch konsequenteres Prinzip der Innenkühlung hat das bayerische Start-up Dynamic E Flow entwickelt. Anstelle der üblichen Kupfer-Runddrähte, mit denen die Statorspulen gewickelt werden, setzt man Hohldrähte ein, die von Kühlmitteln durchströmt werden. „Capillaries Cooling Technology“, oder kurz „Capcooltech“, nennt sich das System, das die Verlustwärme wesentlich schneller aus dem Motor

Wir führen die Hitze direkt aus der Wicklung ab. Die Leistungsdichte erhöhen wir dadurch um den Faktor 3.

Michael Anton Naderer
Geschäftsführer Capcooltech

Dank Direktkühlung der Spulen schafft dieser Motor von Dynamic E Flow 80 kW Dauerleistung bei nur 30 kg Eigengewicht. Dieses Jahr soll er noch zur Verfügung stehen.



abtransportieren soll als die üblichen Kühlkonzepte. Geschäftsführer Michael Anton Naderer sieht in Capcooltech nicht weniger als eine „neue Grundlagentechnik“ für Elektromotoren: „Im Unterschied zu einer Außenkühlung des Mantels führen wir die Hitze direkt aus der Wicklung ab, also dort, wo sie entsteht. Damit können wir die Leistungsdichte um einen Faktor drei erhöhen.“ Dann müsse die Motorleistung auch nicht mehr wegen Überhitzung abgeregelt werden: „Wir können praktisch die Spitzen- zur Dauerleistung machen, indem wir die Temperatur im Motor instantan steuern und stabilisieren.“ Das bekannte Schwächen von E-Fahrzeugen nach mehreren Überholvorgängen auf der Autobahn oder auf einer längeren Bergfahrt könnte damit der Vergangenheit angehören.

Je ein Muster für Hochspannung (450 V, 80 kW) und Niederspannung (48 V, 20 kW) sollen in der ersten Jahreshälfte verfügbar sein. Diese sind laut Naderer für Nutzfahrzeuge wie Baumaschinen bzw. Motorräder und Boote geeignet. Ein Einsatz in elektrischen Pkw sei ebenfalls geplant, zuerst müsse jedoch noch der einschlägige Validierungs- und Qualifizierungsprozess durchlaufen werden.

Noch einen Schritt weiter in puncto Kühlung geht man bei dem in Unterfranken beheimateten Motorenhersteller Oswald. Dort wird gegenwärtig an einem supraleitenden Elektroantrieb gearbeitet. Dessen Stator wird durch flüssigen Wasserstoff auf unter minus 250 Grad Celsius (23 Kelvin) heruntergekühlt. Bei dieser Temperatur fließt der Strom in bestimmten Materialien ohne elektrischen Widerstand. Supraleitende Drähte können deshalb im Vergleich zu Kupfer um ein Vielfaches höhere Ströme befördern, ohne heiß zu werden. Laut Projektleiter Thomas Reis geht es in dem von der EU geförderten Projekt namens ASuMED (Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator) jedoch vorrangig um künftige Anwendungen im Luftverkehr, für den Elektroantriebe mit ausreichend hohen Leistungsdichten noch nicht in Sicht sind.

Einen Einsatz des aufwändigen Kühlsystems in Elektroautos kann sich Reis dagegen nicht vorstellen: „Pkw stehen 90 Prozent der Zeit ungenutzt herum. Der Aufwand, um die Kühlung die ganze Zeit lang aufrecht zu erhalten, wäre enorm.“ Allenfalls in Nutzfahrzeugen, die wie ein Flugzeug im Dauerbetrieb sind, sei ein Einsatz des supraleitenden Antriebs denkbar. Wobei es in Flugzeugantrieben noch einen weiteren Vorteil gibt: Der Wasserstoff kann dort sowohl zur Kühlung als auch gleich als Brennstoff genutzt werden, was prinzipiell aber auch in irdischen Wasserstofffahrzeugen möglich wäre. Einen möglichen Serieneinsatz eines supraleitenden Elektroantriebs, ob in der Luft oder auf der Erde, sieht Thomas Reis dennoch nicht vor dem Jahr 2040 oder 2050.

Sechseckig, statt rund: Motor mit Formlitzwicklungen

Aber auch aus der klassischen Kupferwicklung lassen sich noch Leistungsreserven herausholen – davon ist man jedenfalls beim Schweizer Entwicklungsdienstleister Brusa überzeugt. Die vom Schweizerischen Bundesamt für Energie (BFE) geförderte Entwicklung nennt sich „Formlitzentechnik“ und greift eine altbekannte Herausforderung beim Design von Elektromotoren auf, nämlich die optimale Spulenwickeltechnik. Je kompakter die Statorspule gewickelt – oder, im Fachjargon, je höher ihr Füllfaktor – ist, desto stärker ist das erzeugte Magnetfeld und desto höher die erreichbare Dauerleistung eines Motors.

