

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Schlussbericht

Verbundnamen: Schlüsseltechnologien für die nächste Generation der Elektrofahrzeuge

Akronym: „*e-generation*“

Teilvorhaben: „***Evaluierung effizienter E-Maschinen und Ansteuerverfahren***“

GEFÖRDERT VOM

FKZ 16N11866



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Themenfeld „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)“

Kurzbeschreibung des Teilvorhabens:

- Antriebsstrang: Baukasten für elektrische Antriebsstränge mit skalierbaren Maschinen
- Evaluierung von Ansteuerverfahren und E-Maschinen
- Erstellung von Simulationsmodellen für die Maschinen und Leistungselektronik
- Einflüsse auf die Fahrsicherheit und die Zuverlässigkeit

Projektleitung / Koordination

Prof. Dr. Ing. M. Henke
TU Braunschweig
Institut für Elektrische Maschinen,
Antriebe und Bahnen,
Hans Sommer Str. 66
38106 Braunschweig
0531/ 391-3914
markus.henke@tu-bs.de

Verfasser

Dipl.-Ing. A.-L. Menn
Prof. Dr.-Ing. W.-R. Canders
Prof. Dr.-Ing. M. Henke

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Inhaltsverzeichnis

1	KURZFASSUNG	5
2	WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE ERGEBNISSE	6
2.1	AP 2.3.3 – MASCHINENAUSLEGUNG (1. UND 2. PROJEKTJAHR, 20 PM)	6
2.2	AP 2.3.1– AUSWAHL MASCHINENKONZEPTE (2. PROJEKTJAHR, 1,5 PM)	30
2.3	AP 2.3.2 – BEWERTUNG SENSOR-UND KÜHLKONZEPTE (1. PROJEKTJAHR, 1,5 PM)	30
2.4	AP 2.2.3 – ANTRIEBSBAUKASTEN (3. PROJEKTJAHR, 3 PM)	31
2.5	AP 2.3.4 – KONSTRUKTION (MECHANISCH) (2. UND 3. PROJEKTJAHR, 1,5 PM)	34
2.6	AP 2.3.6 – TEST FUNKTIONSMUSTER AUF PRÜFSTAND (1PM)	36
2.7	AP 2.4.1 – BEWERTUNG SCHALTUNGSKONZEPTE FÜR LE-SYSTEME (1.PROJEKTJAHR, 1,5 PM)	36
2.8	AP 2.4.2 – AUSWAHL LEISTUNGSELEKTRONIKKONZEPT (1.PROJEKTJAHR, 1 PM)	36
2.9	AP 2.4.5 – SOFTWAREINHALTE (2. UND 3. PROJEKTJAHR, 7,5 PM)	37
2.10	AP 2.7.1 – SICHERHEIT, VERFÜGBARKEIT UND ZUVERLÄSSIGKEIT IM ANTRIEBSSTRANG (2. UND 3. PROJEKTJAHR, 5 PM)	38
2.11	AP 2.7.2 – GERÄUSCH, VIBRATION UND KOMFORT, NVH (1PM)	44
3	LITERATURVERZEICHNIS	45

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Daten als Grundlage für alle auszulegenden Maschinen	7
Tabelle 2: Ergebnisse der Vorauslegung	11
Tabelle 3: Übersicht über ausgelegte ASM	26
Tabelle 4: Vergleich FESM und ASM	30
Tabelle 5: Ergebnisse der Vorauslegung - Baukasten.....	32
Tabelle 6: Übersicht Baukasten	34
Tabelle 7: Bewertungsübersicht Leistungselektronik.....	36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht Entwurfsablauf.....	7
Abbildung 2: Drehzahl-Drehmoment- und gewählte Spannungsverläufe für den Fahrzeugantrieb ASM 1.....	8
Abbildung 3: Stromortskurve im Auslegungspunkt und für Punkt max. Drehzahl (15000 1/min) ASM 1	13
Abbildung 4: Wirkungsgradkennfeld ASM 1	14
Abbildung 5: Drehmomentergebnis aus FEM Simulation	16
Abbildung 6: Flussdichteverteilung ASM 1	17
Abbildung 8: Wirkungsgradkennfeld ASM 2	19
Abbildung 9: Drehzahl-Drehmoment- und gewählte Spannungsverläufe für den Fahrzeugantrieb ASM 3.....	21

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Abbildung 10: Stromortskurve im Auslegungspunkt und für Punkt max. Drehzahl (15000 1/min) ASM 3	22
Abbildung 11: Sättigungsabhängige Hauptinduktivität der ASM 3	23
Abbildung 12: Wirkungsgradkennfeld ASM 3	24
Abbildung 13: Wirkungsgradkennfeld ASM 4	25
Abbildung 14: Abmessungen FESM.....	28
Abbildung 15: Wirkungsgradkennfelder Baukasten	33
Abbildung 16: Blechschnitte ASM 3 und ASM 4	35
Abbildung 17: Schematischer Aufbau des Asynchronmaschinenprüfstands.....	37
Abbildung 18: Wirkungsgradkennfelder; links wirkungsgradoptimale Regelung, rechts FOR	38
Abbildung 19: Maschinendrehmomente im NEFZ	40
Abbildung 20: Maschinendrehzahlen im NEFZ	41
Abbildung 21: Nuttemperatur für ASM 1	42
Abbildung 22: Festigkeitsuntersuchung FSM	43

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

1 Kurzfassung

Im Rahmen der Arbeiten wurde eine Systematik entwickelt, die eine Grundlage zur Findung eines "Baukastensystems" zur Gestaltung von modularen Fahrzeugantrieben bilden kann. Basierend auf Geometriedaten der Projektpartner wurden detaillierte Entwürfe von Asynchronmaschinen vorgenommen, um die elektrischen Maschinen hinsichtlich ihrer Performance und Effizienz vergleichen zu können. Resultat der Auslegungen sind zum einen Blechschnittgeometrien anhand derer eine Realisierung der Maschinen in Hardware möglich wäre, und zum anderen Wirkungsgradkennfelder, die einen fairen Vergleich der Maschinen untereinander ermöglichen.

In Summe wurden vier Varianten der Asynchronmaschine und eine fremderregte Synchronmaschine ausgelegt. Da die fahrzeugspezifischen Vorgaben einen Drehzahlbereich um 15.000 1/min bedeuten, wurden neben elektromagnetischen Untersuchungen auch Abschätzungen zum Festigkeitsverhalten der eingesetzten Rotoren vorgenommen.

Bemerkenswert ist die Auslegung einer im Durchmesser freier angesetzten vierten Asynchronmaschine, die im Nennpunkt einen Wirkungsgrad von 96 % aufweist. Um dieses Verhalten darstellen zu können, sind wirkungsgradoptimierende Regelverfahren genutzt worden, die ebenfalls Thema dieses Teilprojektes waren. Die fremderregte Synchronmaschine übertrifft diesen Wirkungsgrad noch auf 97,7 % bei gleichem vergrößertem Durchmesser. Durch diese Analysen konnte die angestrebte Baukastensystematik durch ein Maschinenkonzept anderer Wirkungsweise ergänzt werden. Die Auswertung einer Entwurfsserie zeigte, dass sich bereits mit einer Vergrößerung des Bohrungsdurchmessers um 20 % eine signifikante Verbesserung des Wirkungsgrades und des Leistungsfaktors bei leicht erhöhter aktiver Masse erreichen lässt.

Die leistungselektronische Ansteuerung der Maschinenvarianten wurde im Rahmen von Simulationen untersucht und floss in die Maschinenauslegung ein. Beispielsweise kann der $\cos \varphi$ der FESM durch gezielte Erregerungsvorgabe auf 1 geregelt werden. Dadurch bietet dieses Konzept Vorteile zur ASM bzgl. der Baugröße der notwendigen leistungselektronischen Ansteuerung.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Im Folgenden werden alle Ergebnisse der Arbeiten im Rahmen des Projekts am Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen der TU Braunschweig (IMAB) dargestellt.

2.1 AP 2.3.3 – Maschinenauslegung (1. und 2. Projektjahr, 20 PM)

Die Maschinenauslegung startet mit einem ersten Entwurf einer Asynchronmaschine (ASM 1) basierend auf dem Lastenheft, welches von der Robert Bosch AG beigestellt wurde. Die im weiteren Verlauf des Projektes entworfenen Maschinen ASM 2 bis ASM 4 sind Weiterentwicklungen dieser Grundmaschine.

Ausgehend von dem unten detailliert beschriebenen Entwurf einer Asynchronmaschine (ASM 1) [3] wurden zwei weitere Asynchronmaschinen konzipiert [4] [5]. Diese unterscheiden sich in den geometrischen Abmessungen und in ihrem Betriebsverhalten. Bedingt durch mehrfache Änderungen im Getriebeaufbau und bei den Packageabmessungen mussten die Maschinenentwürfe angepasst werden. Daraus resultierend existieren drei verschiedene Asynchronmaschinen. Zusätzlich wurde eine wirkungsgradoptimale Asynchronmaschine (ASM 4) entworfen. Diese zeichnet sich durch einen erhöhten Außendurchmesser bei reduzierter axialer Länge aus. Es konnte gezeigt werden, dass mit einer Freigabe des Außendurchmessers der Wirkungsgrad verbessert werden kann. Wie aus Tabelle 3 entnommen werden kann, ist dies auch machbar. Für alle ausgelegten Maschinen wurden Blechschnitte zur Vorbereitung einer möglichen Konstruktion erstellt. Basierend auf den Ergebnissen konnten Wirkungsgradkennfelder für den motorischen und den generatorischen Bereich erstellt werden. Ebenso sind die Ergebnisse Grundlage für die Analysen in AP 2.3.1 und AP 2.7.1. Abschließend wurden die Ergebnisse mit der FEM-Simulationsumgebung MAXWELL verifiziert.

Die Informationen aus dem Lastenheft und den vorliegenden Batteriedaten sind in der Tabelle 1 zusammengefasst und gelten als Grundlage für alle auszulegenden Maschinen im Projekt. Basierend auf diesen Informationen wird eine Vorauslegung, im Rahmen der Auslegung von ASM 1, durchgeführt, welche Ausgangsdaten (Tabelle 2) für alle weiteren folgenden detaillierten Entwürfe von ASM 1 bis ASM 4 sowie für die fremderregte Synchronmaschine generiert.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

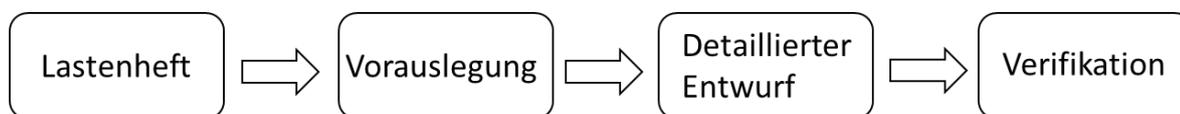


Abbildung 1: Übersicht Entwurfsablauf

Alle wichtigen Ergebnisse der Auslegungen der Maschinen ASM 1 bis ASM 4 sind am Ende des Kapitels in einer Übersicht für alle entworfenen Maschinen zu sehen und werden im Folgenden detailliert beschrieben.

Parameter	Wert
Dauerleistung im Feldschwäcbereich	$P_D = 39 \text{ kW @ } U_s = 131 \text{ V}$
Max. Leistung	$P_{n_{\max}} = 90 \text{ kW @ } U_s = 142 \text{ V}$
Dauer-Drehmoment bei n_{\max}	$M_{dnx} = 25 \text{ Nm}$
Überlast Drehmoment bei n_{\max}	$M_{n_{\max}} = 57 \text{ Nm}$
Eckpunkt	$n_e = 5000 \text{ 1/min}$
Moment im Ankerstellbereich	$M_e = 74 \text{ Nm}$
Überlast Moment im Ankerstellbereich	$M_{\max} = 172 \text{ Nm}$
Strangspannung bei voller Batterie	$U_{s_{\max}} = 142 \text{ V}$
Strangspannung im Nennpunkt	$U_{sn} = 131 \text{ V}$
Strangspannung bei 90% entladener Batterie	$U_s = 131 \text{ V}$
Max. Strom bei Überlast	$< 400 \text{ A}$ (Stromtragfähigkeit des WR)
Kühlmitteltemperatur	70°C ,

Tabelle 1: Daten als Grundlage für alle auszulegenden Maschinen

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Besonders der Durchmesser der Maschine ist ein sehr wichtiger Parameter, da mit diesem das Drehmoment bei konstanter Ausnutzung quadratisch ansteigt.

2.1.1 Auslegung ASM 1

Aus den Angaben der Tabelle 1 kann auf das Drehzahl-Drehmoment-Diagramm geschlossen und die Spannungsverläufe definiert werden, die in Abbildung 2 zusammengestellt sind.

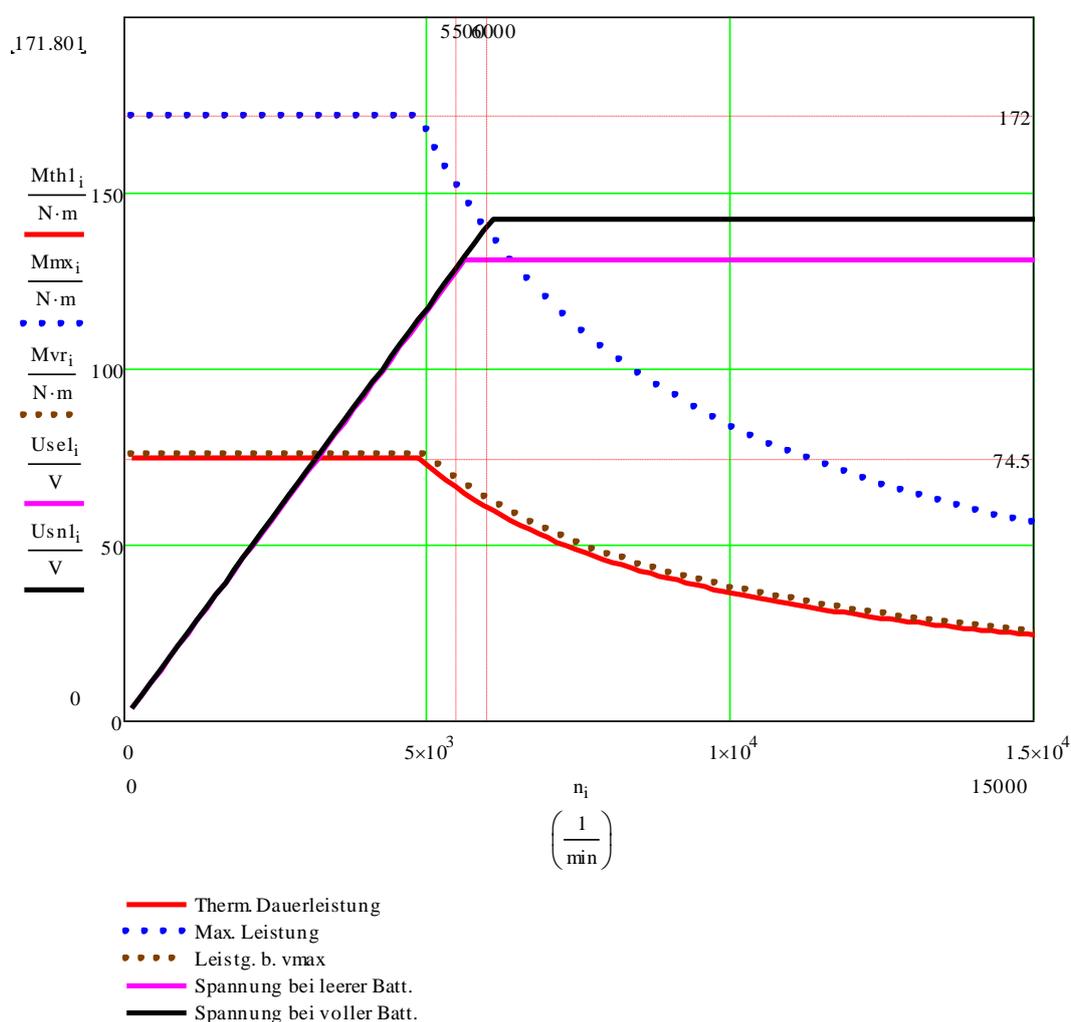


Abbildung 2: Drehzahl-Drehmoment- und gewählte Spannungsverläufe für den Fahrzeugantrieb ASM 1

In Abbildung 2 sind die Lastfälle „Thermische Beharrung (39 kW, ca. 1h Betrieb)“ und „Überlast“ mit 90 kW erfasst.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Für die Auslegung hinsichtlich des Flusses gibt es zwei denkbare Ansätze:

a) Der Fluss variiert mit der Spannungslage der Batterie. Dies bedeutet, dass der Eisenkreis für den Fluss bei maximaler Batteriespannung ausgelegt werden muss. Bei mittlerem SOC und bei entladener Batterie ist er überdimensioniert. Bei der hier vorliegenden Spezifikation nicht empfehlenswert.

b) Der Fluss ist stets konstant, jedoch setzt nun die Feldschwächung bei unterschiedlichen Drehzahlen ein und der Feldschwächbereich ist dann vom SOC abhängig, wobei zu überprüfen ist, ob das Drehmoment bei Maximaldrehzahl noch erbracht werden kann.

