



Schlußbericht

TIOM Two-In-One-Motor

30. September 2019

**Deutsches Zentrum für Luft-
und Raumfahrt e.V.**

Institut für Fahrzeugkonzepte

Gefördert durch:



Beobachtet durch:





Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Fahrzeugkonzepte
Pfaffenwaldring 38-40
D-70569 Stuttgart

Institutsleitung
Prof. H. E. Friedrich
Tel.: +49 (0)711/6862-256
FAX.: +49 (0)711/6862-258

Projektleitung
Dr. Michael Schier
Tel.: +49 (0)711/6862-535
FAX.: +49 (0)711/6862-258

| | | | |
|---------------------|--|--------------------------|--------------|
| Titel | TIOM Two-In-One-Motor | | |
| Autor | Michael Schier Tel.: +49 (0)711/6862-535 michael.schier@dlr.de Weitere Autoren: Fabius Epple | | |
| Projekt | TIOM Two-In-One-Motor | | |
| Dateiname | Schlußbericht TIOM.docx | | |
| Ablage | Projektordner TIOM Abschlußbericht | | |
| Versions-Nr. | Änderung | Gesamt-Seitenzahl | Datum |
| 1 | | 105 | 30.09.19 |

| | | |
|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Erstellt (Datum, Unterschrift) | Geprüft (Datum, Unterschrift) | Freigegeben (Datum, Unterschrift) |
| | | |

DLR-FK-QM-VD-02-0-02

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----------|
| I. Kurzdarstellung | 1 |
| I.1. Aufgabenstellung | 1 |
| I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde | 1 |
| I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens | 1 |
| I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde | 4 |
| I.4.1. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden | 4 |
| I.4.2. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste..... | 5 |
| I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen..... | 6 |
| II. Eingehende Darstellung | 7 |
| II.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele | 8 |
| II.1.1. AP 1 Projektmanagement..... | 8 |
| II.1.1.1. MS 1: Kick-Off | 11 |
| II.1.1.2. MS 2: Lastenheft | 11 |
| II.1.1.3. MS 3: Pflichtenheft/Spezifikation, FMEA, Erprobungsplan..... | 12 |
| II.1.1.4. MS 4: Zeichnungen/Designdokumente..... | 14 |
| II.1.1.5. MS 5: Teile liegen vor..... | 14 |
| II.1.1.6. MS 6: Prüfbericht | 14 |
| II.1.1.7. MS 7: Abschlußbericht | 14 |
| II.1.2. AP 2 Systemauslegung | 14 |
| II.1.2.1. AP 2.1 Gesamtfahrzeug | 15 |
| II.1.2.1.1. AS 2.1.1 Fahrzeuggröße | 15 |
| II.1.2.1.2. AS 2.1.2 Nenngrößen..... | 22 |
| II.1.2.1.3. AS 2.1.3 Gesamtenergieverbrauch | 27 |
| II.1.2.2. AP 2.2 Betriebsstrategie..... | 30 |
| II.1.2.3. AP 2.3 Sensorik | 40 |
| II.1.2.4. AP 2.4 Modularität..... | 41 |
| II.1.3. AP 3 Elektronik..... | 44 |
| II.1.4. AP 4 Fahrmotor | 48 |
| II.1.5. AP 5 Kompressor | 70 |
| II.1.6. AP 6 Getriebe..... | 71 |

