

Inhalt

1	Kurzdarstellung des Teilvorhabens	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8
2	Eingehende Darstellung	8
2.1	Erzieltes Ergebnis	8
2.1.1	Projektierung eines TFM als Radnabenantrieb	8
2.1.2	Elektromagnetische Optimierung	10
2.1.3	Prüfstandsversuche	12
2.1.4	Erarbeitung einer Strategie zum verlustminimalen Betrieb von Mehrfachantrieben	13
2.1.5	Inbetriebnahme des Doppelantriebs und Feldversuche	14
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	15
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	16
2.4	Voraussichtlicher Nutzen – insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	16
2.5	Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens.....	16
2.6	Veröffentlichung des Ergebnisses	17

1 Kurzdarstellung des Teilvorhabens

Ziel des Gesamtvorhabens war es, ein Lastenrad mit einem intelligenten Doppelantrieb auszustatten. Dadurch sollte ein Betrieb als S-Pedelec, d.h. mit einer elektrischen Motorunterstützung bis 45 km/h, ermöglicht werden.

Das Projekt wurde in Kooperation mit zwei Industriepartnern durchgeführt:

- Binova GmbH. Die Firma mit Sitz in Glashütte/Schlottwitz entwickelt Pedelec-Antriebssysteme. Zu Projektbeginn verfügte die Firma über ein Mittelmotor-System, welches allerdings zu leistungsschwach war, um ein S-Pedelec-Lastenrad anzutreiben.
- Urban-e GmbH & Co. KG. Die Firma, ebenfalls mit Sitz in Glashütte/Schlottwitz, stellt Lastenräder mit einem elektrischen Antriebsstrang aus und vertreibt diese. Die Einzelkomponenten, darunter der Lastenradrahmen sowie das Antriebssystem, werden von unterschiedlichen Quellen bezogen. Die Montage findet in der betriebseigenen Werkstatt statt. Zu Projektbeginn hatte Urban-e kein S-Pedelec-Lastenrad im Angebot.

1.1 Aufgabenstellung

Innerhalb des Gesamtprojektes wurde der Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe (EMA) mit folgenden Teilaufgaben betraut:

- 1) Auslegung eines permanenterregten Transversalflussmotors (TFM), welcher zusammen mit einer Steuerungsplatine in der Vorderradnabe des Lastenrades unterzubringen war.
- 2) Ausarbeitung eines Steuerungsalgorithmus, welcher eine verlustminimale Aufteilung der Antriebsleistung zwischen dem TFM und dem Mittelmotor errechnen sollte.

Bild 1 zeigt die wesentlichen Komponenten des geplanten S-Pedelec-Antriebs. Der Mittelmotor samt zugehöriger Steuerungsplatine wurde von Binova bereitgestellt. Die Entwicklung der Steuerungsplatine für den TFM war Bestandteil eines Unterauftrags der Firma Binova an den Lehrstuhl EMA. Für die Kommunikation zwischen Mittel- und Vorderantrieb war ein LIN-Bussystem (Local Interconnect Network) vorgesehen. Gemäß Aufgabenpunkt 2 sollten sich beide Antriebe, abhängig von der Fahrsituation, über die optimale Aufteilung der aufzubringenden Vortriebskraft abstimmen, so dass die Gesamtverlustleistung minimal wird.

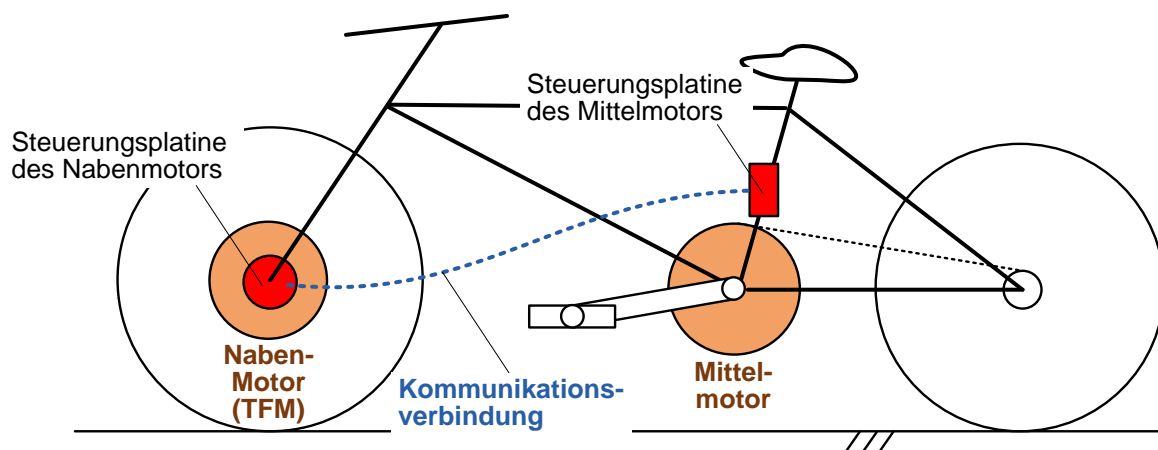


Bild 1: Übersicht über die Komponenten des Antriebssystems

Als Topologie für den Nabenmotor wurde ein TFM in Flusssammlerbauweise ausgewählt. Der Aufbau ist in Bild 2 dargestellt. Nach den Grundüberlegungen zur Struktur des aktiven Bereichs galt es, einen den Anforderungen entsprechenden elektromagnetischen Entwurf anzufertigen. Die aus der Berechnung resultierenden konstruktiven Parameter wurden an Binova weitergeleitet. Dort fanden sowohl Konstruktion als auch Fertigung statt. Abschließend sollte der theoretische Entwurf anhand experimenteller Versuche evaluiert werden. Als Ziel galt es, die TFM-Prototypen zunächst auf dem Prüfstand bei Binova, danach in einem gemäß Bild 1 ausgestatteten Lastenrad zu erproben.

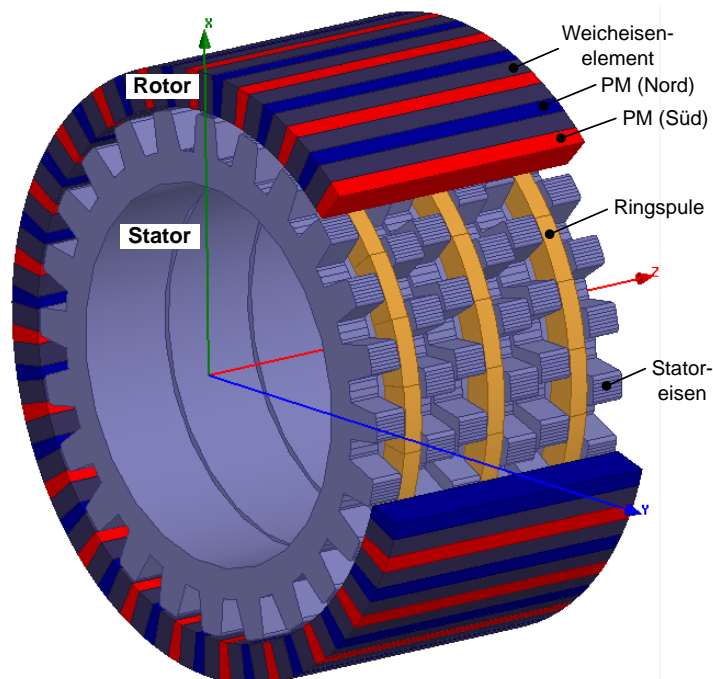


Bild 2: Aufbau des elektromagnetisch aktiven Bereichs des TFM

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Idee des Vorhabens entstand aus dem Wunsch der Binova GmbH, ein Antriebssystem für S-Pedelecs anzubieten. Durch die enge Kooperation mit Urban-e stand zugleich ein möglicher erster Abnehmer bereit.