Im Brusa-Testmotor kommen aus mehreren verdrehten Litzen bestehende Kupferleiter, ähnlich den aus der Kraftwerktechnik bekannten Robelstäben, zum Einsatz. Vor dem Aufbringen auf den Stator werden aus den einzelnen Leitern Stränge geformt und diese anschließend mittels einer Walze zusammengepresst. Die anfangs runden Leiter nehmen dadurch einen sechseckigen Querschnitt an. Vorteil: Sechsecke lassen sich – zumindest im Prinzip – lückenlos stapeln, so wie man das von der Bienenwabe her kennt. Auf diese Weise entstehen sehr kompakte Stränge, welche die Nuten des Stators besonders gut ausfüllen. Beim Prototypen wurde so ein Füllfaktor von 56 Prozent erreicht, berichtet Brusa-Entwicklungsingenieur Daniel Oeschger. „Bei der klassischen Einzugwicklung sind es nur 40 bis 45 Prozent. Und selbst 45 Prozent sind nur per Wicklung von Hand zu schaffen.“ Die Brusa-Wicklung lässt sich dagegen maschinell herstellen.

Ein positiver Nebeneffekt der engen Kupferpackung ist die gute Wärmeabfuhr, die ebenfalls Vorteile bei hohen Drehzahlen bringt. „Kupfer leitet 400 mal besser als Kunststoff oder Kunstharz, woraus die Isolierungen und Zwischenräume bestehen“, erklärt Oeschger. Liegen die Leiter dicht an dicht, fließt die Wärme schneller ab. Deshalb sei man beim aktuellen

Beim Verdichten der runden Leiter formen sich automatisch Sechsecke. Die Form entsteht durch Selbstorganisation. Die Natur selbst bringt diese Symmetrie hervor.

Dicht wie Bienenwaben: Mittels Formlitzentechnik lassen sich sehr kompakte Statorwicklungen maschinell herstellen. Die dichte Packung der Litzen erhöht die Dauerleistung des Motors und verbessert den Wärmetransport.
(Fotos: BRUSA Elektronik AG)

Prototyp – einem Synchronmotor vom IPM-Typ – mit einer klassischen Mantelkühlung und durch magnetische Optimierungen auch ohne Rotorkühlung ausgekommen. Prinzipiell eigne sich die Formlitzwicklung aber für alle Arten von Elektromotoren.

Mit seiner neuen Wickeltechnik steht Brusa im Wettbewerb zu einer weiteren Methode, mit der man ebenfalls besonders kompakte Wicklungen herstellen kann, der sogenannten „Hairpin-Einsteckwicklung“. Diese wird bereits heute in Serienmotoren – beispielsweise im Chevrolet Bolt bzw. Opel Ampera – eingesetzt. Hairpins (= Haarnadeln) sind Kupferdrähte mit größeren Durchmessern und rechteckigem Querschnitt, die in einem speziellen Biegeverfahren zu einer Wicklung zusammengesetzt werden. Damit lassen sich ebenfalls hohe Füllfaktoren erzeugen, allerdings sieht Oeschger die Formlitzentechnik im Vorteil: „Damit haben wir weniger Skineneffektverluste bei höheren Drehzahlen“. Der elektromagnetische Skineneffekt macht sich vor allem in Leitern größeren Querschnitts bemerkbar; er sorgt dafür, dass der elektrische Widerstand bei steigender Wechselstromfrequenz zunimmt, und begrenzt so Motorleistung und Wirkungsgrad bei hohen Drehzahlen.

Mit der Formlitzentechnik konnten die Brusa-Ingenieure dagegen eine – im Vergleich zu konventionell gewickelten Motoren – rund 20 Prozent höhere Dauerleistungsdichte über den gesamten Drehzahlbereich erreichen. In einer Partnerschaft mit einem großen Automobilzulieferer soll jetzt die Industrialisierung des Konzepts vorangetrieben werden. „Unser Partner war hellauf begeistert, er findet unser Konzept revolutionär“, freut sich Daniel Oeschger. Eine entsprechende Nachfrage von Seiten der Automobilhersteller vorausgesetzt, könne der Formlitzmotor schon in zwei Jahren in Serie gehen. ■