| | | |
|-----------|---|----|
| II.1.7. | AP 7 Kupplung | 71 |
| II.1.8. | AP 8 Muster | 72 |
| II.1.8.1. | AS 8.1 Teilebestellung | 72 |
| II.1.8.2. | AS 8.2 Teilebearbeitung | 74 |
| II.1.8.3. | AS 8.3 Montage | 76 |
| II.1.9. | AP 9 Validierung..... | 83 |
| II.1.9.1. | AP 9.1 Klimakreislauf | 83 |
| II.1.9.2. | AP 9.2 Motoren | 83 |
| II.2. | Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises | 91 |
| II.3. | Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit | 91 |
| II.4. | Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans | 92 |
| II.5. | Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen..... | 93 |
| II.6. | Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11. | 94 |
| II.6.1. | Erfolgte Veröffentlichungen | 94 |
| II.6.2. | Geplante Veröffentlichungen | 94 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|----------|---|
| AC | Air Conditioning |
| ATEM | Antriebstechnologien für die Elektromobilität |
| <i>B</i> | Magnetische Flußdichte (Induktion) |
| Boost | Betrieb beider Motoren |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| EMI | Elektromotor 1 (50 kW) |
| EMII | Elektromotor 2 (10kW) |
| EMV | Elektromagnetische Verträglichkeit |
| EV | Electric Vehicle |
| FVA | Forschungsvereinigung Antriebstechnik |
| IAA | Internationale Automobilausstellung |
| IBZ | Ingenieurbüro Zimmermann |
| IUV | Inter Urban Vehicle |
| LA-ST | Lampoldshausen-Stuttgart (eigener Autobahnzyklus), auch „La-S motorway“ |
| M1 | Motor 1 (Fahrtrieb) |
| M2 | Motor 2 (Kompressorantrieb) |
| NEDC | New European Drive Cycle |
| NEFZ | Neuer Europäischer Fahrzyklus |
| NGC | Next Generation Car |
| Nfz | Nutzfahrzeug |
| N_s | Statornutzzahl |
| p | Polpaarzahl |
| SiC | Siliziumcarbid |
| SLRV | Save Light Regional Vehicle |
| ST-LA | Stuttgart-Lampoldshausen (eigener Überlandzyklus), auch „S-La regional“ |
| TIOM | Two In One Motor |
| UMV | Urban Modular Vehicle |
| WLTC | Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle |
| WLTP | Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure |
| ϕ | Magnetischer Fluß |
| η | Wirkungsgrad |