Für den Lehrstuhl EMA ergab sich durch das Vorhaben die Gelegenheit, seine Kompetenz im Bereich der Auslegung von Fahrmotoren anzuwenden und zu erweitern. Die theoretische Behandlung von Fahrmotoren ist komplex, da diese nicht stationär in einem fest definierten Arbeitspunkt betrieben werden. Stattdessen bildet ein repräsentativer Fahrzyklus die Grundlage für das Anforderungsprofil. Daraus resultieren eine Vielzahl von Anforderungen, die durch ein adäquates elektromagnetisches Design erfüllt werden müssen.

Desweiteren beschäftigt sich der Lehrstuhl EMA seit längerer Zeit mit Motortopologien, in denen der magnetische Fluss durch neuartige Pulververbundwerkstoffe geführt wird. Dadurch ergeben sich eine Reihe neuer Motorvarianten, die bei entsprechender Optimierung Vorteile in Bezug auf die erzielbare Drehmomentdichte aufweisen. Das Projekt versprach daher wichtige Einblicke in die praktische Realisierung solcher Motoren, angefangen bei der Spezifikation der Materialien bis zu den Montageprozessen.

Da sich der Beitrag des Lehrstuhls EMA größtenteils auf theoretische Aufgabenstellungen beschränkte, wurden zu Projektbeginn folgende Voraussetzungen als gegeben betrachtet:

- Die Industriepartner stellen sämtliche benötigte Hardware (angefangen beim Lastenrad bis zu den Steuerungsplatinen) bereit.
- Die Binova GmbH ist in der Lage, bei fristgerechter Fertigstellung des theoretischen Entwurfs funktionsfähige Prototypen des TFM anzufertigen.

- Die Binova GmbH wird rechtzeitig ihren Motorprüfstand aufbauen, so dass die messtechnische Evaluierung des TFM erfolgen kann.
- Urban-e sorgt als Projektleiter dafür, dass dringend benötigte Informationen (bspw. zur Erstellung von Spezifikationen) zeitnah eingeholt und verteilt werden.
- In Anbetracht der kurzen Projektlaufzeit wurde vorausgesetzt, dass die theoretisch erarbeiteten Vorgaben nach der praktischen Realisierung sofort zum Erfolg führen, d.h. es waren keine Korrekturschleifen vorgesehen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die erste Planung bezog sich auf die ursprünglich vereinbarte Laufzeit vom 15.08.2013 bis zum 15.04.2014. Aufgrund von Terminverzögerungen sowie einer unklaren Patentsituation zum TFM wurde am 27.02.2014 einer kostenneutralen Verlängerung bis zum 31.10.2014 stattgegeben.

Als erster und einziger Meilenstein wurde der Moment festgesetzt, an dem das Lastenrad zum ersten Mal mit beiden Antrieben bestückt und funktionsbereit ist. Ursprünglich sollte dieses Zwischenziel nach sechs Monaten Laufzeit, d.h. zum 15.02.2014, erreicht sein. Im Rahmen der Verlängerung wurde der Meilenstein auf den 30.05.2014 terminiert. Darüber hinaus wurde beschlossen, dass der Doppelantrieb zunächst unter Verwendung eines am Markt erhältlichen Nabenmotors aufgebaut wird.

In Summe bestand der Anteil des Lehrstuhls EMA aus sechs Arbeitspunkten, die im Folgenden aufgelistet sind. Darunter sind jeweils die Zeitspanne der Bearbeitung sowie die zugrundeliegenden Zwischenberichte mit angegeben.

- AP1) Analyse anwendungsspezifischer Belastungszyklen und deren Einbeziehung in eine Antriebsprojektierung,
08/2013 – 10/2013,
s. Zwischenbericht Nr. *01-2013*.
- AP2) Modellbildung und Dimensionierung von hochkompaktem Nabenmotor,
08/2013 – 12/2013,
s. Zwischenbericht Nr. *01-2013*.
- AP3) Variantenbewertung und Ableitung der Antriebscharakteristika,
10/2013 – 01/2014,
s. Zwischenbericht Nr. *01-2013*.
- AP4) Evaluierung des Motorentwurfs am Prüfstand,
09/2013 – 10/2014,
s. Zwischenberichte Nr. *05-2014, 06-2014, 07-2014*.
- AP5) Erarbeitung von Strategien zur optimalen Abstimmung von Mehrfachantrieben,
12/2013 – 08/2014,
s. Zwischenberichte Nr. *04-2014, 06-2014*.
- AP6) Labor- und feldtestbasiertes Komponentenprüfsystem,
02/2014 – 10/2014,
s. Zwischenberichte Nr. *03-2014, 06-2014*.

Im Verlauf der Fertigung der ersten TFM-Prototypen wurde Binova mit zahlreichen praktischen Problemstellungen des Elektromaschinenbaus konfrontiert. Dazu gehörten Montagefehler beim Einsetzen der Permanentmagnete sowie das Auftreten von Kurzschlüssen. Da-

rüber hinaus wurden regelmäßig Motorkomponenten durch den Montageprozess beschädigt. Letztendlich stand der erste und zugleich einzige TFM erst im September 2014 bereit. Parallel dazu dauerte die Inbetriebnahme des Motorprüfstands deutlich länger als erwartet. Um den AP4 abzuarbeiten, wurde der fertiggestellte TFM daher zunächst auf den Prüfstand gebracht. Da die Tests bis zum Ende der Laufzeit andauerten, wurde der TFM nicht mehr in das Lastenrad integriert und damit der Meilenstein 1 nicht erreicht.

Dennoch wurde im Juni 2014 ein Doppelantriebssystem in Betrieb genommen, allerdings wurde dazu statt des TFM ein herkömmlicher Pedelec-Nabenmotor verbaut. Die Tests hierzu demonstrierten die Funktionsfähigkeit der signaltechnischen Kopplung der Antriebe.

Ebenso wurde anhand der Prüfstandsversuche der theoretische Entwurf des TFM validiert. Die Maschine drehte leise und erzeugte im geregelten Betrieb ein über der Zeit konstantes Drehmoment. Die leichten Abweichungen zwischen den prognostizierten und den real festgestellten Maschinenparametern wurden auf Fertigungs- bzw. Montagetoleranzen sowie auf Abweichungen von den spezifizierten Werkstoffkennwerten zurückgeführt.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Elektrifizierung von Zweirädern ist von wissenschaftlicher Seite her bislang nur sehr geringfügig dokumentiert. In [Mü07] wird ein informativer Überblick über die üblichen Leistungsparameter, die Klassifizierung, die Motorisierung, das Anforderungsprofil und die Batterieausstattung gegeben. Technisch verwertbare konkrete Informationen zur Antriebstechnik werden allerdings nicht gegeben. In Verbindung mit der Entwicklung einer Transversalflussmaschine wird in [Po12] die Anwendung dieses Maschinentyps in einem Pedelec als Hinteradantrieb beschrieben. Im Bestpunkt weist der Motor einen Wirkungsgrad von 88 % auf.