Die Auslegungen wurden für den Fall b) vorgenommen, da sich hier Gewichtsvorteile für die Maschine ergeben. Mit Rücksicht auf den Feldschwächbereich wird deshalb die Spannungsgrenze erst zwischen 5500 und 6000 1/min erreicht. Die Überlastspezifikation im Drehzahlbereich 0 bis 5000 1/min wird nur bei voller Batterie erreicht, bei den anderen Ladezuständen steht dagegen ein reduziertes Moment zur Verfügung. Die Überlastbarkeit im Feldschwächbereich nimmt wegen des fallenden Kippmomentes ab und verschwindet nahezu bei voller Drehzahl (15000 1/min, $M_k = 29$ Nm). Da das Fahrzeug hier Maximalgeschwindigkeit fährt, ist sie normalerweise auch nicht erforderlich.

Das Bremsmoment im Kurzschluss verschwindet in wenigen 100stel Sekunden, so dass vorerst vorbehaltlich weiterer Untersuchungen von einer gesicherten Fahrstabilität bei Fehlern im Antrieb ausgegangen werden kann. Jedoch weist die Maschine durch die Läuferverluste und die quadratische Abhängigkeit des Kippmomentes von der Spannung auch Nachteile hinsichtlich Wirkungsgrad (unterer Drehzahlbereich) und Überlastbarkeit auf.

Der Entwurf ist sowohl im Innen- als auch im Außendurchmesser und der Länge begrenzt. Der Feldschwächbereich ist mit 1:3 für eine ASM hoch, aber noch beherrschbar. Die wahre Eckdrehzahl wird jedoch auf 6000 1/min bei Nennspannung gelegt, so dass eine echte Feldschwächung 1:2,5 bis 1: 2,73 erforderlich ist. Dies führt zu einem höheren Maschinenstrom und einer gewissen Überdimensionierung des Wechselrichters. Solange der max. zulässige Strom von 400 A nicht überschritten wird, ist dies jedoch unkritisch. Bei entladener Batterie ist von einem höheren Strombedarf auszugehen, der bei der Auslegung des Wechselrichters zu berücksichtigen ist.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Mit Rücksicht auf die Läuferverluste (Innendurchmesser) und den Wirkungsgrad wäre eine Käfigwicklung aus Kupfer wünschenswert, zumal die Kupfer-Druckgusstechnologie inzwischen bereits als Stand der Technik angesehen werden kann. Mit einem voraussichtlichen Rotordurchmesser von 110 mm würde sich eine Rotorumfangsgeschwindigkeit bei 15000 1/min von 86,4 m/sec ergeben, was für eine Rotorkonstruktion mit eingebetteten Magneten bereits zu hoch ist. Asynchronmaschinen mit Kupfer- oder Aluminiumkäfig sind hier erfahrungsgemäß noch nicht gefährdet. Die Fliehkraftbeanspruchung des Rotors und vor allem der Kurzschlussringe muss jedoch separat überprüft werden.

Generell sollte der Rotorfestigkeit besondere Beachtung geschenkt werden (Aufgabe für den Projektpartner Fraunhofer LBF). Die Dauerfestigkeit von Eisen-Siliziumblechen beträgt bei Zug-Druck Wechselbeanspruchung ($R = -1$) nur ca. 40% des statischen Wertes, so dass auch von einer deutlich reduzierten Festigkeit bei schwelender Belastung ($R=0$) ausgegangen werden muss. Üblicherweise wird im Automobilbereich mit Lastspielzahlen $< 10^6$ gerechnet, so dass eine Dimensionierung auf Zeitfestigkeit erfolgen kann, was allerdings dann abgesicherte Werkstoffdaten erfordert.

Mit Rücksicht auf die Abmessungsrestriktionen wurde eine 6 polige Maschine gewählt, obwohl hier von einem erhöhten Magnetisierungsstrombedarf auszugehen ist. Bei der Wickelkopfausladung besteht ein gewisses Optimierungspotential, um mit Hilfe einer verflochtenen Wellenwicklung [6] sowohl Wickelkopfausladung als auch Nutzenfüllfaktor zu optimieren, was gleichzeitig zu einer besser überlastbaren und leichteren Maschine und einer kürzeren Gesamtbaulänge führt. Die Optimierung einer solchen Wicklung kann aber erst sinnvoll in einer Feinauslegung durchgeführt werden, wenn der Systemscheid zugunsten der ASM ausfallen sollte. Vorerst wurde mit einer Nutfüllung von $A_{Cu}/A_N = 45\%$ und einem zum Außendurchmesser hochgezogenem Wickelkopf gerechnet, was bereits eine sorgfältige Handwicklung voraussetzt. Diese Vorüberlegungen für den Grobentwurf der Maschine führen zu Ausgangsdaten für den detaillierten Entwurf, welche in Tabelle 2 aufgelistet sind.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Parameter	Wert
Bohrungsdurchmesser	110 mm
Polpaarzaahl	3
Polteilung	57,6 mm
Wickelkopfausladung	ca. 24 mm
Eisenlänge netto bei k_{Fe}	$l_{Fe} = 174$ mm
Tatsächliche Eckdrehzahl	$n_e = 6000$ 1/min
Frequenz	$f_e = 250$ Hz bei 6000 1/min
Max Frequenz	$f_{max} = 750$ Hz
Max. Kraftdichte bei Überlast	$\tau_{wmax} = ca. 60..70$ kN/m ²
Blech	M 250-35

Tabelle 2: Ergebnisse der Vorauslegung

Entwurfsergebnisse

Die Entwurfsrechnungen wurden mit dem institutseigenen analytischen Entwurfsprogramm ESASM (H. Eckhardt, TU Braunschweig) durchgeführt. Das Programm gestattet einen schnellen Entwurf der ASM auf Basis der Grundwellentheorie, Sättigung und Stromverdrängung werden berücksichtigt. Insgesamt wurden 40 Varianten durchgerechnet. Sie lassen sich nach mehreren Iterationen zu folgendem Ergebnis verdichten:

Mit dem 6-poligen Ansatz können die Abmessungsrestriktionen gerade noch eingehalten werden, jedoch ist die Maschine bereits relativ hoch gesättigt, was sich an dem hohen Magnetisierungsstrombedarf ablesen lässt. Eine Anpassung der Statorlänge über die Windungszahl kann wegen der vergleichsweise hohen Frequenz nur in relativ groben Stufen erfolgen, da die Windungszahl wegen der niedrigen Spannung und der hohen Frequenz ein relativ grobes Raster vorgibt. Der

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Wirkungsgrad im Nennbetrieb ist mit $\eta = 0,94$ (Grundwellenbetrachtung) noch gut, er geht bei Überlast jedoch bereits auf 91% ohne parasitäre Zusatzverluste zurück. Bei niedriger Drehzahl (1000 1/min) und hohen Momenten liegt der Wirkungsgrad bei 61%. Jedoch konnte gezeigt werden, dass sich dieser trotz gesättigtem Eisenkreis durch Anhebung der Spannung noch auf 70% verbessern lässt. Als kritisch muss der Strombedarf eingeschätzt werden, der im Auslegungspunkt mit 241 A zwar innerhalb der Wechselrichtergrenze von 400 A liegt, bei Überlast diese aber mit 369 A nahezu erreicht. Für die Wechselrichterauslegung ist der Betriebspunkt „Maximales Moment bei entladener Batterie (SOC 10%)“ entscheidend, so dass hier von einem noch höheren Strombedarf auszugehen ist. Die erforderliche Wechselrichterscheinleistung kann mit 160..180 kVA abgeschätzt werden.

Stromortskurven

Die Stromortskurve der Maschine unter der Voraussetzung des Betriebes mit kleinen Rotorfrequenzen am Wechselrichter (mit Sättigung im Nennpunkt) ist in guter Näherung ein Kreis bis zum Kippunkt. Jenseits des Kippunktes hat sie wegen der zunehmenden Stromverdrängung nur theoretische Bedeutung. In den berechneten Betriebspunkten Nennbetrieb und Überlast sind jeweils Sättigung und Stromverdrängung (soweit vorhanden) in den ESB Daten berücksichtigt. Die Stromortskurve ist in Abbildung 3 für den Eckpunkt (6000 1/min) und für maximale Drehzahl (15000 1/min) dargestellt.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

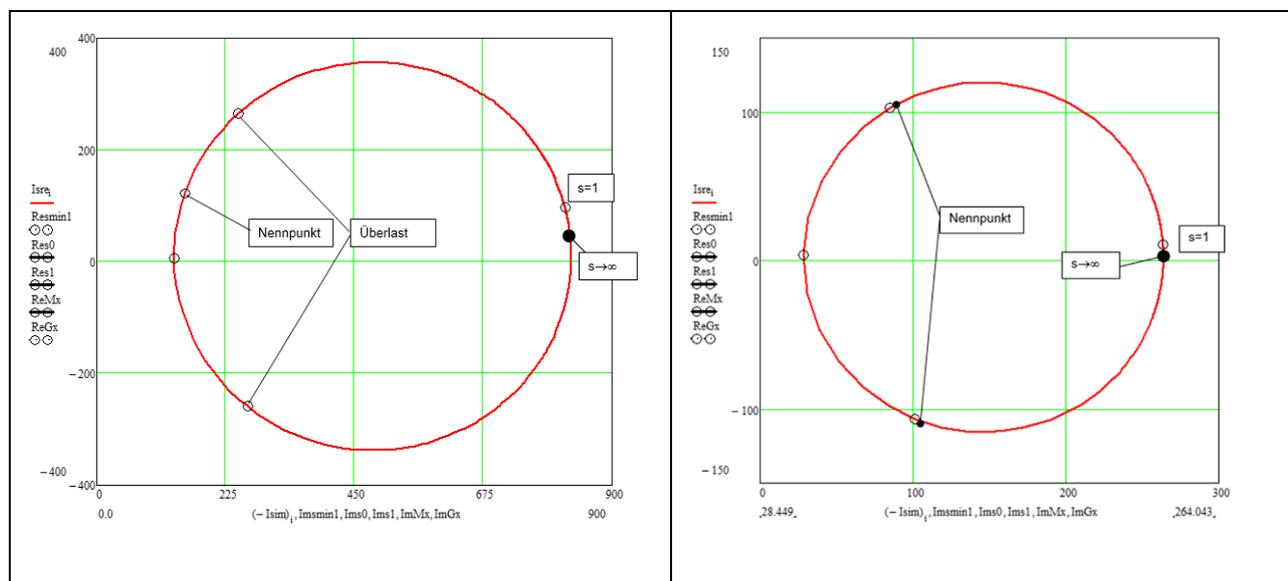


Abbildung 3: Stromortskurve im Auslegungspunkt und für Punkt max. Drehzahl (15000 1/min) ASM 1

Durch die Verschiebung der Stromortskurve infolge der Ständerverluste in Richtung des ersten Quadranten (nach oben, durch die Punkte $s=0$ und $s=\infty$ gekennzeichnet) wird erkennbar, dass die Leistungsabgabe der Maschine im Generatorbetrieb kleiner als im Motorbetrieb ist bzw. die gleiche Leistung im Generatorbetrieb nur mit höheren Verlusten erreicht werden kann. Die Drehmomentenreserve ist jedoch ausreichend, um auch bei generatorischer Bremsung noch das volle Überlastmoment aufzubringen.

Pulsationsverluste

Die Zusatzverluste durch Pulsation des Feldes infolge der Nutung werden nach Vogt [3] berechnet. Sie betragen im Läufer 157 W und im Stator 127,6 W (Auslegungspunkt), somit insges. 284,6 W und sind damit nicht mehr vernachlässigbar. Ursache ist der sehr kleine Luftspalt. Bei einer verflochtenen Wellenwicklung muss mit größeren Nutöffnungen gerechnet werden, wodurch sich die Pulsationsverluste erhöhen. Sie haben dann signifikanten Einfluss auf die Eisenerwärmung im Zahnbereich. Die höheren Pulsationsverluste können dann nur noch durch einen größeren Luftspalt oder magnetische Nutverschlusskeile reduziert werden.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Wirkungsgradkennfeld

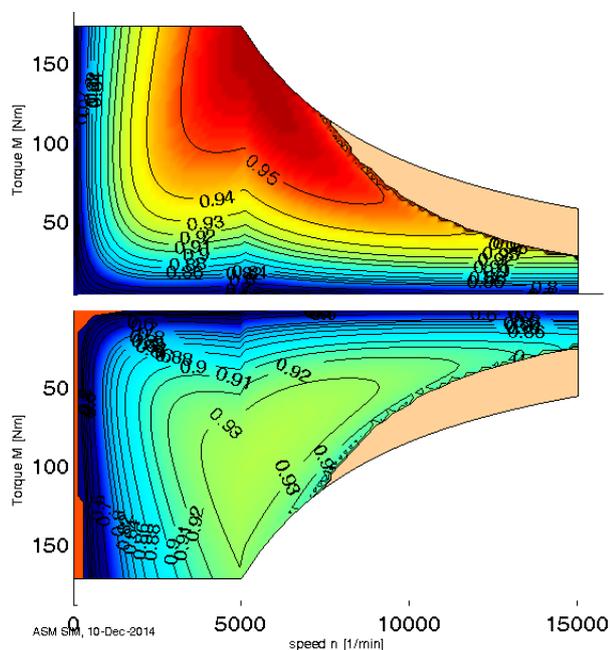


Abbildung 4: Wirkungsgradkennfeld ASM 1

Analyse von weiterem Optimierungspotential

Für den jetzigen Grobentwurf galten die in Tabelle 1 aufgeführten Restriktionen. Diese werden weitgehend durch das gewählte Getriebe- und Packagekonzept dominiert. Als besonders kritisch für den Maschinenentwurf wurde der Außendurchmesser identifiziert. Hierdurch werden der Bohrungsdurchmesser und die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors beschränkt, was zu einem Entwurf mit bereits hoher Kraftdichte im Nennpunkt (hohe Flussdichte und hoher Strombelag) und einem magnetisch hoch ausgenutztem Eisenkreis mit hohem Magnetisierungsbedarf führt. Um den Bohrungsdurchmesser nicht zu weit absinken zu lassen und die Paketlängenbegrenzung einzuhalten, wurde ein Entwurf mit 3 Polpaaren gewählt, was ebenfalls den Blindleistungsbedarf erhöht. Dies hat einen reduzierten Wirkungsgrad im Nennpunkt und einen ungünstigen $\cos \varphi$ zur Folge, was zusammen mit den vorher beschriebenen Bedingungen zu einer hohen Strombelastung des speisenden Wechselrichters führt. Eine Erhöhung des Drehschubes bei gleicher Stromdichte im Rotor führt zu nicht mehr ausführbaren Rotornuten, so dass dies nur unter Inkaufnahme größerer Verluste möglich ist und dem Projektziel widerspricht.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Die spezifische Leistungsdichte $P_n/M_{akt}@50001/min = 1,35 \text{ kW/kg}$ liegt bei einem eher mittelmäßigem Wert und dürfte bei Berücksichtigung des Gehäuses unter 1 kW/kg fallen.