| | |
|--------|----------------------------|
| ξ | Wicklungsfaktor |
| ψ | Magnetische Flußverkettung |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Projektstruktur | 2 |
| Abbildung 2: Projektplan | 3 |
| Abbildung 3: Meilensteinplanung | 3 |
| Abbildung 4: Bekannte Doppelmotorkonzepte | 4 |
| Abbildung 5: 20 kW-Doppelmotorsystem mit integriertem Klimakompressor..... | 5 |
| Abbildung 6: Konventioneller Elektrofahrzeugantrieb (links), TIOM-System (rechts) | 7 |
| Abbildung 7: Prinzipskizze der kompakten Antriebseinheit | 8 |
| Abbildung 8: Arbeitsschritte AP1 Projektmanagement | 8 |
| Abbildung 9: Bauraum und Einbau in eSmart sowie DLR-NGC-UMV | 11 |
| Abbildung 10: Arbeitsschritte AP2 Systemauslegung..... | 14 |
| Abbildung 11: DLR Next Generation Car Fahrzeugkonzepte | 16 |
| Abbildung 12: NGC Urban Modular Vehicle | 17 |
| Abbildung 13: Modulares urbanes Fahrzeugkonzept NGC-UMV mit modularer Struktur, modularer Innenraumgestaltung und modularem Antriebstrang..... | 17 |
| Abbildung 14: TIOM-Bauraum im DLR-Urban Modular Vehicle-Konzept..... | 18 |
| Abbildung 15: DLR-Versuchsfahrzeug eSmart mit HT-PEM-Brennstoffzellen-Range-Extender | 19 |
| Abbildung 16: links: Übersicht der im Demonstratorfahrzeug verbauten Komponenten; rechts: Packaging der Komponenten im Ursprungsfahrzeug..... | 19 |
| Abbildung 17: links: Packagingableitung für den TIOM-Motor mit um 200 mm verschobenem Getriebedifferential; rechts: Verfügbarer Bauraum im Demonstrator | 20 |
| Abbildung 18: Tagesfahrleistungen (links) und spezifischer Energieverbrauch der ausgewerteten Renault Zoe im Projekt InitiativeE-BW | 21 |
| Abbildung 19: DLR - Referenzstrecke zwischen den DLR-Standorten Stuttgart (ST) und Lampoldshausen (LA)..... | 22 |
| Abbildung 20: Auftrittswahrscheinlichkeit verschiedener Motorleistungsbetriebspunkte in den unterschiedlichen Fahrzyklen (links); kumulierte Häufigkeit der Motorleistungspunkte (rechts) | 23 |
| Abbildung 21: kombiniertes Drehmoment-Drehzahldiagramm aller Fahrzyklen mit einer Zeitauflösung von 30s (links); Drehzahl-Drehmoment - Diagramm im Zyklus WLTP - Class III mit einer Zeitauflösung von einer Sekunde (rechts) | 24 |
| Abbildung 22: Geschwindigkeit, Leistung, Drehmoment sowie Beschleunigungen am Rad im WLTP - Class III – Stadtfahrzyklus (links); Kumulierte Darstellung des Streckenleistungsbedarfs im WLTP – Class III (rechts)..... | 25 |
| Abbildung 23: Drehmoment-Drehzahldiagramm einer kombinierten Haupt- und Hilfsantriebseinheit mit unterschiedlichen Drehzahlgrenzen (links); Raddrehmoment in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit (rechts) | 27 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 24: Energiewandlungskette eines Elektrofahrzeuges beim Kühlen mittels Rekuperationsenergie (links); Energiewandlungskette eines über eine mechanische Kupplung gekoppelten Kältemittelverdichters an die Antriebsmotorwelle (rechts)..... | 28 |
| Abbildung 25: Energien am Rad im Zyklus ST→ LA (oben links); Auszug von Rekuperationsanteil (rot) und mechanischen Bremsbedarf (gepunktet) (unten links); Mechanischer Bremszeitanteil im Zyklus (rechts) | 29 |
| Abbildung 26: Energiebedarf und Einsparpotential bei unterschiedlichen Fahrzyklen | 30 |
| Abbildung 27: Wirkungsgradkennfeld einer 8 kW PSM – Maschine, veröffentlicht vom IMAB Braunschweig (links); Digitalisiertes und skaliertes Wirkungsgradkennfeld mit Hüllkurve (rechts)..... | 31 |
| Abbildung 28: links: Wirkungsgradkennfeld einer skalierten 10 kW - Maschine; rechts: gemittelte Wirkungsgrade im WLTP – Class III Stadtzyklus beim Einsatz einer 50 kW oder einer 10 kW Antriebsmaschine | 32 |
| Abbildung 29: oben links: Leistungsbilanz eines Renault Zoe mit 10 und 50 kW Antriebsmaschine; oben rechts: Verfügbare Beschleunigungsleistung für 10 kW (blau), 50 kW (schwarz) und kombiniert(rot); unten links: Beschleunigung in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit; unten rechts: erzielbare Beschleunigungszeiten | 33 |
| Abbildung 30: Darstellung der 3 Betriebsmodi ohne Klimakreislauf..... | 35 |
| Abbildung 31: Darstellung der 6 Betriebsmodi mit Klimakreislauf..... | 36 |
| Abbildung 32: Schaltzustände der elektrischen Maschinen und der Kupplungen in den verschiedenen Betriebsmodi (rot umrahmt sind die beiden dem reinen Elektrofahrzeug entsprechenden Modi Fahren und Klimakompressorbetrieb. | 37 |
| Abbildung 33: Betriebsstrategie für die Implementierung im Simulationsmodell..... | 37 |
| Abbildung 34: Simulationsmodell in Dymola/Modellica..... | 38 |
| Abbildung 35: Einsatzzeiten der unterschiedlichen Betriebsmodi beim Fahren ohne Klimaanlage..... | 39 |
| Abbildung 36: Einsatzzeiten der unterschiedlichen Betriebsmodi beim Fahren mit Klimaanlage..... | 39 |
| Abbildung 37: Riementrieb für die Hilfsaggregate am Verbrennungsmotor (links); Modulares Brennstoffzellensystem (mitte); Antriebseinheit aus zwei Elektromotoren mit Leistungselektronik (rechts) | 41 |
| Abbildung 38: Kreisprozess im log(p)-h – Diagramm (links); Vergleich verschiedener Kompressoren (mitte); Geöffneter Flügelzellenverdichter eines Smart mit Verbrennungsmotor (rechts) | 43 |
| Abbildung 39: Arbeitsschritte AP3 Elektronik | 44 |
| Abbildung 40: Getrennte Umrichter für beide Motoren | 45 |
| Abbildung 41: Bauraum für Umrichter | 46 |
| Abbildung 42: Umrichter mit einer Leistung von 20 kW im Bauraum 150x90x65 mm..... | 47 |