Das Gebiet der Transversalflussmaschinen (TFM) ist besonders intensiv in den 80-90er Jahren wissenschaftlich behandelt worden. Originäre Arbeiten wurden dazu in Deutschland durchgeführt an:

- TU Braunschweig, Lehrstuhl Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen, Prof. Weh, Prof. Canders
- RWTH Aachen, Lehrstuhl Elektrische Maschinen, Prof. Henneberger
- TU München, Lehrstuhl Elektrische Maschinen, Prof. Lorenzen
- Uni Erlangen, Lehrstuhl Elektrische Antriebe und Steuerungen, Prof. Pfaff
- Uni Bremen, Lehrstuhl Elektrische Antriebstechnik, Prof. Orlik
- Uni Stuttgart, Lehrstuhl Elektrische Maschinen, Prof. Parspour

TU Braunschweig, Lehrstuhl Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen, Prof. Weh

Sehr umfassende und grundlegende Arbeiten wurden über 2 Jahrzehnte an der TU Braunschweig durchgeführt. Vorrangig wurden Transversalflussmaschinen mit Permanentmagneten untersucht [We88], [Ji88], [Ja94], [Ga94], [Be97].

RWTH Aachen, Lehrstuhl Elektrische Maschinen, Prof. Henneberger

Für Daimler Chrysler Bahnsysteme wurde an der RWTH Aachen eine Transversalflussmaschine für einen Direktantrieb in Bahnanwendungen entwickelt [Bli00]. Der Motor war in synchroner Bauweise mit Permanentmagneten ausgeführt.

Uni Erlangen, Lehrstuhl Elektrische Antriebe und Steuerungen, Prof. Pfaff

Eine TFM in geschalteter Reluktanzausführung stellt eine Arbeit aus Erlangen [Kru00] vor.

Uni Bremen, Lehrstuhl Elektrische Antriebssysteme und Leistungselektronik, Prof. Orlik

Über mehrere Jahre wurde ein Forschungsprojekt zu Transversalflussmaschinen für Stellantriebe von der DFG gefördert. Eine Dissertation liegt bisher nicht vor.

Uni Stuttgart, Lehrstuhl elektrische Maschinen, Prof Parspour

Die Forschungen laufen erst seit etwa 3 Jahren. Es liegen einige Veröffentlichungen zum Entwurf und zur Simulation vor.

Industrie

Im Industriebereich hat die Transversalflussmaschine auch ein vorübergehend starkes Interesse gefunden, vgl. [La02], wo berichtet wird von einem 150-kW-Traktionsmotor mit einem maximalen Anfahrmoment von 2750 Nm und einer Höchstdrehzahl von 2400 U/min, wie er zur Zeit bei Voith Turbo zur Serienreife entwickelt wird. Bei einem maximalen Durchmesser von 510 mm, einer Länge von 435 mm und einer Masse von ca. 200 kg wird er die herkömmlichen Maschinenarten aus einigen Anwendungen verdrängen können. Weitere Vorteile dieser neu entwickelten Technologie sind hoher Wirkungsgrad, in allen Betriebspunkten niedriges Drehzahlniveau, dadurch Verzicht auf schnelllaufende Getriebestufen, Kurzschlussstrom kleiner gleich Bemessungsstrom, dadurch uneingeschränkt feldschwächfähig, keine Begrenzung durch Zwischenkreisspannung, mittlere gravimetrische Leistungsdichte 0,75 kW/kg bis 1,25 kW/kg im Leistungsbereich 75 ... 300 kW, kostengünstig herstellbar aufgrund Einsatz neuartiger weichmagnetischer Pulververbundwerkstoffe.

Weitere Aktivitäten sind von Voith Siemens im Kraftwerksbereich (Windgeneratoren) und bei Siemens im Traktionsbereich (Fahrtrieb) bekannt geworden [La02]. Die Fa. Compact Dynamics hat jüngst eine PM-Transversalflussmaschine von 10 kW vorgestellt, die allerdings wassergekühlt betrieben werden muss.

Realistische effektive mittlere Kraftdichten von 50 – 80 kN/m² wurden erstmals von Leitgeb in [Le95] angegeben, die die physikalisch ausnutzbaren Grenzen gegenüber den theoretischen Werten nach Weh [We96] von über 200 kN/m² aufzeigen und die die für die Praxis ansetzbaren Ausnutzungsziffern korrigieren.

Literatur

- [Be97] Beyer, S.: Untersuchungen am magnetischen Kreis der permanentmagneterregten Transversalflußmaschine in Sammler-Bauweise. Dissertation 1997, TU Braunschweig, Institut Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen.
- [Bli00] Blissenbach, R.; Henneberger, G.; Schäfer, U.; Hackmann, W.: Development of a transverse flux traction motor in a direct drive system. Int. Conf. on Electric Machines, ICEM 2000. Proceedings pp.1457-1460.
- [Ga94] Gao, H.: Numerisches Berechnungsverfahren für Synchronmaschinen in Transversalfluß-Bauweise. Dissertation 1994, TU Braunschweig, Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IMAB)
- [Ja94] Jajtic, Z.: Vortriebskraftoptimierung bei der elektrisch erregten Transversalflußmaschine. Dissertation 1994, TU Braunschweig, Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IMAB)
- [Ji88] Jianzong, H.: Analytische und dreidimensionale numerische Berechnung von Transversalflussmaschinen. TU Braunschweig, Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IMAB)
- [Kru00] Kruse, R.: Entwurfsverfahren für Transversalfluß-Reluktanzmotoren. Dissertation 2000, Uni Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl Elektrische Antriebe und Steuerungen.
- [La02] Lange, A.: Transversalflußmaschinen in Fahrzeugantrieben. Braunschweiger Symposium Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, 1, in: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik * Band 484 (2002) Seite 90-100 (11 Seiten, Düsseldorf: VDI-Verlag
- [Le95] Leitgeb, W.: Die Grenzen für den Drehschub von Transversalflußmaschinen. *Elektrie*, Bd. 49, (1995) H.1/2, S. 26-35
- [Mü07] Mütze, A.; Tan, Y.C.: Electric Bicycles. *IEEE Industry Applications Magazine* July/August 2007. pp.12-21
- [Po12] Pompermaier, C.; Sjöberg, L.; Nord, G.: Design and Optimization of a Permanent Magnet Transverse Flux Machine. XX. Int. Conf. on Electric Machines, ICEM 2012 2012, pp. 606-611

- [We88]Weh, H.; Jiang, J.: Berechnungsgrundlagen für Transversalflussmaschinen. Archiv für Elektrotechnik Bd. 71 (1988), H.3, S. 187-199
- [We96]Weh, H.: Ten Years of Research in the Field of High Force Density-Transvers Flux Machines. SPEEDAM 1996 pp. A3.1 – A3.8

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Abgesehen von der Zusammenarbeit mit den Industriepartnern gab es auf Seiten des Lehrstuhls EMA keine weiteren Kooperationen.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzieltes Ergebnis

2.1.1 Projektierung eines TFM als Radnabenantrieb

Ein Pedelec-Radnabenmotor muss einer Fülle von Anforderungen gerecht werden. Im Sinne einer systematischen Herangehensweise wurden die wichtigsten Merkmale der Reihe nach festgeschrieben:

- **Bauraum:** Die Ausdehnung des TFM ist in radialer Richtung durch den an der Gabel angebrachten Bremsblock eingeschränkt, s. Bild 3. Zur Quantifizierung des größtmöglichen Gehäusedurchmessers wurden sämtliche Bauarten von Bremsblöcken analysiert. In axialer Richtung darf die TFM bis auf wenige Millimeter an die Bremsscheibe heranreichen.