Es ist bekannt, dass höhere Umfangsgeschwindigkeiten zu deutlich günstigeren Entwürfen vor allem hinsichtlich des Leistungsgewichtes und bei entlastetem magnetischem Kreis auch zu günstigeren Wirkungsgraden führen. Verantwortlich ist der quadratische Einfluss des Bohrungsdurchmessers auf das Drehmoment.

Die einzigen Möglichkeiten, bei den gegebenen Restriktionen den Bohrungsdurchmesser anzuheben, sind eine drastische Erhöhung des Nutfüllfaktors, z.B. durch eine verflochtene Wellenwicklung mit Profildrähten [4] und die Verwendung einer hochpermeablen Blechsorte, z.B. Eisen-Kobalt Bleche mit Sättigungsinduktion von $2,4 \text{ T}$.

Mit der verflochtenen Wellenwicklung können z.B. Cu Füllfaktoren von $60...70\%$ erreicht werden (Cu Querschnitt pro Brutto-Nutfläche). Eine Optimierung durch ein hochwertiges Isoliersystem ist zusätzlich möglich. Somit lässt sich die Nutdurchflutung auf kleinerem Volumen bereitstellen und Platz zur Bohrungsdurchmesseraufweitung schaffen. Wie andere Untersuchungen am IMAB zeigten, ist wegen der verhältnismäßig kleinen Nuten ein höherer Füllfaktor nur sehr schwierig darzustellen. Die Ausführung der Wicklung mit Profildraht erfordert offene Nuten und eine höhere Lochzahl und führt damit zu höheren Zahnpulsationsverlusten, einem erhöhtem Magnetisierungsbedarf und höherer Streuung (red. Kippmoment). Dem könnte man durch magnetische Nutverschlusskeile begegnen. Lässt sich diese Maßnahme nicht durchführen, sollte man bei Asynchronmaschinen mit dieser Wicklungsausführung sehr vorsichtig sein, da die Nachteile schnell überwiegen können.

Gegen die Verwendung von Eisen-Kobalt Blechen (Vacoflux) spricht außer den enormen Materialkosten dieser Werkstoffe erst einmal nichts. Die ökonomische Aufwand-Nutzen-Relation ist jedoch sehr ungünstig.

Die Optimierung des Teillastwirkungsgrades im unteren Drehzahlbereich durch Flussanhebung erfordert eine Reserve im Eisenkreis gegen Sättigung, die hier nur sehr gering ist. Der Teillastwirkungsgrad stellt gerade bei der ASM den größten Nachteil gegenüber einer PSM dar. Auch hier würde ein größerer Außendurchmesser zu deutlich günstigeren Entwurfsbedingungen und zu einem erheblich besseren Kennfeld führen.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Weitere Optimierungspotentiale betreffen die Statornutform (Streusteg), den Luftspalt (Magnetisierungsbedarf) und die Rotornutabmessungen. Diese Punkte sind im vorliegenden Entwurf bereits an einem Grenzwert (Luftspalt = 0,5 mm, Pulsationsverluste sehr hoch, Fertigungstoleranzen am Anschlag) oder lassen nur geringe Verbesserungen erwarten. Durch Optimierung der Zahnkopfgeometrie ist noch die Reduzierung der Streuung und eine Anhebung des Kippmomentes möglich, dies könnte bei einer Feinauslegung genutzt werden.

Validierung mit FEM Simulation

Für die ASM 1 wurde ein Modell mit den vorab errechneten geometrischen Daten und den Wicklungsdaten in der FEM-Simulationsumgebung MAXWELL aufgebaut, um die Ergebnisse des analytisch generierten Entwurfs zu validieren. Es wurde eine transiente Berechnung für den Nennpunkt ($M = 75 \text{ Nm}$ und $n = 6000 \text{ 1/min}$) erstellt. In Abbildung 5 ist zu erkennen, dass sich nach dem Einschwingvorgang ein Drehmoment von 75 Nm einstellt.

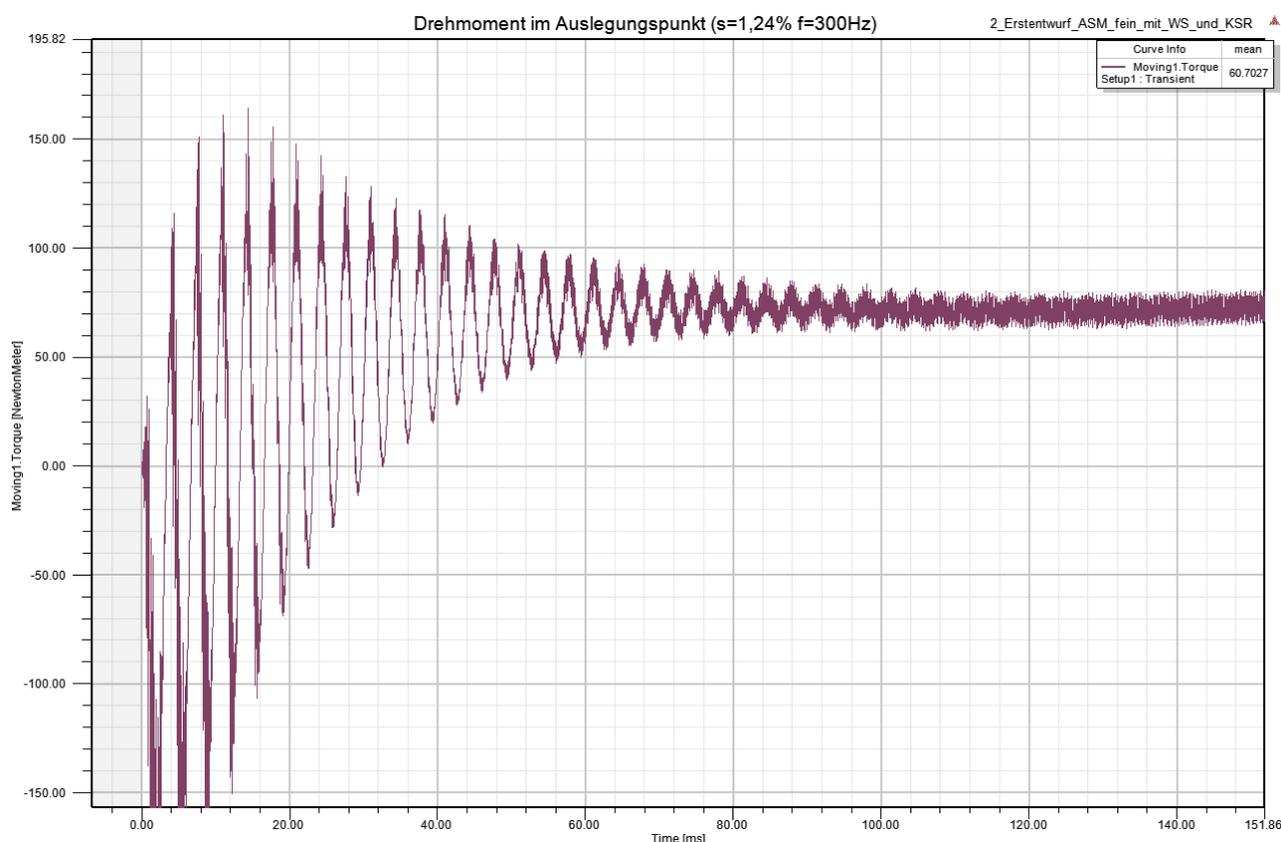


Abbildung 5: Drehmomentergebnis aus FEM Simulation

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Abbildung 6 zeigt die Flussdichteverteilung in der Maschine ebenfalls für den Nennpunkt. Es ist zu erkennen, dass in den flussführenden Gebieten keine Sättigung eintritt.

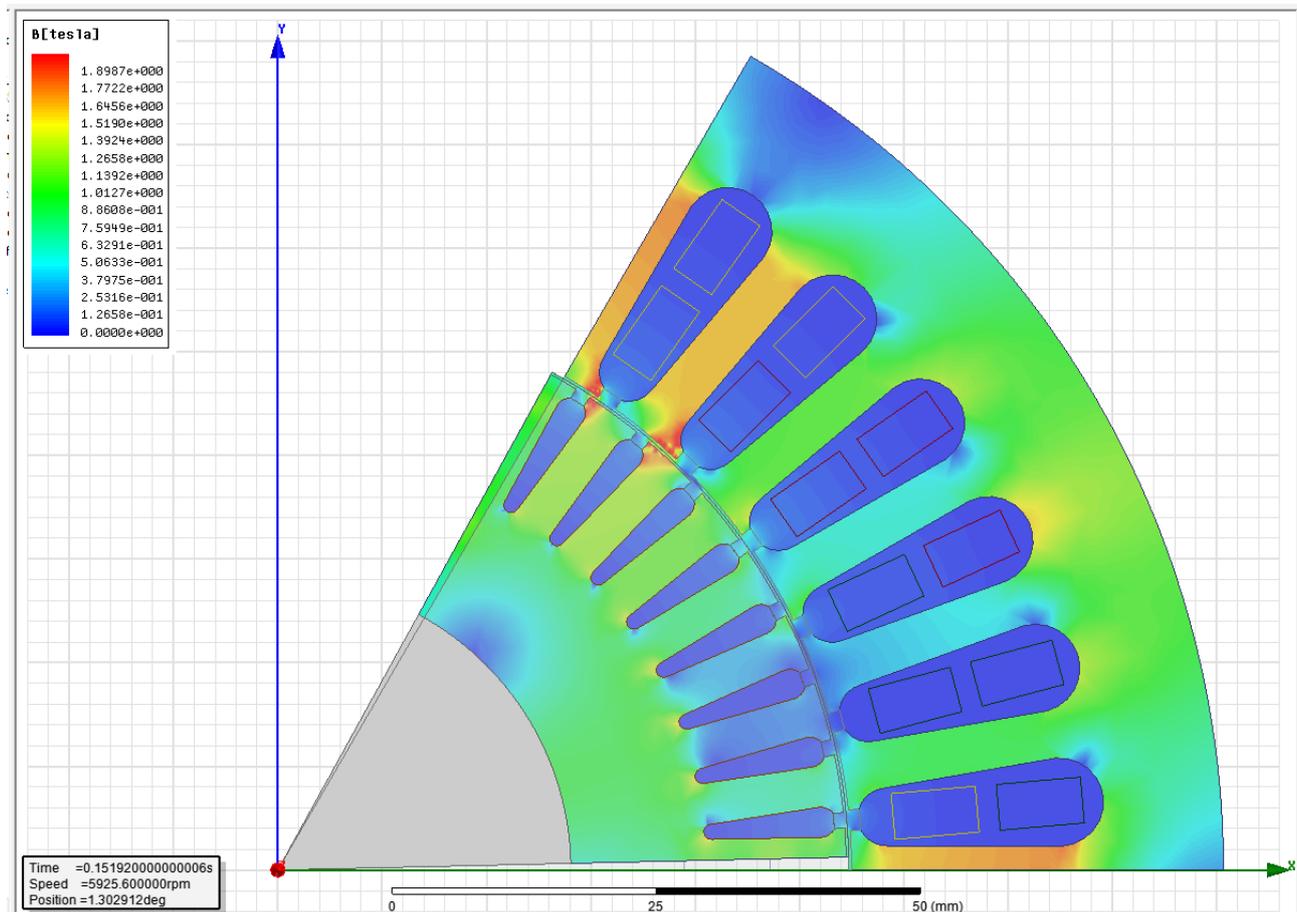


Abbildung 6: Flussdichteverteilung ASM 1

2.1.2 Auslegung ASM 2

Die Package- und Entwurfsdiskussionen im Konsortium führten zur Festlegung der Package Abmessungen, bei denen der Aktivdurchmesser auf 180 mm begrenzt bleibt. Daher wurde der Entwurf ASM 1 gemäß den letzten Diskussionen einer Optimierung unterzogen. Diese Optimierung berücksichtigt auch die Eisenverluste.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Im Einzelnen geht es um folgende Maßnahmen:

- Optimierung der Streuung, hierbei Berücksichtigung der Anforderungen, die sich aus der Kupfer-Druckgusstechnologie ergeben (geschlossene Rotornuten, Luftspalt durch Abdrehen des Rotorblechpaketes um 0,5 mm eingestellt).
- Keine Schrägung
- Blechqualität M250-35. Fertigungszuschläge für die Eisenverluste: Hysterese 1,5, Wirbelstrom 2,0.

Die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie ist mit der Vorherigen aus Kapitel 1.4.2 identisch. Bedingt durch die Optimierung kommt es zu Änderungen im Blechschnitt und bei den Ersatzschaltbildparametern.

In der Stromortskurve wurde die Stromverdrängung mit berücksichtigt, obwohl sie erst jenseits des Kippunktes eine größere Rolle spielt. In den berechneten Betriebspunkten Nennbetrieb und Überlast ist jeweils die Sättigung in der Hauptinduktivität berücksichtigt. Die Stromortskurve ist in der Abbildung für den Eckpunkt (6000 1/min) und für maximale Drehzahl (15000 1/min) dargestellt.

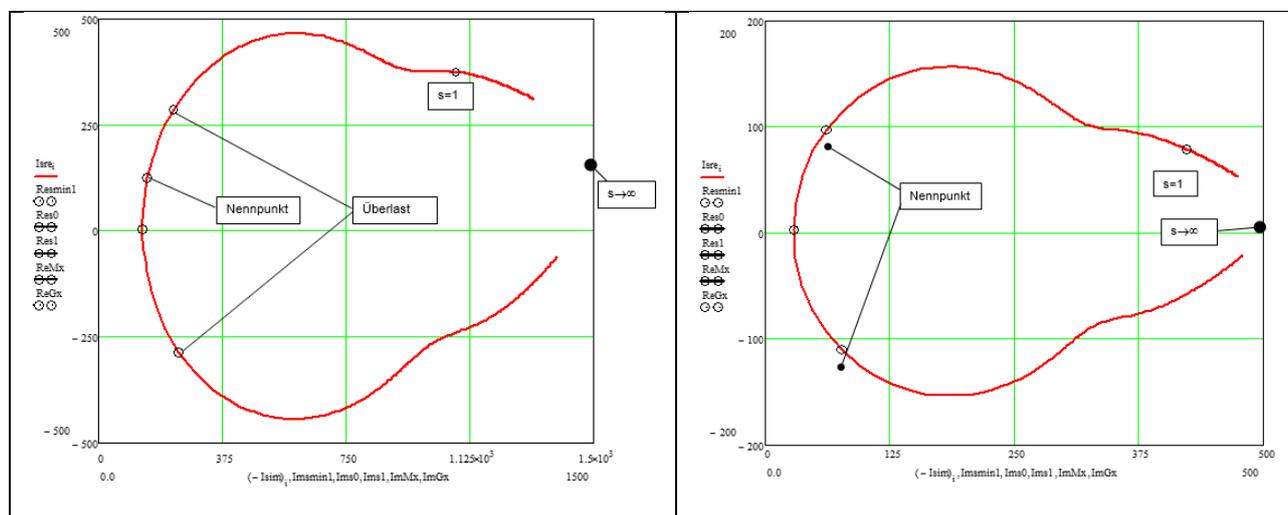


Abbildung 7: Stromortskurve im Auslegungspunkt und für Punkt max. Drehzahl (15000 1/min) ASM

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Durch die Verschiebung der Stromortskurve infolge der Ständerverluste in Richtung des ersten Quadranten (nach oben, durch die Punkte $s=0$ und $s=\infty$ gekennzeichnet) wird erkennbar, dass die Leistungsabgabe der Maschine im Generatorbetrieb kleiner als im Motorbetrieb ist bzw. die gleiche Leistung im Generatorbetrieb nur mit höheren Verlusten erreicht werden kann. Die Drehmomentenreserve ist jedoch ausreichend, um auch bei generatorischer Bremsung noch das volle Überlastmoment aufzubringen.