| Abbildung 43: Mögliche Drehzahlgebersignale (Resolver, oben – TTL 90 Grad, mitte – TTL 120 Grad, unten) | 48 |
| Abbildung 44: Arbeitsschritte AP3 Fahrmotor | 48 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 45: TIOM-System, bestehend aus der Antriebseinheit (braun, mit den beiden Elektroantrieben M1 und M2 sowie der Kupplung C1), einem Kompressor (grün, mit integrierter elektromagnetischer Kupplung C2) und zwei Umrichtern (blau, PE1 und PE2 für die beiden Motoren)..... | 49 |
| Abbildung 46: Aufbau des TIOM-Systems, gegenüber Abb. 21 um 90 Grad nach hinten gedreht. | 50 |
| Abbildung 47: Statorblechschnitt und Statorpaket des Motors M1..... | 51 |
| Abbildung 48: Wicklungsfaktoren bei unterschiedlicher Nutzahl-Polzahl-kombination..... | 53 |
| Abbildung 49: Nutzahl-Polpaarzahlkombinationen 18-12, 18-14 und 18-20. | 54 |
| Abbildung 50: Nutensterne der drei Kombinationen 18-12, 18-14 und 18-20 | 54 |
| Abbildung 51: Zweilagiges Wickelschema für die Kombination 18-12 | 55 |
| Abbildung 52: Zusammenschaltung der Spulen mit jeweils 6 parallelen Spulen zu einem Strang und dann die drei Stränge im Dreieck..... | 55 |
| Abbildung 53: Zweilagiges Wickelschema für die Kombination 18-14 | 56 |
| Abbildung 54: Zweilagiges Wickelschema für die Kombination 18-20 | 56 |
| Abbildung 55: Mehrlagenwicklungen für die Kombinationen 12-14 und 12-20..... | 57 |
| Abbildung 56: Dreilagiges Wickelschema für die Kombination 12-14 | 57 |
| Abbildung 57: Dreilagiges Wickelschema für die Kombination 12-20 | 58 |
| Abbildung 58: Luftspaltinduktion für die Kombination 18-12..... | 58 |
| Abbildung 59: Luftspaltinduktion für die Kombination 18-14..... | 59 |
| Abbildung 60: Luftspaltinduktion für die Kombination 18-20..... | 59 |
| Abbildung 61: Feldverlauf im Vergleich der drei Varianten 18-12, 18-14 und 18-20 | 60 |
| Abbildung 62: Induzierte Spannungen der drei variante 18-12 (oben), 18-14 (mitte) und 18-20 (unten) bei einer Drehzahl von 60 1/min | 61 |
| Abbildung 63: Stator des Motors M1 | 62 |
| Abbildung 64: Rotorblechschnitt und -teilkpaket des Motors M1 | 62 |
| Abbildung 65: Zusammenbau der Baugruppe Motor M1 | 63 |
| Abbildung 66: Wirkungsgrad- und Verlustkennfelder von Synchronmaschinen, Asynchronmaschinen und Umrichtern der gewünschten Leistungsklassen..... | 63 |
| Abbildung 67: Wirkungsgradkennfelder für M1 und M2 (ohne Feldschwächung) | 64 |
| Abbildung 68: Wirkungsgradkennfeld M1 | 65 |
| Abbildung 69: Wirkungsgradkennfeld M2..... | 65 |
| Abbildung 70: Auf gleiche Drehmomente skalierte Kennfelder der Motoren M1 und M2 .. | 66 |
| Abbildung 71: CFD-Simulation verschiedener Kühlkanalgeometrien..... | 67 |
| Abbildung 72: Wärmeersatzzschaltung und Temperaturverläufe bei Mantel- bzw. Kühlrohr-Kühlung | 68 |
| Abbildung 73: Stator ohne Kühlung, mit Kühlrohren und mit einer Mantelkühlung | 69 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 74: Ausschnitt für die Erstellung eines Wärmeersatzschalbildes | 69 |
| Abbildung 75: Ersatzschaltbild und Meßstellen zur Prüfung an dem Ausschnitt aus Abbildung 68..... | 69 |
| Abbildung 76: Vergleich Berechnung und Messung der Aufwärmung | 70 |
| Abbildung 77: Flügelzellen-Klimakompressor | 70 |
| Abbildung 78: Kupplung C1 zwischen Motor M1 und Motor M2 | 71 |
| Abbildung 79: Arbeitsschritte AP 8 Muster | 72 |
| Abbildung 80: Einzelteile nach der Beschaffung (Statoren und Rotoren und Magnete oben, Kompressor unten) | 72 |
| Abbildung 81: Wassergekühlter Umrichter der Fa. IBZ | 73 |
| Abbildung 82: Aus zwei Einzelteilen zusammengesweißtes Gehäuse des kleineren Motors M2..... | 73 |
| Abbildung 83: Lagerschilde und Kupplungsanbauteile..... | 74 |
| Abbildung 84: gewickelter Fahrmotor M1 | 75 |
| Abbildung 85: gewickelter Motor M2 | 75 |
| Abbildung 86: Mit Magneten bestückte Rotoren (Motor 1 links, Motor 2 rechts)..... | 76 |
| Abbildung 87: links: <i>prinzipieller Aufbau des TIOM-Systems</i> , rechts: <i>Konzeption des TIOM-Systems innerhalb der Hüll-Kontur (die Motoren sind nur mit ihren elektromagnetisch aktiven Teilen (Stator und Rotor) eingezeichnet</i> | 77 |
| Abbildung 88: TIOM-System, bestehend aus der Antriebseinheit (braun, mit den beiden Elektroantrieben M1 und M2 sowie der Kupplung C1), einem Kompressor (grün, mit integrierter elektromagnetischer Kupplung C2) und zwei Umrichtern (blau, PE1 und PE2 für die beiden Motoren)..... | 77 |
| Abbildung 89: Einschrumpfen des auf 160 Grad erwärmten Stators in das auf -20 Grad abgekühlte Gehäuse..... | 78 |
| Abbildung 90: Rotor des Fahrmotors (Motor 1) mit Lagerschild | 78 |
| Abbildung 91: Kupplung zwischen Fahrmotor (Motor 1) und Kompressormotor (Motor 2), Rotorseite Motor 2 links oben | 79 |
| Abbildung 92: Montagegestell für die Montage der Rotoren in die Statorgehäuse | 80 |
| Abbildung 93: Zusammenbau, Einfügen des Rotors Motor 1 zusammen mit dem Motor 2 und der Kupplung in das Gehäuse des Motors 1 | 80 |
| Abbildung 94: TIOM-Motoren auf dem Motorenprüfstand | 81 |
| Abbildung 95: TIOM-System auf dem Motorenprüfstand..... | 81 |
| Abbildung 96: Kältekreislauf-Prüfstand | 82 |
| Abbildung 97: Arbeitsschritte AP9 Validierung | 83 |
| Abbildung 98: Theoretische Herleitung (links) der induzierten Spannung aus dem Luftspaltinduktionsverlauf und numerische Simulation (rechts), (Luftspaltinduktion oben, induzierte Spulenspannung mitte, Messung induzierte Spulenspannung unten | 84 |
| Abbildung 99: Induzierte Strangspannung des Motors M1 | 85 |