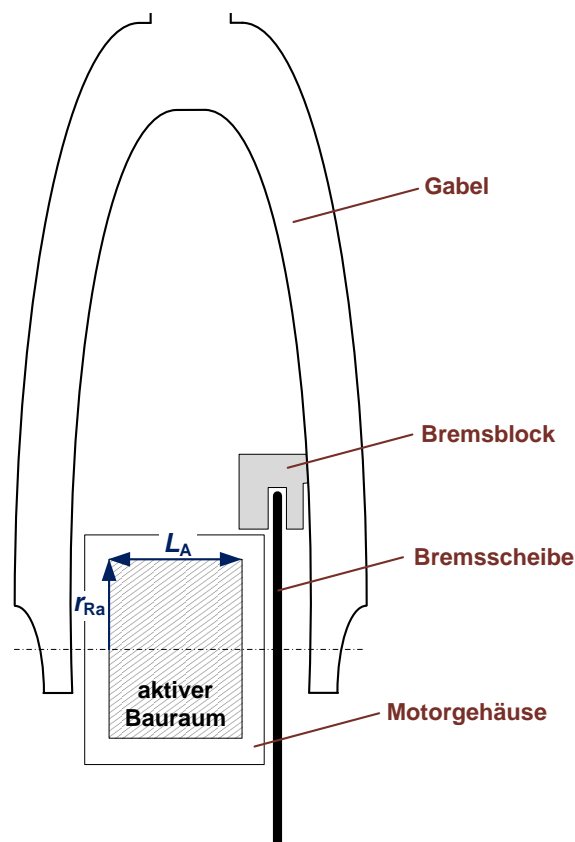


Bild 3: Skizze zur Bauraumsituation

- Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie.** Zwecks einer Referenzkennlinie wurde der bisher von Urban-e eingesetzte Pedelec-Motor herangezogen. Nach Ermittlung seiner Parameter wurde die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie rechenstechnisch bestimmt. Gleichzeitig wurde auf Basis des ersten elektromagnetischen Vorentwurfes die zu erwartende Kennlinie des TFM berechnet. Beide Kennlinien sind zusammen mit der Lastkennlinie bei ebener Fahrt in Bild 4 eingezeichnet. Man erkennt, dass beide Motoren im wichtigen Geschwindigkeitsbereich zwischen 25 km/h und 35 km/h ein ähnliches maximales Drehmoment erzeugen können. Bei hohen Drehzahlen fällt das Drehmoment der TFM flacher ab, um dem geplanten Betrieb bis 45 km/h Rechnung zu tragen. Bei geringen Drehzahlen ist das stationär generierbare Drehmoment der TFM geringer. Die Differenz kann durch den kurzzeitigen Überlastbetrieb oder die Unterstützung durch den Mittelmotor ausgeglichen werden.

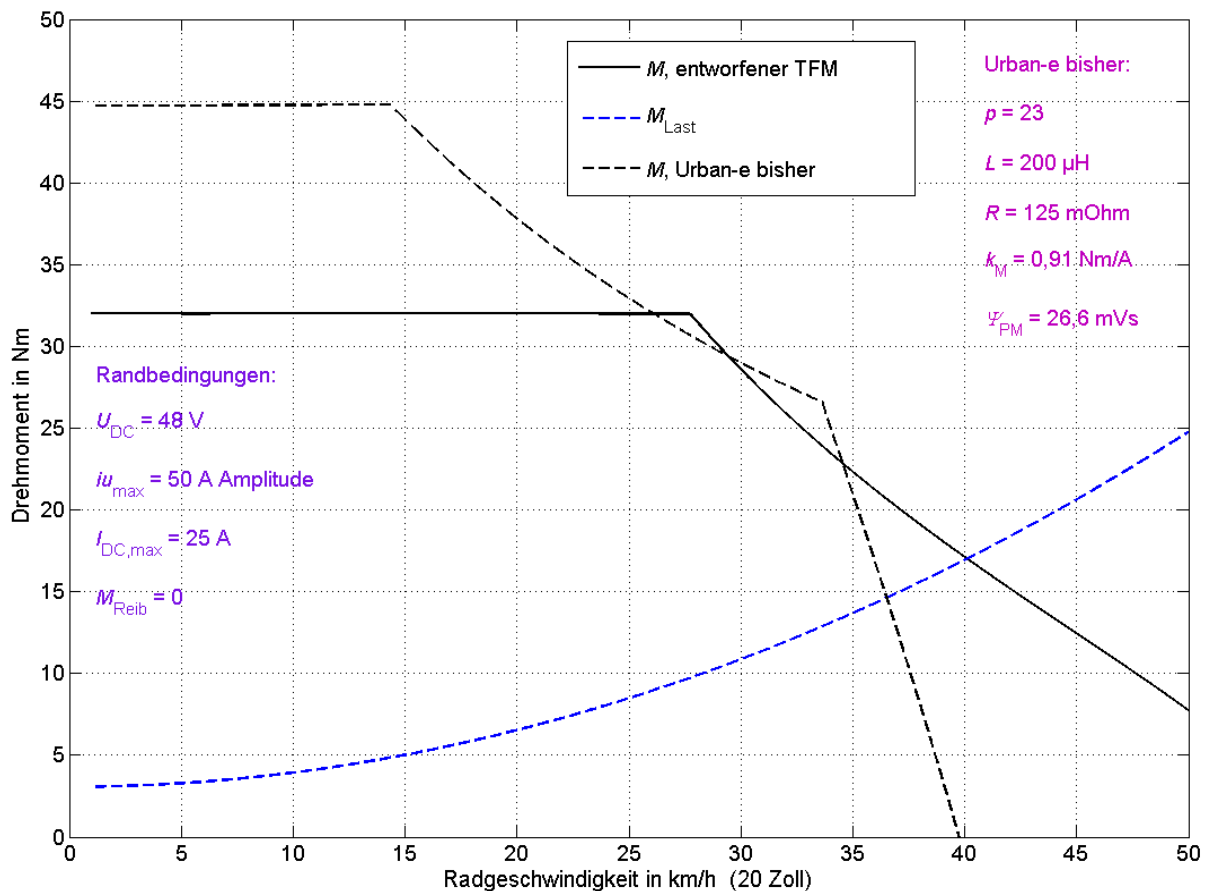


Bild 4: Kennlinie des bisherigen Pedelec-Motors von Urban-e (*Urban-e bisher*), der Transversalflossmaschine (*entworfenen TFM*) sowie die simulierte Lastkennlinie bei ebenem Streckenverlauf (M_{Last})

- Definition von Zielkennwerten.** Neben Referenzwerten zum Drehmoment und mechanischer Abgabeleistung bestehen Vorgaben zu Masse, Wirkungsgrad, Rast- und Pendelmomenten, s. Tabelle 1.