Pulsationsverluste

Die Zusatzverluste durch Pulsation des Feldes infolge der Nutung werden nach [1] berechnet. Sie betragen im Läufer 139 W und im Stator 124 W (Auslegungspunkt), somit insges. 263 W und sind damit nicht mehr vernachlässigbar. Ursache ist der sehr kleine Luftspalt.

Wirkungsgradkennfeld

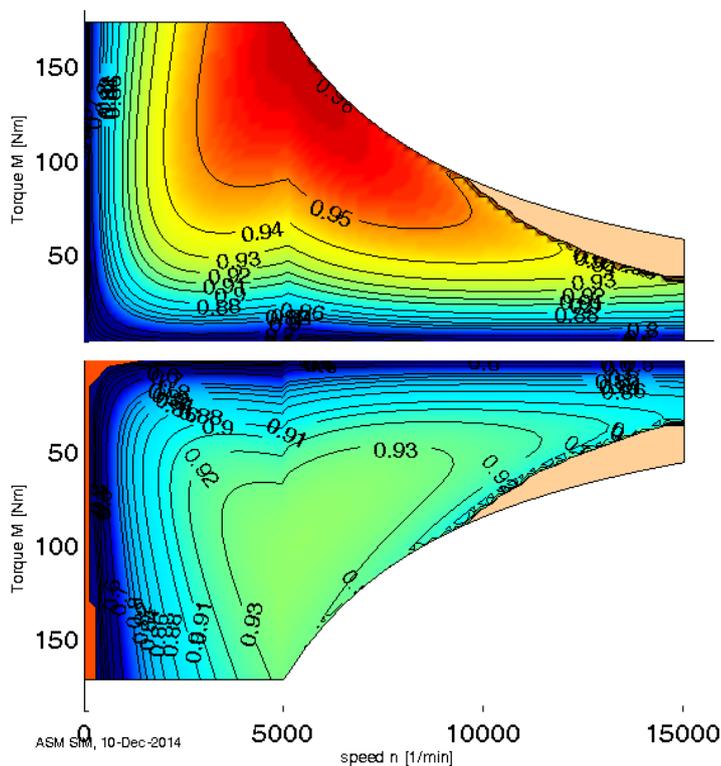


Abbildung 7: Wirkungsgradkennfeld ASM 2

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

2.1.3 Auslegung ASM 3

Die Weiterführung der Package- und Entwurfsdiskussionen im Konsortium führten zu der Erkenntnis, dass mit Rücksicht auf das am Gehäuse des Motors befindliche Stützlager, dessen räumliche Position fix ist, eine erneute Verkürzung des Blechpaketes um weitere ca. 12 mm notwendig ist. Damit kann das Stützlager integraler Bestandteil des hinteren Lagerschildes bleiben und durch eine Änderung des Gußmodells in der räumlich richtigen Position dargestellt werden.

Die nun zum Einsatz kommende Batterie von LG bietet eine andere Spannungslage der Leerlaufspannung von 400 V bei 80% SOC und 350 V bei 10% SOC mit einem Innenwiderstand $R_{iB} = 45 \text{ m}\Omega$, was eine Neuanpassung der Windungszahlen erfordert. Der relative Spannungshub ist deutlich größer als bei der vorher verwendeten A123 Batterie, so dass sich auch die Sättigungsverhältnisse verschieben.

Die Verkürzung des Blechpaketes erfordert eine Erhöhung der Kraftdichte, die wegen der hohen Sättigung des Eisenkreises i.W. über einen höheren Strombelag dargestellt werden kann, was vor allem den Wirkungsgrad im Überlastpunkt reduziert. Der Wirkungsgrad im Nennpunkt wird dagegen nur geringfügig schlechter. Die Anforderungsdaten wurden übernommen soweit sie nicht an die neue Situation angepasst werden mussten.

Aus den Angaben kann auf das Drehzahl-Drehmoment-Diagramm geschlossen und die Spannungsverläufe definiert werden, die in Abbildung 8 zusammengestellt sind.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

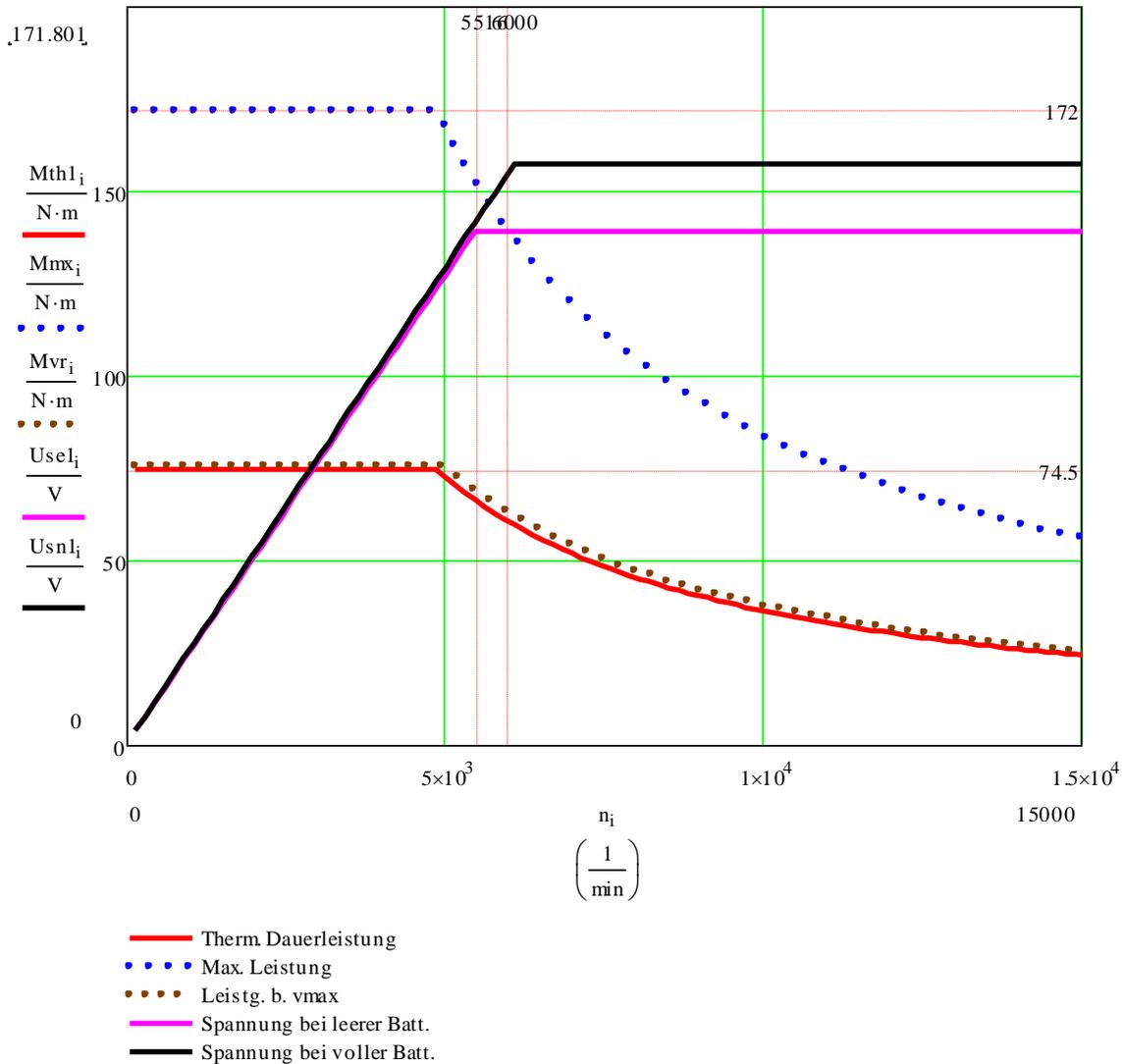


Abbildung 8: Drehzahl-Drehmoment- und gewählte Spannungsverläufe für den Fahrzeugantrieb ASM 3

In Abbildung 8 sind die Lastfälle thermische Beharrung (39 kW, ca. 1h Betrieb) und Überlast mit 90 kW erfasst. Die Spannungsverläufe basieren auf konstantem Fluss in der Maschine. Bei flussregelnden Steuerverfahren können die vorhandenen Reserven in der Spannung ausgenutzt werden. So muss z.B. bei Rotorflussregelung ein zusätzlicher Spannungsbedarf von 10..15% für hohe Drehmomente. Bei wirkungsgradoptimaler Regelung ist der Spannungsbedarf besonders im unteren Drehzahlbereich abhängig vom Sättigungszustand noch größer. Die Entwurfsrechnung

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

beinhaltet eine Auslegung mit den Spannungen nach Bild 1 unabhängig vom Regelverfahren und liegt somit auf der sicheren Seite.

Die Entwurfsrechnungen zeigen, dass die Einhaltung des geforderten Drehmomentes bei max. Drehzahl eine Spannungsreserve im Nennpunkt ($U_s = 126 \text{ V} @ 5000 \text{ 1/min} < 139 \text{ V} @ \text{SOC}=10\%$) erfordert, so dass die Aussteuergrenze der Spannung erst bei 5516 1/min erreicht wird. Dies ist in Abbildung 8 bereits berücksichtigt.

Stromortskurve

In der Stromortskurve wurde die Stromverdrängung mit berücksichtigt, obwohl sie erst jenseits des Kippunktes eine größere Rolle spielt. In den berechneten Betriebspunkten Nennbetrieb und Überlast ist jeweils die Sättigung in der Hauptinduktivität berücksichtigt. Die SOK ist in der Abbildung 9 für den Eckpunkt (5000 1/min) und für maximale Drehzahl (15000 1/min) dargestellt.

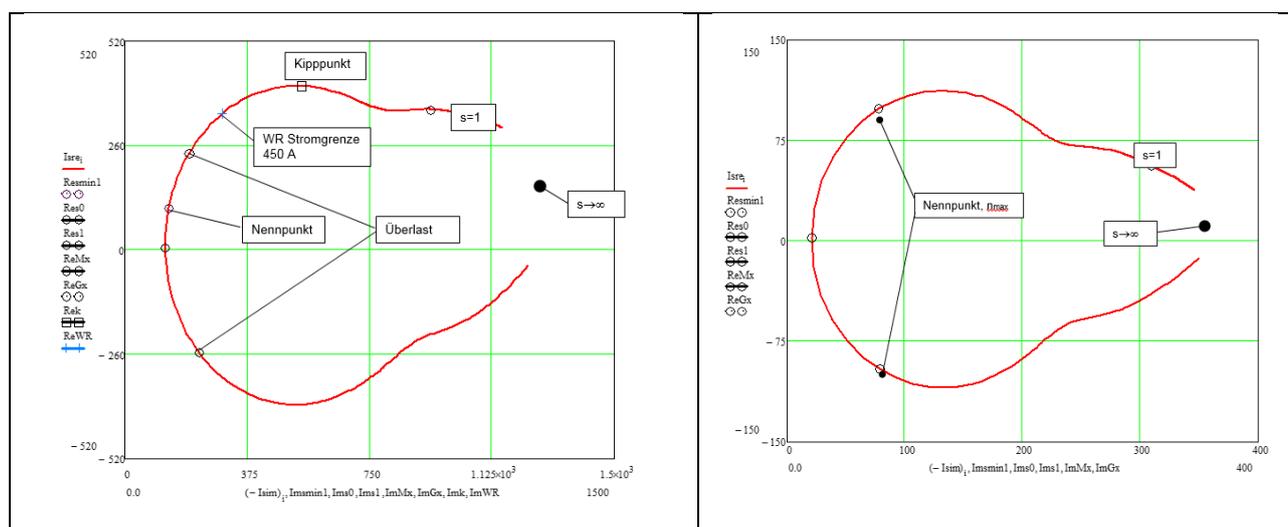


Abbildung 9: Stromortskurve im Auslegungspunkt und für Punkt max. Drehzahl (15000 1/min) ASM
3

Durch die Verschiebung der Stromortskurve infolge der Ständerverluste in Richtung des ersten Quadranten (nach oben, durch die Punkte $s=0$ und $s=\infty$ gekennzeichnet) wird erkennbar, dass die Leistungsabgabe der Maschine im Generatorbetrieb kleiner als im Motorbetrieb ist bzw. die gleiche

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Leistung im Generatorbetrieb nur mit höheren Verlusten erreicht werden kann. Die Drehmomentreserve ist jedoch ausreichend, um auch bei generatorischer Bremsung noch das volle Überlastmoment aufzubringen.

Pulsationsverluste

Die Zusatzverluste durch Pulsation des Feldes infolge der Nutung werden nach [1] berechnet. Sie betragen im Läufer 97 W und im Stator 121 W (Auslegungspunkt), somit insges. 218 W und sind damit nicht mehr vernachlässigbar. Ursache ist der sehr kleine Luftspalt.

Sättigungsverhalten

Die Sättigung spielt bei der Ermittlung des Betriebsverhaltens eine große Rolle, da die Maschine wegen der Abmessungrestriktionen hoch gesättigt ist (Sättigungsverhältnis $KV= 1,9$). Der funktionale Zusammenhang $L_{sh}(I_{\mu})$ ist in Abbildung 10 dargestellt. Er kann durch ein Polynom 4. Ordnung mit einem Bestimmtheitsmaß $R = 0,99$ angenähert werden. Man erkennt sehr deutlich den starken Rückgang der Hauptfeld – Induktivität mit dem Magnetisierungsstrom.

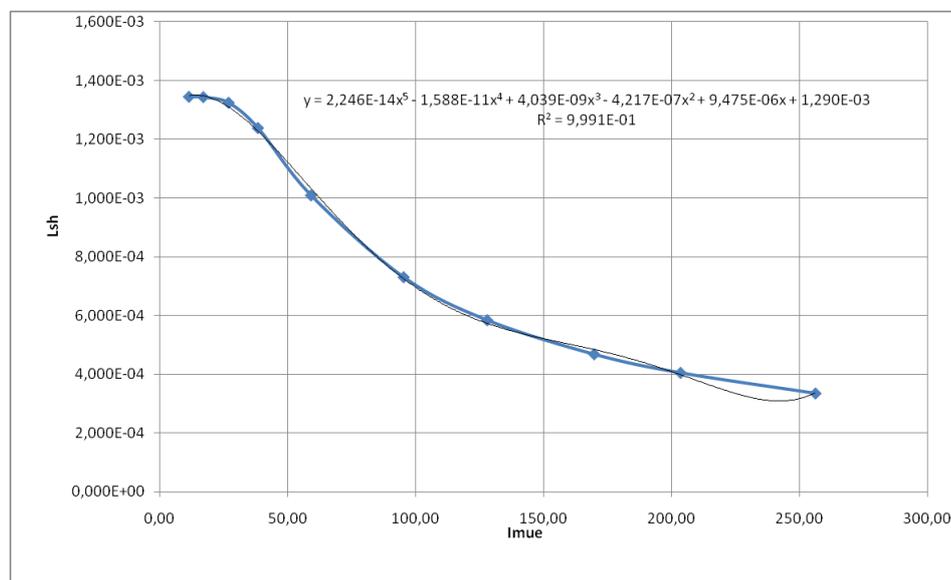


Abbildung 10: Sättigungsabhängige Hauptinduktivität der ASM 3

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Wirkungsgradkennfeld

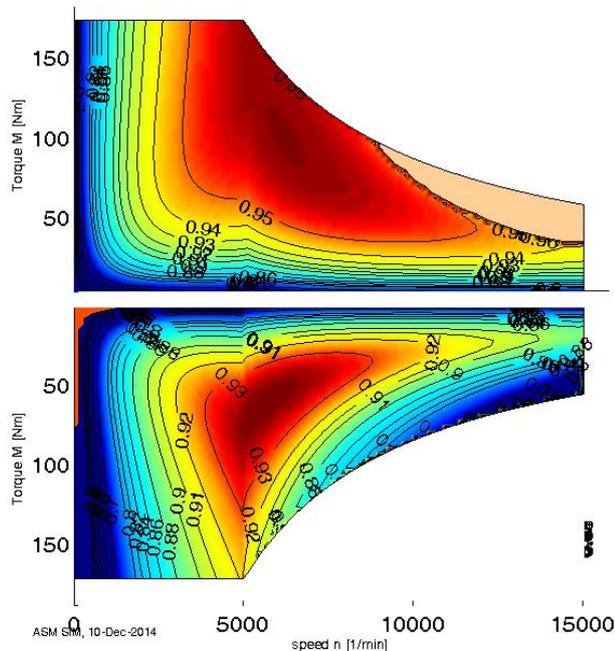


Abbildung 11: Wirkungsgradkennfeld ASM 3

2.1.4 Auslegung ASM 4

Um die Potentiale eines größeren Bohrungsdurchmessers zu verdeutlichen, wurde in einer weiteren Entwurfsreihe der Außendurchmesser freigegeben, somit kann der Bohrungsdurchmesser angehoben werden, es steht mehr Hebelarm zur Verfügung und die Maschine wird deutlich kürzer. Gleichzeitig ergeben sich für die Leistungsdichte günstigere Werte.