| | |
|---|----|
| Abbildung 100: Kurzschlußstrom des Motors M1 | 86 |
| Abbildung 101: Erwärmung der Wicklung und Zeitkonstanten des luftgekühlten und des wassergekühlten Motors M1 | 87 |
| Abbildung 102: Wirkungsgradkennfelder der beiden Motoren M1 (oben) und M2 (unten) aus Umrichter (Auslegung M1: schwarz, M2: rot)..... | 88 |
| Abbildung 103: Energieeinsparpotential..... | 89 |
| Abbildung 104: Ähnliche Arbeiten an anderer Stelle, von links nach rechts: Doppel-e-Antrieb; Speed2E-Konzept; ZEOS..... | 93 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Fahrzeugparameter eines Renault Zoe zur Antriebsstrangauslegung | 22 |
| Tabelle 2: Zykluszeit, Weglänge, Durchschnittsgeschwindigkeit und mittlere Radleistung | 23 |
| Tabelle 3: Randbedingungen zur Berechnung der Motorwellenleistung | 24 |
| Tabelle 4: Auslegungsergebnisse für den Hauptantrieb | 25 |
| Tabelle 5: Auslegungsergebnisse für den Hilfsantrieb (Kompressormotor) | 26 |
| Tabelle 6: gemittelte Wirkungsgrade einer 50 kW - Antriebsmaschine im Zyklus | 31 |
| Tabelle 7: Antriebsvergleich eines Zoe mit und ohne TIOM - Antriebskonzept..... | 33 |
| Tabelle 8: 4 Konzepte für eine Kältemittelkühlung | 68 |
| Tabelle 9: Vergleich der vier Kältemittelkühl-Konzepte | 68 |
| Tabelle 10: Verwertungsplan | 93 |