Tabelle 1: Zielkennwerte Nabenmotor

Bemessungsleistung ($M = 13,1 \text{ Nm}$, $\omega_{me} = 38,3 \text{ rad/s}$, $v_{Rad} = 35 \text{ km/h}$)	500 W
Motorwirkungsgrad im Bemessungspunkt	$\geq 80 \%$
Anfahrdrehmoment bei 720 W elektrischer Aufnahmeleistung für mind. 10 Sekunden ($\omega_{me} = 0$, $U_{DC} = 48 \text{ V}$, $I_{DC} = 15 \text{ A}$)	$\geq 30 \text{ Nm}$
minimale Radgeschwindigkeit, bei der noch 500 W dauerhafte me- chanische Abgabeleistung erzeugt werden	20 km/h
Masse des Motors inklusive Gehäuse	$\leq 4,5 \text{ kg}$
Kennzahl f_{opt}	$\geq 8 \text{ VAs}^2$
Amplitude des Rastmomentes	$\leq 3 \text{ Nm}$
THD-Wert des Phasenstroms	$\leq 2 \%$
HD-Wert der Permanentmagnetflussverkettung	$\leq 2 \%$

2.1.2 Elektromagnetische Optimierung

Ausgehend von der Grobgeometrie aus Bild 2 bestand der elektromagnetische Auslegungsprozess im Wesentlichen aus der Optimierung mittels numerischer Feldberechnung. Dazu wurde zunächst ein Optimierungskriterium festgelegt, um das Zwischenergebnis nach jedem Berechnungszyklus bewerten zu können. Der Ansatz zielt darauf ab, den TFM insbesondere auf den Bereich niedriger Drehzahlen und hoher Drehmomente abzustimmen. Im Gegensatz zu gewöhnlichen Pedelecs befindet sich das Lastenrad häufiger in diesem Bereich der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie, da die Fahrt regelmäßigen Start-Stopp-Zyklen unterliegt. Zudem ergibt sich aufgrund der zulässigen Nutzlast von 100 kg ein größeres Trägheitsmoment. Aus den analytischen Beziehungen für Drehmoment und Kupferverluste resultiert die Kennzahl

$$f_{opt} = \frac{k_M^2}{R}, \quad (1.1)$$

welche es zu maximieren gilt. Dabei bezeichnet k_M die Drehmomentkonstante in Nm/A und R den elektrischen Widerstand eines Strangs. Verbal formuliert, ist der magnetische Kreis so zu gestalten, dass eine große Permanentmagnetflussverkettung bei gleichzeitig großem Nutquerschnitt resultiert. Der Vorteil der Methode ist, dass die Finite-Elemente-Simulationen zunächst im Leerlauf durchgeführt werden können. Darüber hinaus ist f_{opt} unabhängig von der Windungszahl. Diese kann im Anschluss an die Simulationen so gewählt werden, dass die gewünschte Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie entsteht.

Bild 5 zeigt den für die numerische Rechnung verwendeten Symmetrieabschnitt des TFM. Die Abkürzung SMC steht für Soft Magnetic Composites und bezeichnet den weichmagnetischen Pulververbundwerkstoff, aus dem der Eisenkreis besteht. Die numerische Rechnung wurde jeweils für einen Zeitpunkt, d.h. magnetostatisch durchgeführt. Um den Permanentmagnetflussverlauf entlang einer elektrischen Periode zu erhalten, wurde der Rotor nach dem Durchlauf einer Simulation um 10° (elektrisch) gedreht.

Obwohl die Geometrie des aktiven Bereichs komplex ist, zeigt der Permanentmagnetfluss gemäß Bild 6 einen sinusförmigen Verlauf. Die in Tabelle 1 festgelegte Obergrenze für den Kennwert Total Harmonic Distortion (THD) wird weit unterschritten, der THD beträgt nur 0,005 %. Der Theorie zufolge bleiben damit die lastabhängigen Pendelmomente auf ein Minimum beschränkt. Zudem zeigt das Ausbleiben der dritten Harmonischen, dass der Permanentmagnetkreis nicht in der Sättigung betrieben wird. Das Ergebnis der Optimierung ist eine

Kennzahl von $f_{\text{opt}} = 9,3 \text{ VAs}^2$. Der Wert liegt über dem handelsüblicher Pedelec-Motoren (bspw. ist $f_{\text{opt}} = 6,8 \text{ VAs}^2$ bei dem bisherigen Urban-e Motor).