Hinsichtlich einer Wirkungsgradoptimierung wurde hier jedoch der Pfad verfolgt, den magnetischen Kreis geringer auszunutzen und die Leistungsdichte nahezu konstant zu lassen. Polpaarzahl und Speisefrequenz wurden konstant gelassen, so dass sich an dieser Stelle keine Vorteile durch eine höhere Kraftdichte ergeben.

Die Auswertung einer Entwurfsserie von 36 Entwürfen zeigte, dass bereits mit einer Vergrößerung des Bohrungsdurchmessers von 110 mm auf 135 mm eine signifikante Verbesserung des Wirkungsgrades und des Leistungsfaktors bei leicht erhöhter aktiver Masse erreichen lässt. Eine

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

weitere Steigerung des Bohrungsdurchmessers ergab keine weitere Verbesserung des Wirkungsgrades und nur einen geringfügigen Anstieg des Leistungsfaktors, so dass der Entwurf mit 135 mm Bohrungsdurchmesser in mehreren Schleifen einer weiteren Optimierung unterzogen wurde. Diese hatte u.a. eine Reduzierung der Streuung durch Optimierung des Zahnkopfes zum Ziel, so dass bei Maximaldrehzahl das geforderte Moment von 25 Nm noch sicher erreicht wird. Ebenso zeigte sich, dass es zweckmäßig ist, die Luftspaltflussdichte weiterhin verhältnismäßig hoch einzustellen, was zu Lasten des Leistungsfaktors geht, aber einen ausreichend hohen Feldschwächbereich gewährleistet. Die Wicklungsausführung wurde unverändert vom letzten Entwurf übernommen.

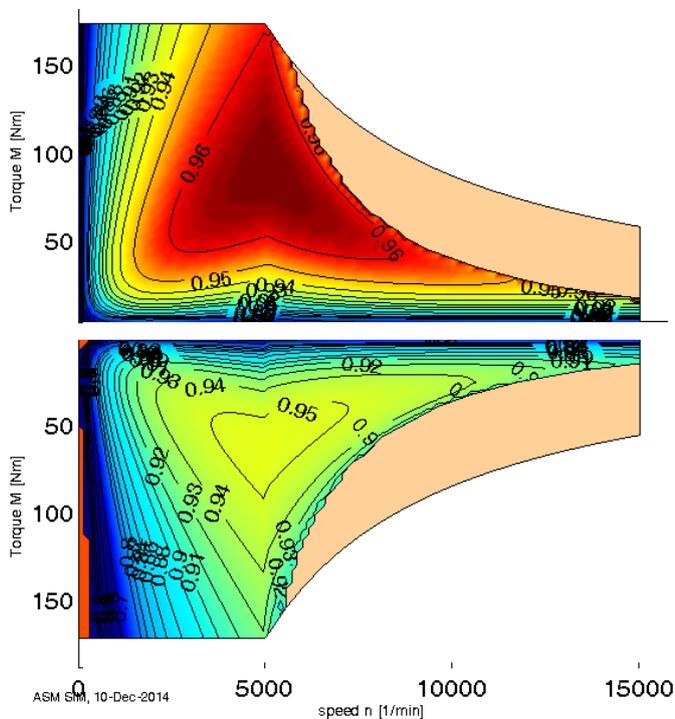


Abbildung 12: Wirkungsgradkennfeld ASM 4

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

2.1.5 Übersicht über alle Entwürfe der Asynchronmaschinen

Tabelle 3 zeigt wichtige Parameter der vier Maschinen inklusive der Grundmaschine (ASM 1)

Kriterium	ASM 1	ASM 2	ASM 3	ASM 4
Außendurchmesser [mm]	181,3	179,3	180,1	226,5
Aktive Länge ohne Wickelköpfe [mm]	172	169,5	156	112,2
Wirkungsgrad in Nennpunkt [%]	93,77	94,4	94	96
Wirkungsgrad im Überlastpunkt [%]	91,4	92	91,8	93,1
$\cos\varphi$ im Nennpunkt [-]	0,63	0,65	0,66	0,63

Tabelle 3: Übersicht über ausgelegte ASM

2.1.6 Auslegung der fremderregten Synchronmaschine

Die fremderregte Synchronmaschine (FESM) bietet die Möglichkeit, den Stator von den bei der Asynchronmaschine anfallenden Verlusten durch den Magnetisierungsstrom zu entlasten und so zu einem besseren Wirkungsgrad zu gelangen. Gleichzeitig gewinnt man durch die Möglichkeit, den Erregerstrom regeln zu können einen zusätzlichen Freiheitsgrad für die Feldschwächung, so dass das Drehmoment nicht wie bei der Asynchronmaschine quadratisch mit der Drehzahl, sondern gemäß der Leistungshyperbel abfällt, was eine günstigere Auslegung des Eisenkreises erwarten lässt.

Nachteilig ist die Rotorstruktur mit einem bewickelten Polrad und einer Einrichtung zur Energieübertragung auf den Läufer. Mit Rücksicht auf die Wicklungsisolation und die Kühlverhältnisse im

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Läufer ist nur eine moderate Stromdichte in der Rotorwicklung zulässig und die hier gemäß Projektantrag vorgesehene bürstenlose Energieübertragung auf den Rotor benötigt zusätzlichen Platz. Es ist somit davon auszugehen, dass eine fremderregte Synchronmaschine die sehr rigiden Abmessungsrestriktionen des aktuell vorgegebenen Packages für die Vorderachse nicht einhalten kann.

Ziel der Untersuchungen ist deshalb, die Potenziale und Besonderheiten der FESM im Vergleich zur ASM aufzuzeigen.

Entwurfsstrategie

Beim Entwurf der Maschine wurde der Entwurf der wirkungsgradoptimalen Asynchronmaschine (ASM 4) als Vergleichsbasis herangezogen, die zwar auch die Abmessungsrestriktionen des hier gegebenen Packages nicht einhält, aber sehr gut zeigt, was mit ausgewogenen Randbedingungen möglich ist.

Der Maschinenentwurf wurde mit dem FEM Programm Maxwell (ANSYS) durchgeführt [7].

Ziel der Auslegungsoptimierung war es, für die gegebenen Leistungs-, Drehmoment- und Drehzahldaten einen möglichst hohen Wirkungsgrad besonders im Teillastbereich zu erzielen. Dazu wurde von einer Schenkelpolmaschine ausgegangen, da diese Magnetkreisstruktur gegenüber einer Vollpolmaschine eine höhere Polraddurchflutung ermöglicht. Nachteilig ist hier, dass die mechanischen Beanspruchungen des Polrades stärker die Auslegung des Magnetkreises beeinflussen.

Da die Polradwicklung in Wärmeklasse H ausgeführt angenommen wurde und die Kühlung des Polrades nur über den Luftspalt und die Luftumwälzung an den Wickelköpfen erfolgen kann, ist die Stromdichte im Polrad begrenzt. Deshalb wurde auch der Luftspalt mit $\delta = 0,5$ mm relativ klein angesetzt.

Weiter erfordert die Fliehkraftbeanspruchung des Polrades eine Mindestdicke des Rotorjoches, so dass auch hier der Wickelraum eingeschränkt wird. Der erforderliche Durchmesser des Rotorjoches wurde daher auf 64 mm bei einem Achsloch von 44mm festgelegt (Näheres unter AP 2.7.1).

Die Amplitude der Luftspaltinduktion wurde auf 0,82 T begrenzt. Mit einem konservativ geschätzten Füllfaktor von 0,43 und einer Stromdichte von 6 A/mm² im Nennpunkt, können 152 mm² Kupferfläche

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

und eine Verlustleistung von ca. 300 W genutzt werden. Eine kurzzeitige Erhöhung der Erregerleistung auf 800 W (Stromdichte 10 A/mm^2) sollte wegen der Ankerrückwirkung bei Überlast oder zur Optimierung des Wirkungsgrades vorgesehen werden.

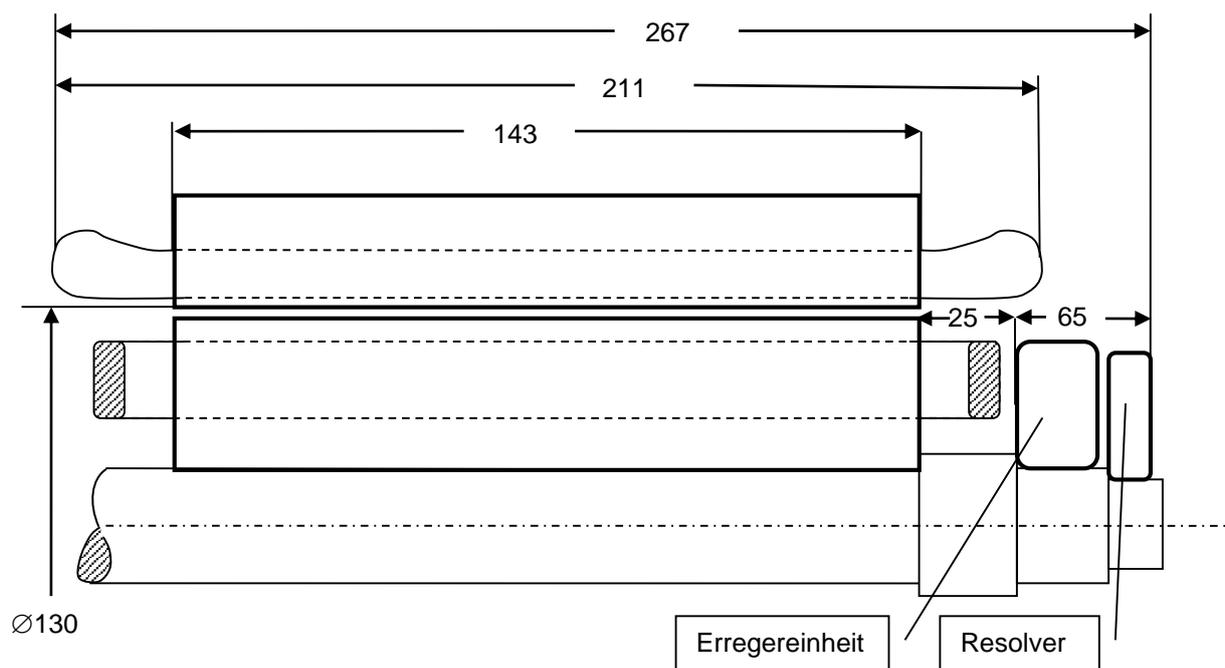


Abbildung 13: Abmessungen FESM

Dieser Ansatz hat zur Folge, dass die Länge des Polrades und des Statorblechpaketes deutlich größer werden muss, als bei der Asynchronmaschine mit dem thermisch robusteren Läufer. Die Länge des Blechpaketes wurde auf $l_{Fe} = 135 \text{ mm}$ und mit einem Eisenfüllfaktor von $\varphi_{Fe} = 0,94$ auf geometrisch $l_E = 143 \text{ mm}$ erhöht.

Erregerwicklung

Für die Speisung der Erregerwicklung, an die infolge des Fahrzeugbetriebs keine sehr hohen dynamischen Anforderungen gestellt werden, wird ein rotierender Einphasen-Transformator mit einer Frequenz von 10 kHz und einem Brückengleichrichter vorgeschlagen. Die Ausführung als Ferrit-Ringkern Transformator mit axialem Luftspalt ermöglicht einen einfachen Aufbau bei sehr

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

geringer Streuung. Die Gestaltungsmöglichkeiten von Ferritkernen erlauben eine topfförmige Struktur mit einer zur Welle passenden zentralen Bohrung.

Eine konstruktive Integration von einer Gleichrichterscheibe mit Kühlplatte und einem Ringkern Transformator in einem Spritzgussteil sollte kein größeres Problem darstellen. Ebenso ist eine gute Kühlung der Erregereinheit mit einer innenbelüfteten Tragscheibe aus Al-Druckguss möglich, auf die beidseitig Dioden und Sekundärteil des Erregertrafos aufgebracht werden.

Die Bemessung des Transformators richtet sich nach dem Leistungsbedarf der Erregerwicklung (Wirkleistung – hier 344 W), der auf die Wechselstromseite umgerechnet die Sekundärleistung des Transformators ergibt. Hieraus wiederum folgen der sekundärseitig zulässige Widerstand, die Drahtabmessungen und der Platzbedarf der Sekundärwicklung. Auf der Primärseite kommt zusätzlich der Magnetisierungsstrom hinzu, der auch die Magnetisierung der Streupfade abdecken muss, wobei die Magnetisierungsblindleistung durchaus höher als der zu übertragende Wirkleistungsbedarf des Polrades sein kann. Dadurch erhöhen sich der Durchflutungsbedarf und der Platzbedarf der Primärwicklung nicht unerheblich. Für die Auslegung wurden die üblichen Transformatorgleichungen [8] verwendet.

Es sei darauf verwiesen, dass die Magnetisierungsblindleistung durch einen primärseitigen Kondensator im Steller für den Erregerstrom kompensiert werden kann. Die Stromregelung muss dann nur die Wirkleistung für die Erregerwicklung einstellen.

Vergleich mit den ausgelegten Asynchronmaschinen

Bedingt durch die Temperaturgrenze der Polradwicklung (Wärmeklasse H) ist der Platzbedarf für die fremderregte Synchronmaschine größer als bei der Asynchronmaschine, so dass sich, wie vermutet, für die Abmessungsrestriktionen an der Vorderachse des Projektfahrzeuges kein sinnvoller Entwurf ergibt. Gegenüber dieser Maschine hat die FESM eine um 40...50 % vergrößerte Baulänge, was auf das längere Polrad und den Platzbedarf für die Erregereinrichtung sowie den Pollagegeber zurückzuführen ist.

Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich mit der kürzesten Asynchronmaschine und der durchmesserstärksten Asynchronmaschine. Zu erkennen sind die deutlichen Unterschiede im Wirkungsgrad.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Kriterium	FSM	ASM 3	ASM 4
Außendurchmesser [mm]	220	180,1	226,5
Aktive Länge ohne Wickelköpfe [mm]	143	156	112,2
Wirkungsgrad in Nennpunkt [%]	97,7	94	96
Wirkungsgrad im Überlastpunkt [%]	96,1	91,8	93,1
cosφ im Nennpunkt [-]	1	0,66	0,63

Tabelle 4: Vergleich FESM und ASM

2.2 AP 2.3.1– Auswahl Maschinenkonzepte (2. Projektjahr, 1,5 PM)

Die in AP 2.3.3 entworfenen Maschinen wurden an dieser Stelle vergleichend analysiert und bewertet. Grundlage der Untersuchung waren die vom Lastenheft vorgegeben geometrischen Restriktionen (Packageabmessungen) und die erstellten Wirkungsgradkennfelder aus AP 2.3.3. Die dazu gehörigen generierten Kennfelddaten wurden an Projektpartner übermittelt.

2.3 AP 2.3.2 – Bewertung Sensor-und Kühlkonzepte (1. Projektjahr, 1,5 PM)

Basierend auf den ermittelten Verlusten aus den anderen Arbeitspaketen, insbesondere aus AP 2.3.3 konnten Daten für die Auslegung des Kühlsystems bereitgestellt werden. Hierzu wurde jeweils eine detaillierte Betrachtung der Verluste in den untersuchten Maschinen vorgenommen und thermisch analysiert [2].

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

2.4 AP 2.2.3 – Antriebsbaukasten (3. Projektjahr, 3 PM)

Ausgehend vom letzten Entwurfsstand (ASM 3) wurde ein Baukastensystem für zukünftige Elektroantriebe in Straßenfahrzeugen konzipiert. Der Grundgedanke dabei war, den Blechschnitt unverändert zu lassen und durch Variation der Paketlänge und der Windungszahl unterschiedliche Leistungen darstellen zu können. Spannung und Drehzahl im Auslegungspunkt wurden dabei als jeweils konstant vorausgesetzt. Die Konzipierung des Baukastens orientierte sich dabei an den Vorgaben von Bosch für massenmarktaugliche elektrische Maschinen.

Blechpaketlängen und Wicklungsdaten

Die Anforderungsdaten für den Baukasten ermöglichen eine Bestimmung der Paketlängen-Windungszahlen-Kombinationen anhand der bekannten Zusammenhänge für Ganzloch-Zweischichtwicklungen, z.B. [1]. Als Variable treten dabei Luftspaltinduktion, Hauptfeldspannung, Eisenlänge, Zahl der parallelen Zweige und Windungszahl pro Spule auf. Diese Größen werden so variiert, dass sich wieder ausführbare Zweischichtwicklungen mit gerader Leiterzahl pro Nut für die angestrebten Paketlängen ergeben. Zonenfaktor und Sehnungsfaktor sind dabei durch den Blechschnitt gegeben und damit konstant. Es wird weiter davon ausgegangen, dass die Batteriespannung unverändert beibehalten wird. Damit ist von einer maximal verfügbaren Klemmenspannung von 139 V (Batterie entladen) bis 157 V (Batterie voll) auszugehen.

Es genügt daher aufgrund des großen Paketlängenbandes nicht, bei der Umrechnung der Windungszahlen nur die Hauptfeldspannung konstant zu halten, sondern die windungszahlabhängigen Streuinduktivitäten sollten ebenfalls mit berücksichtigt werden, da sich das Verhältnis von Streuung zu Hauptinduktivität verschiebt. Die für die Vorab-Auslegung hier angestrebte Klemmenspannung wird auf 130 V festgelegt.

Die Ergebnisse der Vorauslegung sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Aus der angepassten Eisenlänge l_{Fe} ergibt sich die tatsächliche Paketlänge l_e über den Eisenfüllfaktor, der unverändert gelassen wurde, da in allen Maschinen das gleiche Blech M250-35 A verwendet wird.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Auslegungs- Nummer (ASM 3.X)	Paketlänge soll	Paketlänge berechnet, l_e	Strang Windungszahl w_s (parallele Zweige a_s)	Wirksame Windungszahl $w_{s\zeta_s}$	Hauptfeld spannung	Prospektive. Nenn- leistung
3.1	60 mm	59,5 mm	52 (3)	48,52	108,3 V	15 kW
3.2	100 mm	103,1 mm	30 (2)	28	108,3 V	25 kW
3.3	140 mm	139,7 mm	24 (1)	22,4	111,2 V	35 kW
3.4	180 mm	181,1 mm	18 (2)	16,8	114,1 V	45 kW

Tabelle 5: Ergebnisse der Vorauslegung - Baukasten

Mit den Ausgangsdaten aus Tabelle 5 wurde mit Hilfe des Entwurfsprogramms der Baukasten überprüft. Als Ergebnis erhält man einen Satz von Auslegungen (3.1-3.4), die zum festgelegten Blechschnitt passen. Dabei wurde keine Rücksicht auf handelsübliche Drahtsorten genommen, sondern vorausgesetzt, dass bei massenmarktauglichen Maschinen der für den Nutschnitt und die Wicklung optimal angepasste Draht bezogen werden kann. Bei 3.3 (140 mm) zeigte sich, dass die günstigste Anpassung von Paketlänge und Windungszahl bei einer Amplitude der Luftspaltflussdichte von $B_\delta = 0,9$ T erreicht wird. Alle übrigen Auslegungen sind mit $B_\delta = 0,95$ T berechnet. Hinsichtlich der Kurzzeit-Überlastbarkeit bestehen bei 3.1-3.4 noch Reserven. Auch die vorgegebene Stromgrenze durch den Wechselrichter beschränkt die Überlastbarkeit bei 3.1-3.4 nicht unbedingt. Die Spannungsgrenze bei entladener Batterie ist aber nahezu ausgeschöpft.

Die ermittelten ESB Daten gestatten die Nachrechnung / Simulation des Betriebsverhaltens in weiteren interessierenden Betriebspunkten. Des Weiteren wurden Wirkungsgradkennfelder für alle Entwürfe erstellt. Eine Übersicht der Ergebnisse der Auslegung findet sich in Tabelle 6 am Ende des Unterkapitels.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

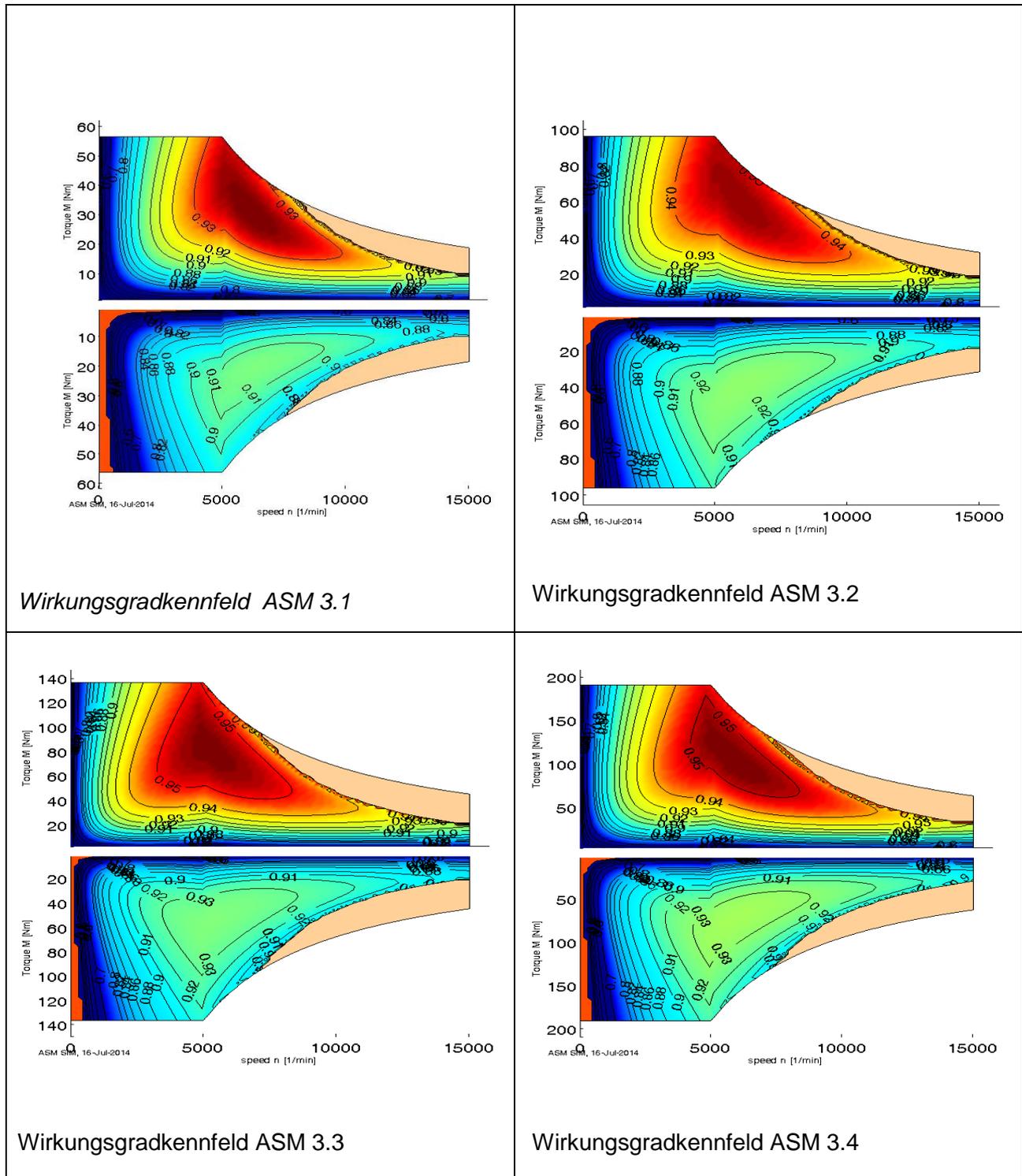


Abbildung 14: Wirkungsgradkennfelder Baukasten

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Parameter	ASM 3.1	ASM 3.2	ASM 3.3	ASM 3.4
Paketlänge [mm]	60	100	140	180
Leistung [kW]	15	25	35	45
Wirkungsgrad im Nennpunkt [%]	92	94	94	94
Leistungsfaktor im Nennpunkt [-]	0,66	0,66	0,76	0,67

Tabelle 6: Übersicht Baukasten

2.5 AP 2.3.4 – Konstruktion (mechanisch) (2. und 3. Projektjahr, 1,5 PM)

Für die in AP 2.3.3 entworfenen Maschinen wurden Blechschnitte erstellt. Weiterhin flossen die Luft- und Lagerreibungsverluste in die Kennfeldberechnungen ein. Abbildung 15 zeigt zwei konstruierte Blechschnitte, der obere stellt ASM 3 dar, der untere ASM 4.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

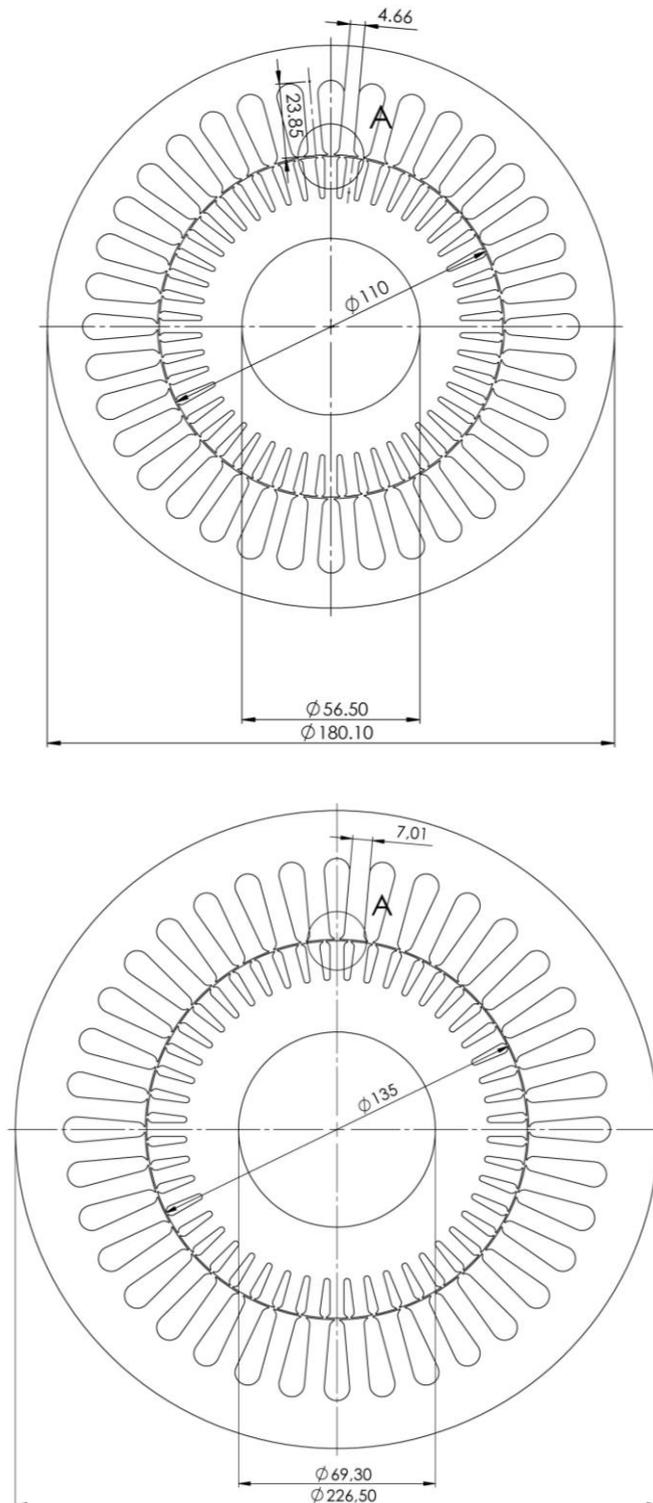


Abbildung 15: Blechschnitte ASM 3 und ASM 4

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

2.6 AP 2.3.6 – Test Funktionsmuster auf Prüfstand (1PM)

Die Arbeiten dieses Arbeitspaktes wurden in AP 2.4.5 integriert und die Ergebnisse werden somit unter 2.9 erläutert.

2.7 AP 2.4.1 – Bewertung Schaltungskonzepte für LE-Systeme (1.Projektjahr, 1,5 PM)

In AP 2.4.1 wurden leistungselektronische Topologiekonzepte zur Ansteuerung der oben ausgelegten Asynchronmaschinen erstellt und bewertet. Im Rahmen eines zweitägigen Workshops wurden zunächst verschiedene Bewertungskriterien und deren Gewichtung zueinander für ein Schaltungskonzept eines Wechselrichters unter Berücksichtigung der benötigten Spannungslage erarbeitet.

	Bauraum	Modularität	Wirkungsgrad	Kosten	Verfügbarkeit	Summe	Prozent
Bauraum		2	1	1	3	7	11,67%
Modularität	4		2	2	3	11	18,33%
Wirkungsgrad	5	4		2	3	14	23,33%
Kosten	5	4	4		5	18	30,00%
Verfügbarkeit	3	3	3	1		10	16,67%
						60	

Tabelle 7: Bewertungsübersicht Leistungselektronik

(5: Zeile viel wichtiger als Spalte, 4: Zeile wichtiger als Spalte, 3: Zeile gleich wichtig wie Spalte, 2: Zeile unwichtiger als Spalte, 1: Zeile viel unwichtiger als Spalte)

Anschließend wurden verschiedene Topologien anhand dieser Bewertungskriterien beurteilt. Die Ergebnisse fließen in die Untersuchung zum wirkungsgradoptimalen Betrieb der Asynchronmaschine (siehe AP 2.3.3) ein.