I. Kurzdarstellung

I.1. Aufgabenstellung

Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung einer integrierten Antriebseinheit aus zwei Elektromotoren und einem Klimakompressor für zukünftige Fahrzeugkonzepte, die es zum einen erlaubt, den Klimakompressor auch direkt von der Antriebsachse aus antreiben zu können und zum anderen die beiden Elektromotoren jeweils in ihrem besten Wirkungsgradbereich zum Fahren betreiben zu können (**Two-In-One-Motor TIOM**). Mit diesem Antriebskonzept soll eine Gesamteffizienzsteigerung eines elektrischen Fahrzeugantriebes gegenüber einem konventionellen Elektrofahrzeug-Antrieb um ca. 5 Prozent erreicht werden.

I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt startete am 01.01.2016 und wurde nach einer bewilligten Projektverlängerung um 6 Monate am 30.06.2019 abgeschlossen. Das Projekt wurde in alleiniger Verantwortung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt am Institut für Fahrzeugkonzepte in Stuttgart durchgeführt. Während der Projektlaufzeit wurde die Firmen Ingenieurbüro Zimmermann (IBZ) aus Waldbüttelbrunn bei Würzburg sowie der Kupplungshersteller (Kendrion) aus Markdorf für Komponentenentwicklungsarbeiten eingebunden. Zudem erfolgte eine Zusammenarbeit mit dem Institut für leistungselektronische Systeme der Georg-Simon-Ohm-Hochschule in Nürnberg bzgl. der Auswirkungen von am gleichen Zwischenkreis betriebenen Umrichtern. Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert und vom Projektträger des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) betreut. Um die Ergebnisse in der Industrie bekannt zu machen, wurde das Projekt vom Projektausschuß Mobile Elektrifizierte Antriebssysteme (MEA) der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) durchgängig begleitet.

I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Projektstruktur dargestellt und gliedert sich nach Abbildung 1 in 9 Arbeitspakete. Ausgehend von der Systemauslegung in AP2 folgt die Entwicklung der einzelnen Komponenten in den AP3 bis AP7, der Aufbau des Systems in AP8 und die Validierung

in AP 9. Die Struktur berücksichtigt dabei die konzeptionellen sowie die technologischen Fragen der Aufgabestellung.