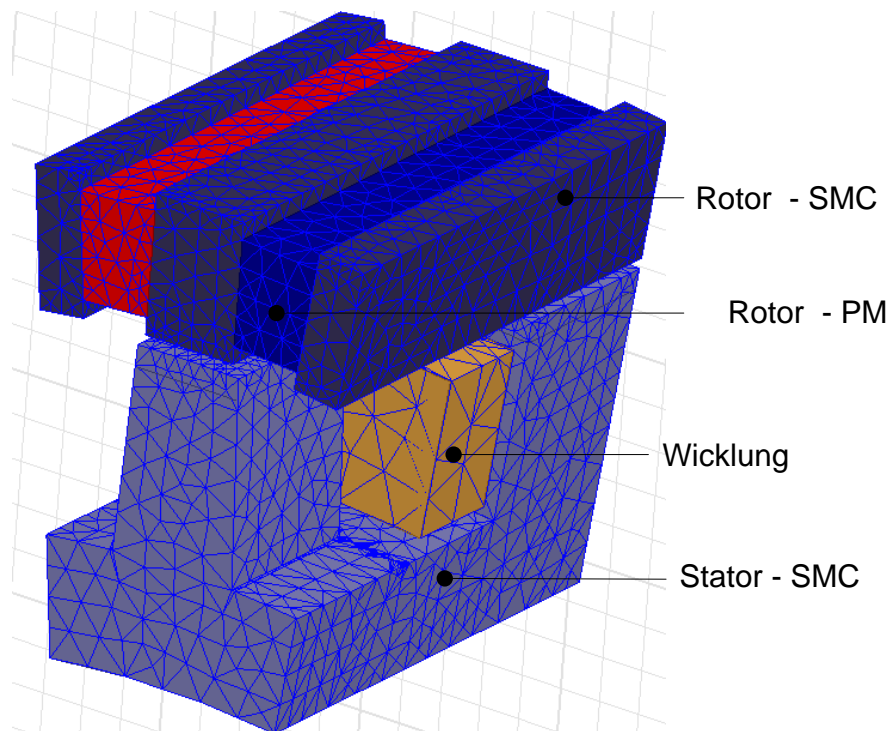


Bild 5: Vernetzter Geometriausschnitt für numerische Berechnung

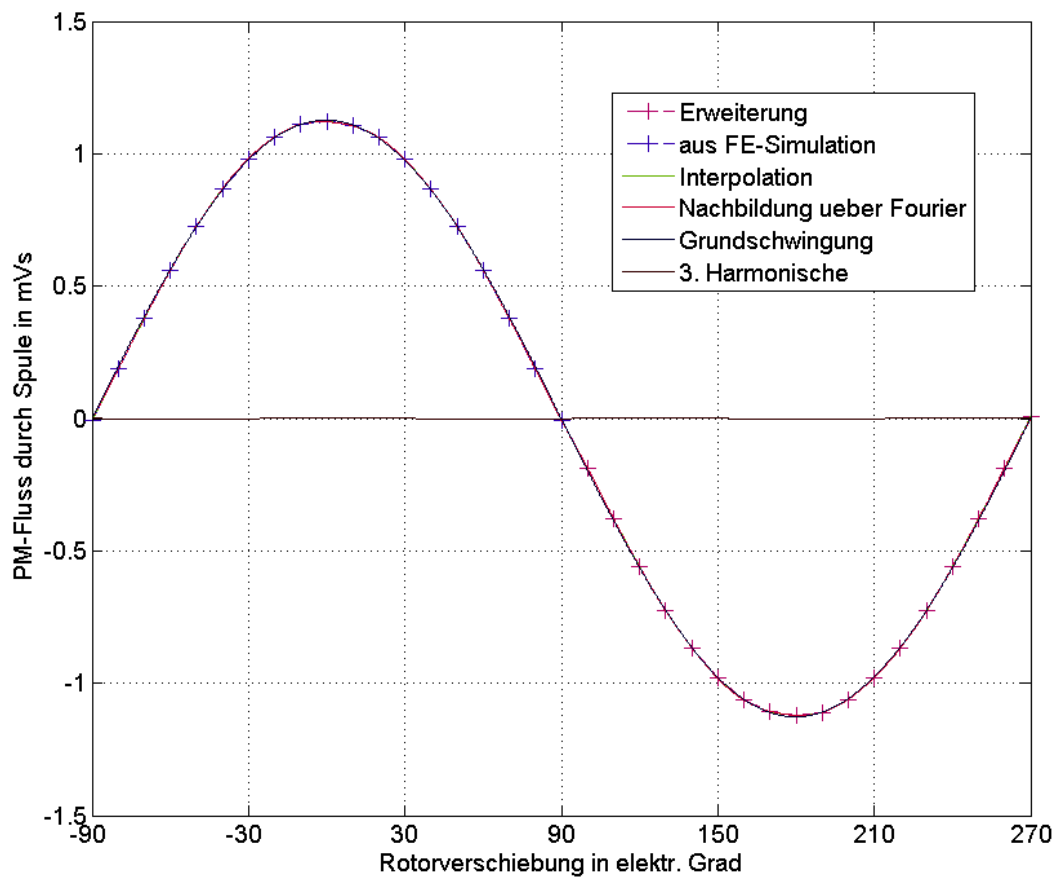


Bild 6: Verlauf des Permanentmagnetflusses entlang einer elektrischen Periode

2.1.3 Prüfstandsversuche

Zwecks Validierung der theoretischen Kennwerte der TFM wurde bei der Binova GmbH ein Motorprüfstand eingerichtet. Dessen mechanischer Aufbau ist in Bild 7 abgebildet. Die TFM wird drehmomentgeregelt betrieben und arbeitet gegen einen drehzahlgeregelten Prüfstandsantrieb. Eine Sensorik erfasst Drehmoment und Drehzahl, während der Sollwert für den Strom der TFM von außen vorgegeben werden kann. Der in die TFM integrierte Wechselrichter wird von einem Netzteil gespeist. Dessen Ausgangsgrößen (Gleichstrom und Gleichspannung) stehen ebenfalls als Messgrößen zur Verfügung.

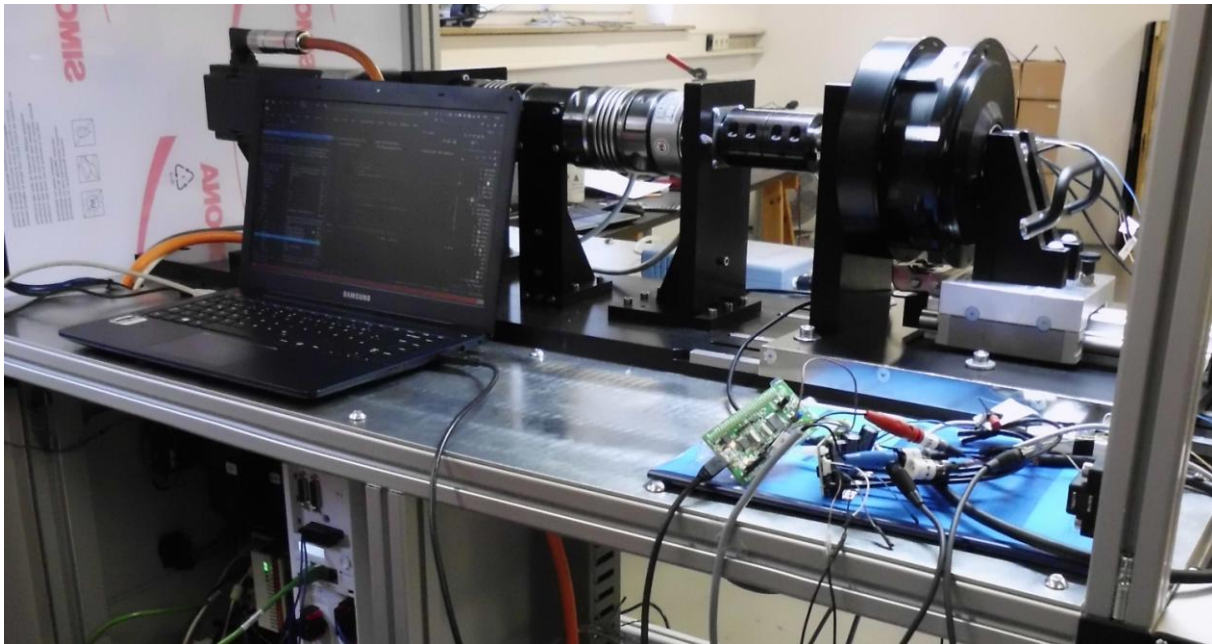


Bild 7: TFM (oben rechts) auf Motorprüfstand

Tabelle 2 zeigt die am Prüfstand ermittelten Motorparameter im Vergleich zum theoretischen Entwurf. Auffallend ist, dass sich die Phaseninduktivitäten unterscheiden, was durch die magnetische Asymmetrie der Maschinenstruktur begründet ist. Die unterschiedlichen Phasenimpedanzen stellen außergewöhnliche Forderungen an den Stromregler, da er in alle Phasen einen Strom gleicher Amplitude einprägen muss.

Tabelle 2: Gegenüberstellung von projektierten und gemessenen Werten

Größe	theoretischer Wert gemäß Auslegung	anhand Prototypen bestimmter Wert
Phasenwiderstand	50,4 m Ω	54,5 m Ω
Phaseninduktivität	340 μ H für einphasiges Modell	315 μ H für mittlere Phase, 125 μ H für äußere Phasen
Permanentmagnetflussverkettung	16,8 mVs	13,0 mVs

Die Abweichung der Permanentmagnetflussverkettung ist aller Voraussicht nach auf die zu breiten Streustege zwischen den Weicheisenblöcken im Rotor zurückzuführen. In Bild 8 ist der entsprechende Streufluss durch einen Kreis hervorgehoben. Gemäß Spezifikation dürfen die Kanten der Weicheisenblöcke durchschnittlich nur um 0,8 mm über die Permanentmagnete hinausragen. Aufgrund unzureichender Toleranzen konnte die Vorgabe bei der Fertigung des Motors nicht eingehalten werden, so dass manche Weicheisenteile um mehr als 2 mm überstehen. Eine Behebung der Abweichung setzt somit die Einhaltung der vorgegebenen Toleranzen sowie eine ausgeklügeltere Montagevorrichtung voraus, um die Permanentmagnete stets auf die minimal mögliche radiale Position zu bewegen.