2.8 AP 2.4.2 – Auswahl Leistungselektronikkonzept (1.Projektjahr, 1 PM)

Die Ergebnisse der Auslegung (AP 2.3.3) definieren den bei den geforderten Spezifikationsdaten für die Asynchronmaschine benötigten Spannungs- und Strombedarf zur Ansteuerung der E-Maschinen. Diese Parameter bilden die Grundlagen zum Entwurf und zur Detailkonzeption der Ansteuerungselektronik im Fahrzeug.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

2.9 AP 2.4.5 – Softwareinhalte (2. und 3. Projektjahr, 7,5 PM)

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde eine Steuerungssoftware erarbeitet. Hierfür wurde an einem vorhandenen Asynchronmaschinenprüfstand ein Wechselrichter in Betrieb genommen und anschließend verschiedene Regelkonzepte (feldorientierte Regelung, U/f-Regelung, Skalare drehmomentoptimale Regelung, wirkungsgradoptimale Regelung) für Asynchronmaschinen implementiert [9], [10]. Den prinzipiellen Aufbau des Prüfstands zeigt Abbildung 16. Die detaillierte Vorgehensweise ist in [10] dokumentiert.

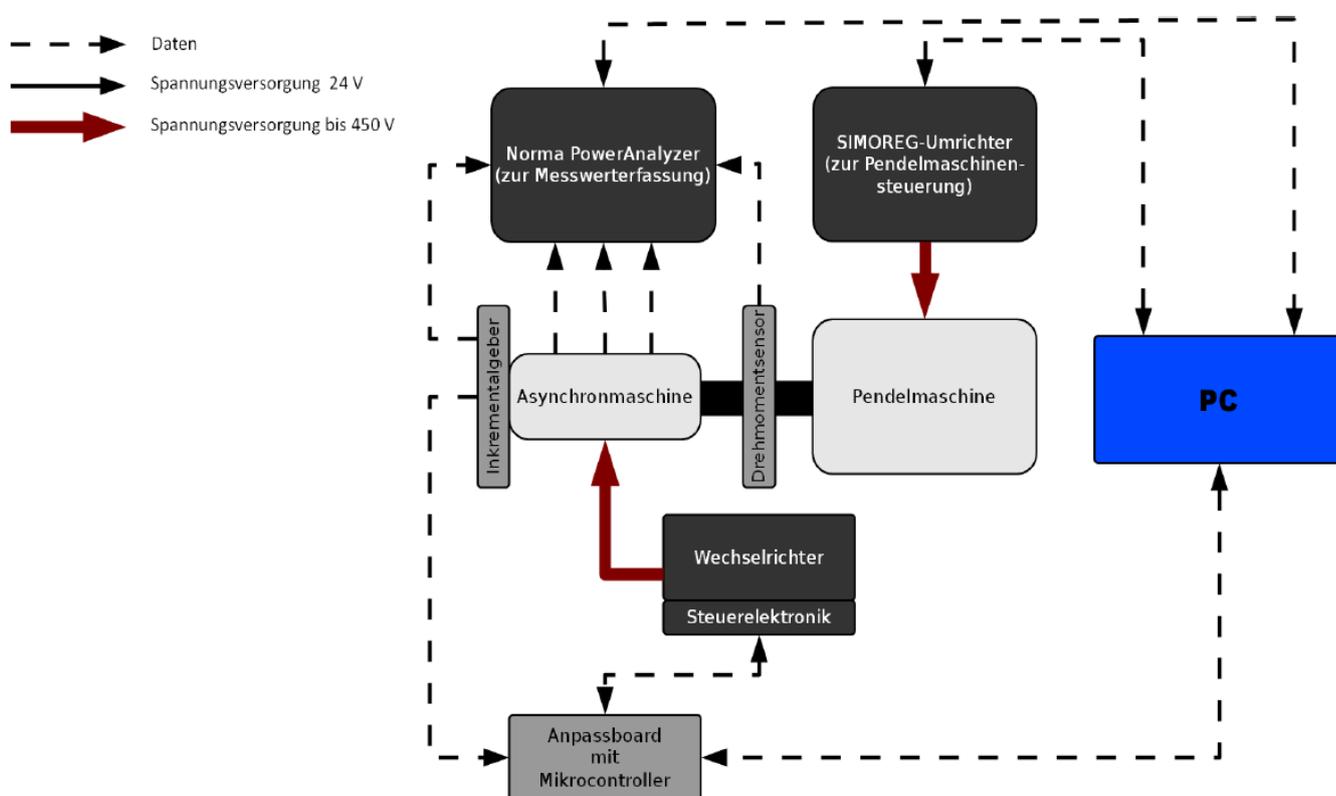


Abbildung 16: Schematischer Aufbau des Asynchronmaschinenprüfstands

Parallel wurden mit Hilfe von MATLAB/SIMULINK® Wirkungsgradkennfelder für die entworfenen Maschinen aus AP 2.3.3 simulativ erstellt, welche eine feldorientierte und wirkungsgradoptimale Regelung berücksichtigen. Die wirkungsgradoptimale Regelung basiert auf der Variation der Rotorfrequenz und führt zu einer Ausbalancierung der auftretenden Verluste und somit zu einer Wirkungsgradsteigerung. Abbildung 17 zeigt rechts das Wirkungsgradkennfeld mit feldorientierter Regelung und links mit wirkungsgradoptimaler Regelung für ASM 3. Zu erkennen ist, dass sich bei

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

der wirkungsgradoptimal geregelten Maschine der maximale Wirkungsgrad um einen Prozentpunkt erhöht, weiterhin kommt es zu einer Verschiebung des Wirkungsgradmaximums in Richtung niedriger Drehzahlen, währenddessen der Gradient in Richtung des Drehmoments zunimmt. Die gleichen Effekte sind auch im generatorischen Bereich zu sehen. Im Bereich der Teillast kann somit der Wirkungsgrad angehoben werden, was insbesondere für den Stadtverkehr von enormer Bedeutung ist.

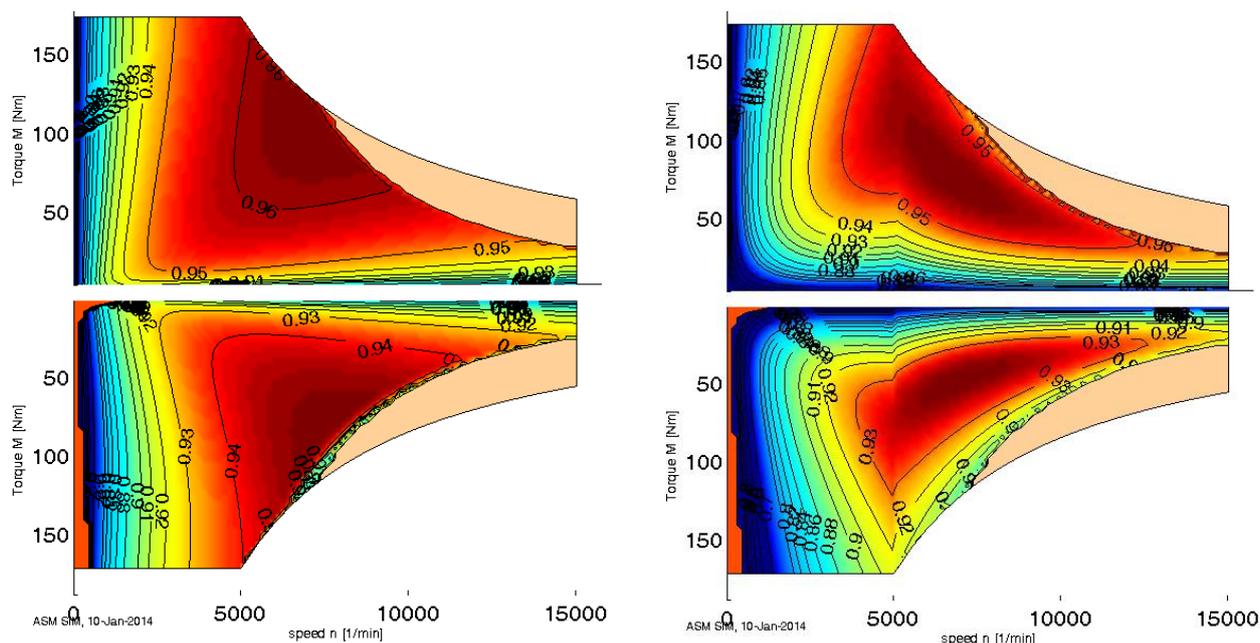


Abbildung 17: Wirkungsgradkennfelder; links wirkungsgradoptimale Regelung, rechts FOR

2.10 AP 2.7.1 – Sicherheit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit im Antriebsstrang (2. und 3. Projektjahr, 5 PM)

Im Rahmen der Untersuchungen zur Auslegung in AP 2.3.3 wurden Parameter ermittelt, die Aussagen über die Auswirkung von Fehlern der elektrischen Maschine auf die Belastung des Antriebsstranges ermöglichen. Dazu gehören die Überlastbarkeit der E-Maschinen, das thermische Verhalten und die Polradfestigkeit der fremderregten Synchronmaschine.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Überlastbarkeit der ASM 2

Es sei darauf verwiesen, dass die Maschine in keinem Betriebspunkt mit Kippmoment läuft. Somit bestehen für ein kurzzeitiges Boosten oder Lastsprünge Überlastungsreserven. Die Auswertung der entsprechenden Stromortskurve zeigt, dass z.B. im Eckpunkt (5000 1/min) das Kippmoment von 263 Nm mit einem Strom von 824 A erreicht wird.

Hieraus geht bereits hervor, dass die Überlastbarkeit durch die Stromgrenze des Wechselrichters und nicht durch die Maschine begrenzt wird. Wird eine kurzzeitige Stromgrenze von 450 A zugrunde gelegt, kann das maximal erreichbare Moment bis auf 186 Nm gesteigert werden.

Ebenso ist eine kurzzeitige Erhöhung der Überlastbarkeit durch Übermodulation des Wechselrichters möglich. Die dadurch erhöhte Grundschiebungsamplitude der Spannung führt zu einer Erhöhung des Kippmomentes proportional zum Quadrat der Grundschiebungsamplitude der Spannung und zu günstigeren Schlupfwerten (in den Grenzen der Sättigung), die kurzzeitig zur Drehmomenterhöhung genutzt werden kann [11].

Ein thermisch stabiler Betrieb ist bei diesen Betriebszuständen natürlich nicht möglich, da der Strom jenseits der thermischen Grenze liegt und durch die Übermodulation Zusatzverluste infolge von Stromüberschwingungen entstehen. Damit ist der Wirkungsgrad nicht mehr optimal, jedoch spielen diese Kurzzeitvorgänge bezüglich des Energieverbrauches keine Rolle.

Überlastbarkeit der ASM 3

Es sei darauf verwiesen, dass die Maschine in keinem Betriebspunkt mit Kippmoment läuft. Dies ist einfach der Optimierung auf den Wirkungsgrad geschuldet. Somit bestehen für ein kurzzeitiges Boosten oder Lastsprünge weite Überlastungsreserven. Die Auswertung der entsprechenden Stromortskurve zeigt, dass z.B. im Eckpunkt (5000 1/min) das Kippmoment von 243 Nm mit einem Strom von 679 A erreicht wird.

Hieraus geht bereits hervor, dass die Überlastbarkeit durch die Stromgrenze des Wechselrichters und nicht durch die Maschine selbst begrenzt wird. Wird eine kurzzeitige Stromgrenze von 450 A zugrundegelegt, kann das maximal erreichbare Moment bis auf 230 Nm ($U_s=133$ V) gesteigert werden. Auch hier ist der quadratische Einfluss der verfügbaren Spannungsreserve zu beachten.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Ebenso ist eine kurzzeitige Erhöhung der Überlastbarkeit durch Übermodulation des Wechselrichters möglich. Die dadurch erhöhte Grundswingungsamplitude der Spannung führt zu einer Erhöhung des Kippmomentes proportional zum Quadrat der Grundswingungsamplitude der Spannung und zu günstigeren Schlupfwerten (in den Grenzen der Sättigung), die kurzzeitig zur Drehmomenterhöhung genutzt werden kann [11].

Ein thermisch stabiler Betrieb ist bei diesen Betriebszuständen natürlich nicht möglich, da der Strom jenseits der thermischen Grenze liegt und durch die Übermodulation Zusatzverluste infolge von Stromoberschwingungen entstehen. Damit ist der Wirkungsgrad nicht mehr optimal, jedoch spielen diese Kurzzeitvorgänge bezüglich des Energieverbrauches praktisch keine Rolle.

Einsatz im Gesamtfahrzeugmodell

Im Rahmen der Auslegung von ASM 3 wurde die Maschine in eine vorhandene Gesamtfahrzeugumgebung, die einen Elektrosportwagen simulativ darstellt, eingebunden und eine Simulation unter Berücksichtigung des neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) durchgeführt.

Abbildung 18 zeigt die Drehmomente, Abbildung 19 die Maschinendrehzahlen während des Zyklus. Es ist zu erkennen, dass nur zu wenigen, kurzen Zeitpunkten ein Moment größer als das Nennmoment abgerufen wird. Wie in AP 2.2.3 bereits erwähnt, ist somit die thermische Stabilität während des Betriebs gesichert.

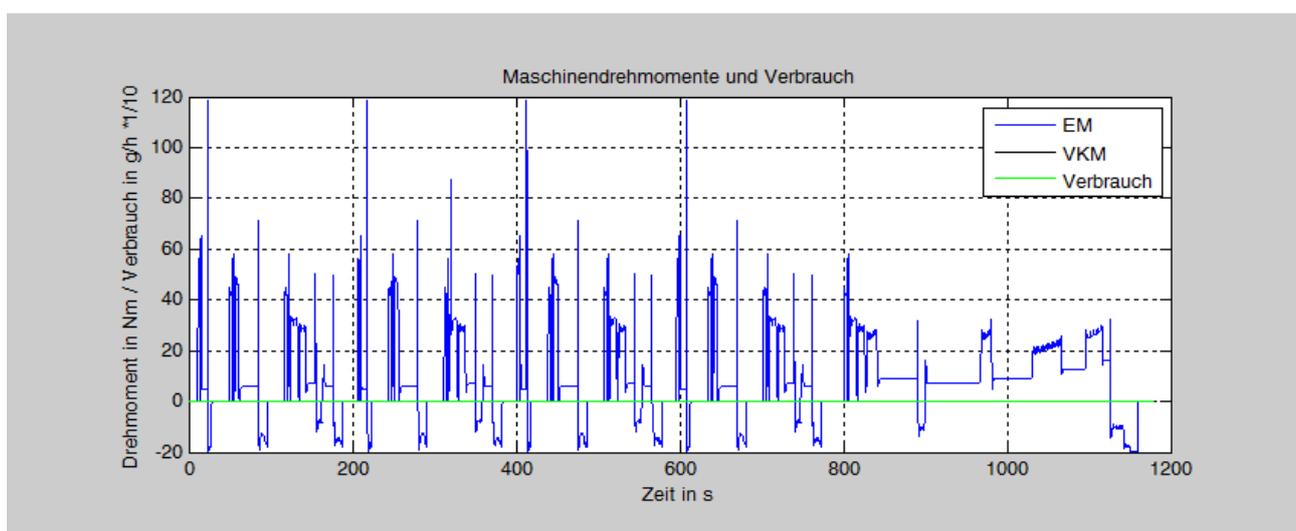


Abbildung 18: Maschinendrehmomente im NEFZ

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

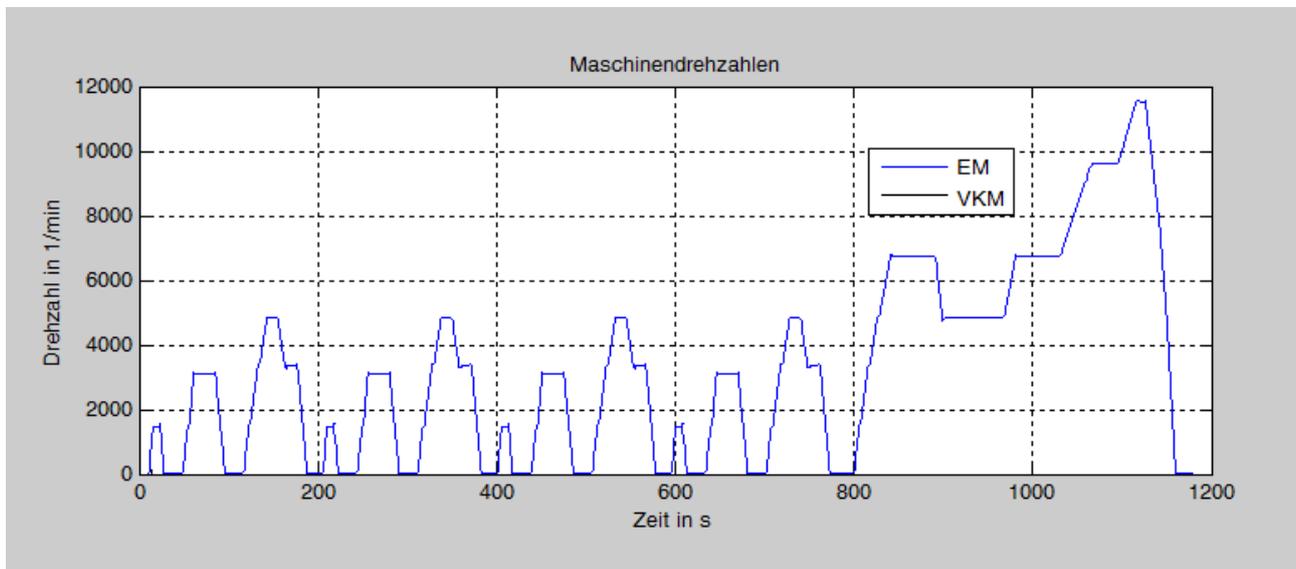


Abbildung 19: Maschinendrehzahlen im NEFZ

Thermisches Verhalten

Im Rahmen von [2] wurde ein Modell der ASM 1 mit der Software MATLAB/SIMULINK erstellt, um das thermische Verhalten der Maschine in verschiedenen Betriebspunkten (Stadtfahrt, Bergfahrt, Autobahnfahrt) zu analysieren. Die Untersuchungen zeigen, dass die thermischen Grenzen nach DIN 0530 Teil 1 nicht überschritten werden. Abbildung 20 zeigt exemplarisch die Nuttemperatur im Nennpunkt.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