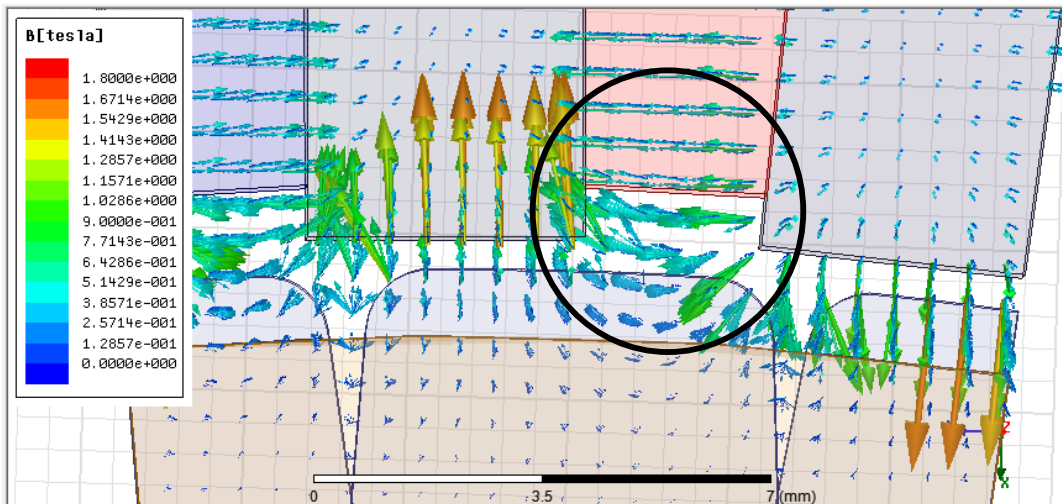


Bild 8: Hervorhebung des Streustegs zwischen den Weicheisenblöcken

2.1.4 Erarbeitung einer Strategie zum verlustminimalen Betrieb von Mehrfachantrieben

Gemäß dem Arbeitspunkt 5 musste ein Konzept für die Aufteilung der Antriebsleistung gefunden werden. Neben der vom Fahrer gewünschten Harmonie der elektrischen Unterstützung sollen die Antriebe insgesamt möglichst wenig Verlustenergie hervorrufen, so dass die Reichweite bei gegebener Akkukapazität maximal wird.

Die gewählte Strategie basiert auf einer Betrachtung der Stromwärmeverluste, die insbesondere bei hohen Drehmomenten und niedrigen Drehzahlen dominant sind. Bei vorausgesetzter Kenntnis der Motorparameter gelingt die optimale Aufteilung der Antriebsleistung durch analytische Optimierung. Das Ergebnis ist somit mathematisch exakt und kann auf einfache Weise auf einem Mikrocontroller berechnet werden. Der zugehörige Signalfussplan ist in Bild 9 dargestellt. Es wurde simulativ gezeigt, dass die Methode den mittleren Wirkungsgrad um 8 % erhöht.

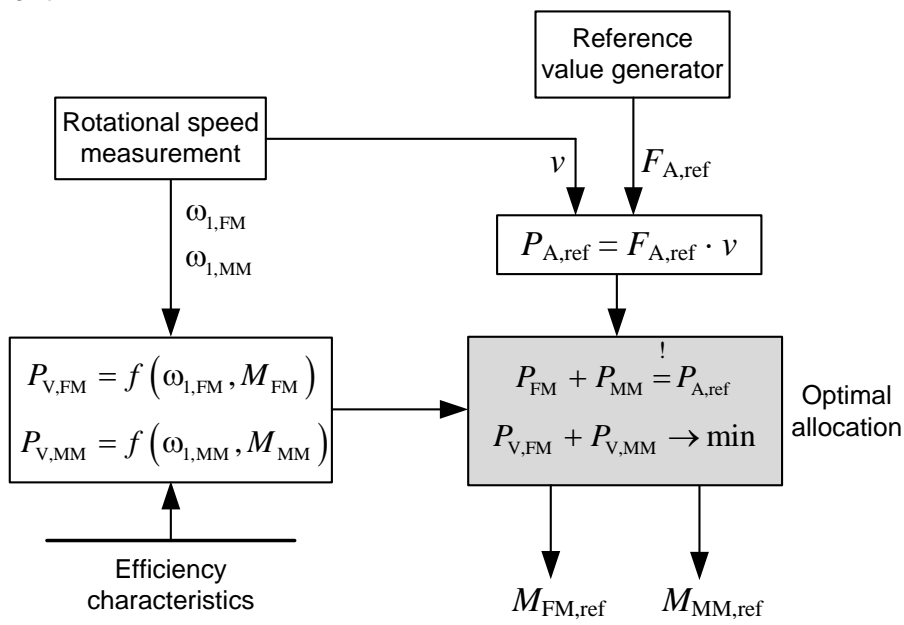


Bild 9: Berechnung der Solldrehmomente für Naben- und Mittelmotor

2.1.5 Inbetriebnahme des Doppelantriebs und Feldversuche

Die Realisierung des Doppelantriebssystems erfolgte aufgrund des fehlenden TFM im Juni 2014 mit Hilfe des bisherigen Pedelec-Motors von Urban-e. Wie in Bild 10 zu sehen, sind sämtliche Steuerungsplatinen in der Mitte des Gefährts in einer Konsole untergebracht. Der Akku befand sich im vorderen Teil an der Unterseite des Rahmens. Die Kommunikation sowie die Abstimmung zwischen Mittel- und Frontantrieb funktionieren reibungslos.



Bild 10: Testfahrt mit Doppelantriebssystem

Da die Steuerung des Mittelmotors die Drehmoment- und Drehzahlsensorik des Pedals auswertete, übernahm sie die Funktionalität des Masters. Das bedeutet, sie berechnete abhängig von der Fahrsituation die Soll Drehmomente für beide Motoren. Der Sollwert für den Frontantrieb wurde über die Busverbindung übermittelt. Zudem wurde der Frontantrieb per Busbefehl im Stillstand abgeschaltet, um Energie zu sparen. Die gesamte Struktur der Steuerung ist in Bild 11 abgebildet.