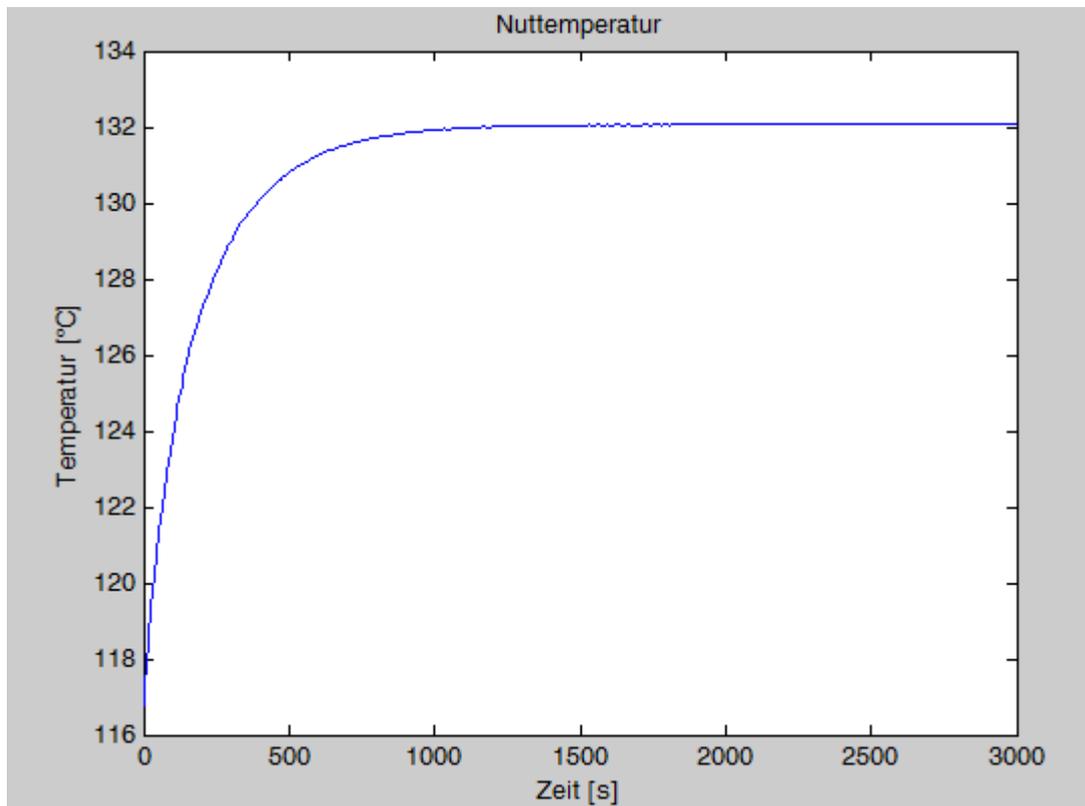


Abbildung 20: Nuttemperatur für ASM 1

Polradfestigkeit der fremderregten Synchronmaschine

Hinsichtlich der Festigkeit des Polrades ist zu beachten, dass bei der hier gewählten Schenkel-polstruktur sowohl die Wickelköpfe als auch das Rotorjoch festigkeitskritische Bauteile sind. Mit einem höherfesten Blech M330-35 HS mit einer Streckgrenze von 530 MPa, ergibt sich bei der für automobiler Anwendungen zu erwartenden Lastwechselzahl $< 1 \cdot 10^5$ für schwelende Belastung eine maximale Beanspruchung von 210 MPa bei 90% Überlebenswahrscheinlichkeit. Mit einem Sicherheitsfaktor von 1,2 (Auslegung mit FEM) ist die zulässige Vergleichsspannung im Blech bei Maximaldrehzahl $n_{\max} = 15000$ 1/min auf 175 MPa begrenzt.

Dabei wird vorausgesetzt, dass das Polrad auf die Rotorwelle aufgeschraubt ist und der Presssitz bis zur Abhebedrehzahl im Haftreibungsbereich bleibt. Die Abhebedrehzahl ist dann entsprechend EN 60034 die 1,2 fache Nenndrehzahl, also der übliche Wert für den Schleudertest. Die Wicklung im Polbereich stellt eine zusätzliche Last dar, von der angenommen wird, dass sie vollständig von den Polen aufgenommen werden muss.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Die Nachrechnung der im Joch sehr ungleichförmig verteilten Beanspruchungen führt auf einen Mindestdurchmesser des Rotorjoches von 64 mm. Infolge der am Außenrand des Joches ungleichförmig verteilten Lasten der einzelnen Pole ergibt sich sowohl hinsichtlich des Fugendruckes als auch der Tangentialspannungen am Innenrand des Joches eine ungleichförmige Verteilung der Spannungen. Diese ist in der Abbildung 21 erkennbar.

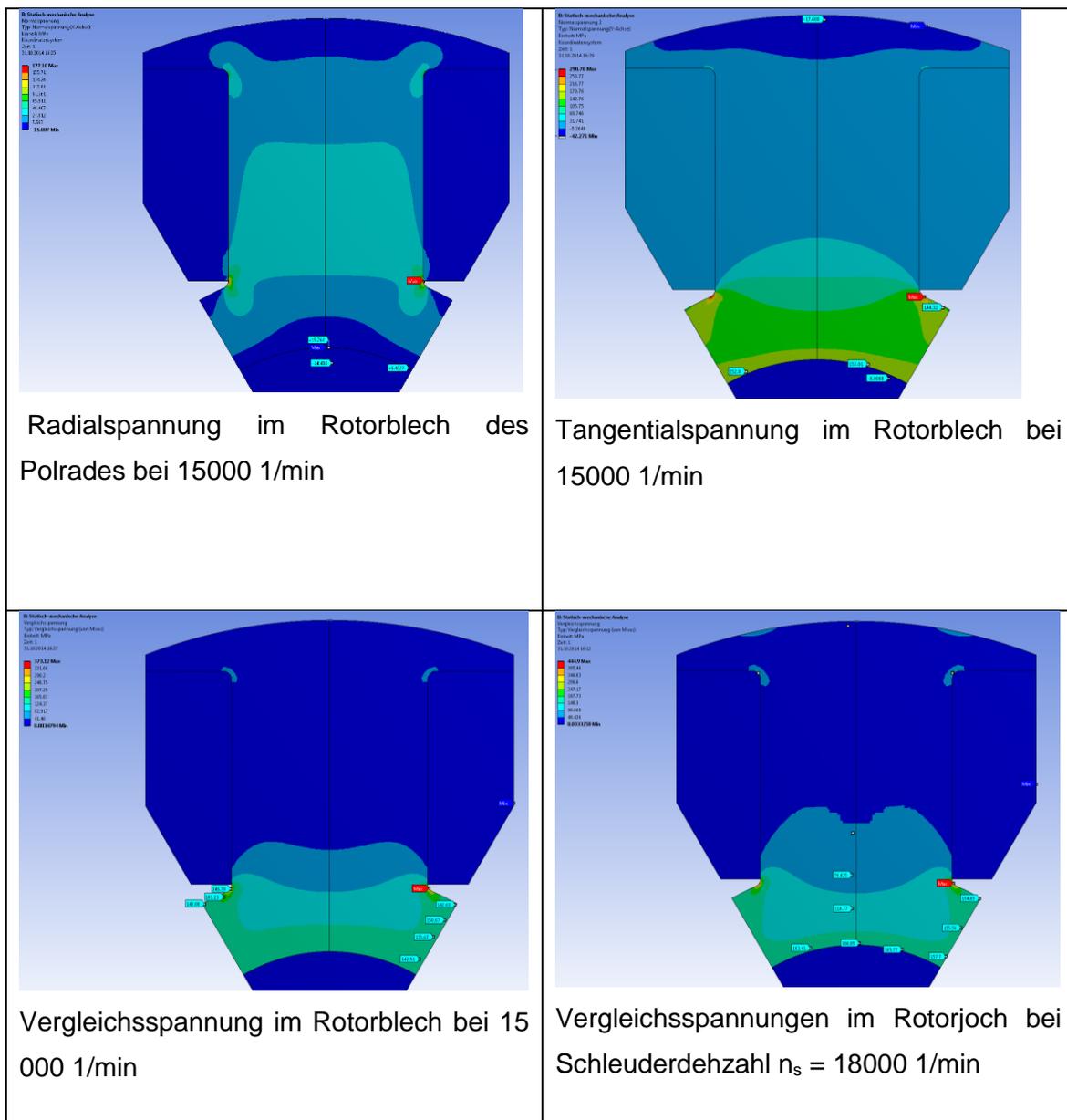


Abbildung 21: Festigkeitsuntersuchung FESM

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Während die Vergleichsspannungen im Rotorjoch selbst auch bei Schleuderdrehzahl unter der Festigkeitsgrenze für schwellende Beanspruchung liegen, zeigt sich der Kerbeffekt am Übergang Polschaft – Rotorjoch mit $\sigma_{\max} \approx 440$ MPa als kritischer und dimensionierender Faktor. Hier kann es sehr schnell zur Anrissbildung kommen. Der Kerbeffekt muss durch eine stärkere Verrundung des Überganges reduziert werden, was konstruktiv ohne weiteres möglich ist auch wenn dadurch der Wickelraum noch leicht eingeschränkt werden sollte. Dies kann über eine Erhöhung des aktuell konservativ angenommenen Füllfaktors kompensiert werden.

Die Wickelköpfe des Polrades dürfen durch die Fliehkraftverformung nicht zu einer zusätzlichen Belastung des Rotorbleches führen und müssen durch eine GFK/CFK Bandage separat abgefangen werden. Die Mischbauweise mit einem GFK Wickel als Unterlage für eine aufzupressende CFK Bandage hat den Vorteil, dass die leicht leitfähige CFK Bandage gegen das Polrad isoliert ist und einem maßhaltigen Widerlager gegenüber steht.

Unter Berücksichtigung der empfohlenen konstruktiven Änderungen ist einem Einsatz im automobilen Bereich nichts entgegenzusetzen.

2.11 AP 2.7.2 – Geräusch, Vibration und Komfort, NVH (1PM)

Bei Asynchronmaschinen spielt der Themenkreis NVH nur eine untergeordnete Rolle. Die Maschinen werden prinzipbedingt mit sinusförmigen Strömen betrieben, so dass das Oberwellenspektrum, das Geräusche anregen könnte, überschaubar bleibt. Der als mechanische Resonanz des Statorjoches gefürchtete "magnetische Lärm" lässt sich durch Beachtung der seit langem bekannten Auslegungsregel [12] beherrschen. Diese Regeln kamen auch anbei den hier vorgestellten Entwürfen zur Anwendung.

Wegen der Forderung nach sinusförmigen Strömen bei Asynchronmotoren sind die heute verfügbaren Wechselrichter so aufgebaut, dass eine ausreichend große Taktfrequenz zur Verfügung steht, die nur zu minimalen Stromüberschwingungen führt, so dass die hieraus folgenden Feldoberwellen mit der Grundpolteilung so energiearm sind, dass sie für eine Geräuschanregung meist nicht ausreichen. Mit den heute möglichen Taktfrequenzen ≥ 16 kHz liegen diese Geräte zudem auch über der Hörschwelle, so dass auch die Schwingungen der magnetischen Bauelemente wie Drosseln oder du/dt Filter nicht mehr wahrgenommen werden.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

3 Literaturverzeichnis

- [1] W.-R. Canders und A.-L. Menn, „Entwurf Asynchronmaschine - Optimierung des Wirkungsgrads,“ Braunschweig, 2012.
- [2] W.-R. Canders und A.-L. Menn, „Entwurf Asynchronmaschine - Entwurf für den Design Freeze,“ Braunschweig, 2012.
- [3] W.-R. Canders und A.-L. Menn, „Entwurf Asynchronmaschine - Entwurf für den Design Freeze mit verkürztem Paket,“ Braunschweig, 2012.
- [4] S. Sadiku und B. Witt, *Prozesstechnologie zur Herstellung von Elektromotoren für Hybrid und Elektrofahrzeuge*, München: expert-Verlag, 2009.
- [5] K. Vogt, *Berechnung elektrischer Maschinen*, Weinheim : VCH, 1996 .
- [6] R. Müller, *Auslegung einer elektrisch erregten Synchronmaschine für ein Elektrofahrzeug*, Braunschweig: TU Braunschweig, 2014.
- [7] H. Eckhardt, *Grundzüge der elektrischen Maschinen*, Stuttgart: Teubner , 1982.
- [8] M. Klinge, *Entwicklung eines thermischen Modells für eine Asynchronmaschine als Fahrantrieb eines Elektrotransportwagens*, Braunschweig: TU Braunschweig, 2013.
- [9] A.-L. Menn, W.-R. Canders und M. Henke, „Holistic Analytical Design of Induction Motors of Automotive Applications,“ Monte Carlo , 2014.
- [10] D. Kütke, *Inbetriebnahme eines Wechselrichters und Implementierung verschiedener Regelkonzepte für Asynchronmaschinen*, Braunschweig: TU Braunschweig, 2012.
- [11] H. May, W.-R. Canders und N. Lescow, *Leistungssteigerung der ASM durch optimierte Wechselrichterspeisung*, Bde. %1 von %2Haus der Technik, Praxis der elektrischen Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge , München : expert-Verlag, 2009.
- [12] H. Jordan, *Geräuscharme Elektromotoren*, Essen : Giradet, 1950 .
- [13] W.-R. Canders, „Baukasten für die Asynchronmaschine,“ Braunschweig , 2014.
- [14] W.-R. Canders, „Entwurf für die fremderregte Synchronmaschine,“ Braunschweig, 2014.

e-generation - Teilvorhaben „E-Maschinen“

Braunschweig, den 24.06.2015

Prof. Dr.-Ing. M. Henke