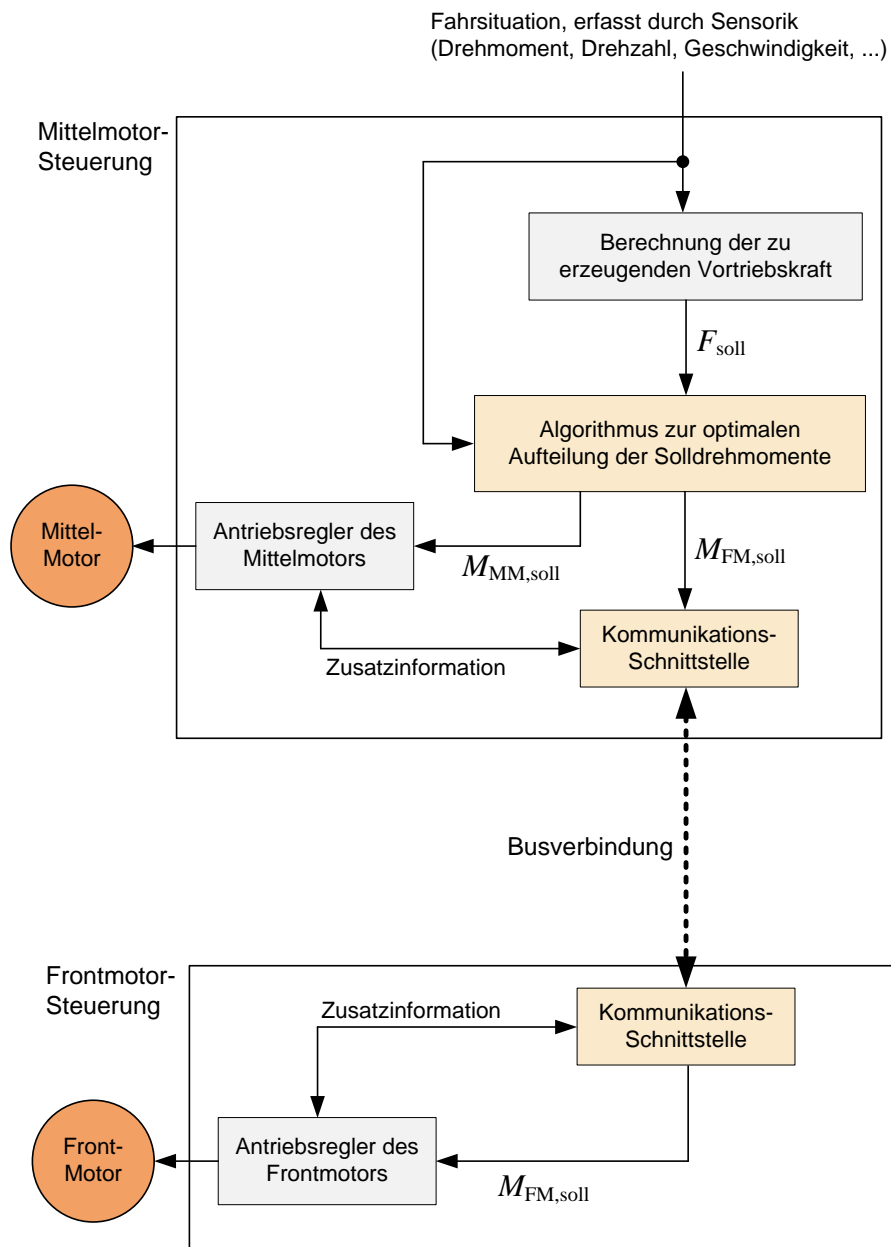


Bild 11: Struktur der Doppelantriebssteuerung

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Personalkosten Mitarbeiter	141.595,61 EUR
Beschäftigungsentgelte SHK	10.133,97 EUR
Allg. Verwaltungsausgaben (Elektronikbaugruppen)	2.134,77 EUR
Dienstreisen	1.042,80 EUR

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die TU-Dresden lieferte mit den theoretischen Betrachtungen sowohl zum Nabenmotor als auch zur gesamtheitlichen Steuerung die Voraussetzungen zur Bearbeitung des praktischen Teils und damit zur Realisierung des S-Pedelecs. Mit dem abgeschlossenen Berechnungsvorgang stehen die geometrischen Daten sowie die Betriebsparameter des TFM bereit, so dass der Industriepartner Binova mit Entwicklung eines Fertigungsprozesses für die Serie fortfahren kann. Die Arbeiten zur Kombination der beiden Motorsteuerungen bilden die Grundlage für die Applikationssoftware. Ausgehend von dem von der TUD entwickelten Modul zur optimalen Drehmomentaufteilung kann der Industriepartner Binova die Software nach eigenem Belieben ergänzen, um kundenspezifische Anforderungen einzupflegen.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen – insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die zur Optimierung der Motorgeometrie gefundene Berechnungsmethodik ist allgemein auf Torque-Motoren anwendbar. Das Vorgehen, welches auf ICEM 2014 in Berlin veröffentlicht wurde (s. Abschnitt 2.6), fand bereits lehrstuhlintern erfolgreich bei einem anderen Projekt Anwendung. Dort basiert der Fahrtrieb auf einer Axialflussmaschine, die Kernanforderungen sind jedoch vergleichbar mit denen an den TFM.

Trotz der anfänglichen Schwierigkeiten bei der Fertigung erwies sich die gewählte Motortopologie als mechanisch robust. Als wesentlicher Grund dafür wurde die Rotorstruktur ausgemacht. Da sich die Permanentmagnete über alle drei Phasen erstrecken, bilden die aktiven Rotorelemente zusammen mit dem umlaufenden Gehäuse eine steife Struktur. Während der Prüfstandsversuche reagierte der Rotor unempfindlich auf die harmonische Kraftanregung im Luftspalt. Die Folge war, dass der Motor leise lief. Die Topologie erscheint dafür auch für die Transversalfuss-Reluktanz-Bauweise geeignet. Bei dieser Variante wird gänzlich auf Permanentmagnete verzichtet, die Vortriebskraft resultiert stattdessen aus der Änderung des magnetischen Widerstands mit dem Verdrehwinkel des Rotors. Es ist geplant, weitere Forschungsmittel zur Untersuchung des Transversalfuss-Reluktanzprinzips auf Basis der in Bild 2 gezeigten Motorgeometrie einzuwerben.

Die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse wurden u.a. lehrstuhlintern in Form von Forschungsvorträgen präsentiert:

- J. Jung: *Hochkompakte Nabenmotoren für Pedelec*. Forschungsvortrag, Seminarwoche TU Dresden und TU Darmstadt, La Clusaz, 2013.
- M. Leubner: *Drehmomentaufteilung in einem Lastenrad mit zwei separaten Elektromotoren*. Forschungsvortrag, TU Dresden, 2014.

Die für die TFM erstellte Anforderungsdefinition eignet sich für die Verwendung in der Lehre. Anhand der einfachen Längskinematik eines Lastenrades können die Studenten auf anschauliche Weise die benötigten Drehmomente und Drehzahlen der Antriebsmaschine ableiten. Zudem können die definierten Kriterien zukünftig auf ähnliche Antriebsaufgaben übertragen werden.

2.5 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Während des Vorhabens wurde kein nennenswerter Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens festgestellt.

2.6 Veröffentlichung des Ergebnisses

- Die Ansätze zur Feinoptimierung der TFM wurden im September 2014 auf einer internationalen Fachkonferenz vorgestellt. Das dazugehörige Schriftstück wurde in die IEEE Xplore-Datenbank aufgenommen:

J. Jung, S. Ulbrich, W. Hofmann: *Design Process of a High Torque Density Direct Drive Involving a Transverse Flux Machine*. IEEE International Conference on Electrical Machines - ICEM, Berlin, pp. 1096 - 1102, 2014.

- Weitere Einzelheiten zur Motoroptimierung wurden auf der 5. Sächsisch-Böhmischen Innovationsbörse, welche am 23.09.2014 in Freital bei Dresden stattfand, in Form einer Poster-Präsentation veröffentlicht.