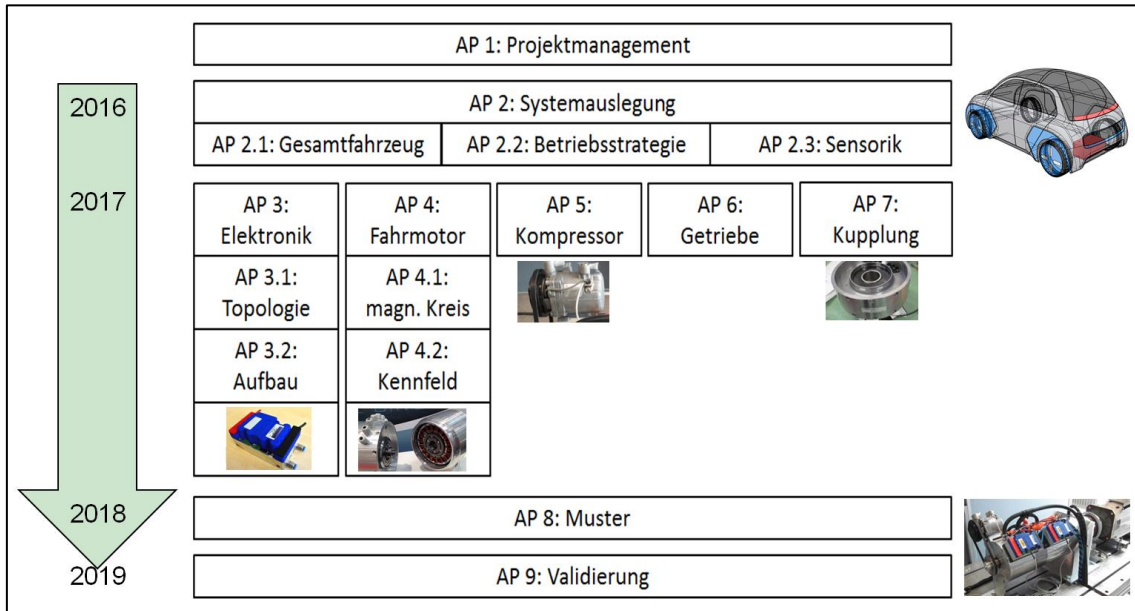


Abbildung 1: Projektstruktur

Die Planung des Projektes lief ab 01.01.16 über drei Jahre, siehe auch den Projektplan in Abbildung 2, wobei im ersten Jahr die Festlegung der Randbedingungen, die Auslegung und die Designdokumentenerstellung im Vordergrund stand, im zweiten Jahr der Aufbau des Systems und im dritten Jahr die Untersuchung sowie die Dokumentation.

Die einzelnen Arbeitspakete waren in Unterarbeitspakete mit entsprechenden Arbeitsschritten unterteilt, die im Kapitel II eingehend dargestellt werden.

Zwischenstände wurden anhand von internen Meilensteinberichten nach Abbildung 3 dokumentiert.

Das Projekt wurde nach drei Jahren kostenneutral um ein halbes Jahr zum 30.06.19 verlängert, um unerwartet aufgetretene Abweichungen in der Personal- und Fertigungsplanung ausgleichen zu können.

| Arbeitspaket Arbeitsschritt | Leiter | Beteiligte Partner | | | Projektmonat | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------|--------------------|-----|------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | DLR | FAT | ext. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| AP1 Projektmanagement | DLR | x | x | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS1.1 Kick-Off | DLR | x | | | [Red box M1] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS1.2 Lastenheft | DLR | x | | | [Black box M2] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS1.3 Pflichtenheft | DLR | x | | | [Black box M3] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS1.4 FMEA | DLR | x | | | [Black box M3] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS1.5 Erprobungsplan | DLR | x | | | [Black box M3] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS1.6 Zeichnungen | DLR | x | | | [Black box M4] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS1.7 Teile liegen vor | DLR | x | | x | [Red box M5] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS1.8 Prüfbericht | DLR | x | | | [Black box M6] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS1.9 Abschlussbericht | DLR | x | | | [Red box M7] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS1.9 Planung, Verfolgung | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2 Systemauslegung | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2.1 Gesamtfahrzeug | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS2.1.1 Fahrzeuggröße | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS2.1.2 Nenngrößen | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS2.1.3 Gesamtenergieverbrauch | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2.2 Betriebsstrategie | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2.3 Sensorik | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2.4 Modularität | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP3 Elektronik | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP3.1 Topologie | DLR | x | | x | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP3.2 Aufbau | DLR | x | | x | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP3.3 Regelung | DLR | x | | x | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP4 Fahrmotor | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP4.1 magn. Kreis | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP4.2 Kennfeld | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP4.3 Kühlung | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP5 Kompressor | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP6 Getriebe | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP7 Kupplung | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP8 Muster | DLR | x | | x | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS8.1 Teilebestellung | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS8.2 Teilebearbeitung | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS8.3 Montage | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AS8.4 Prüfstandanpassung | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP9 Validierung | DLR | x | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP9.1 Klimakreislauf | | | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP9.2 Motoren | | | | | [Blue bar] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Abbildung 2: Projektplan

| |
|---|
| M1: Kick-Off |
| M2: Lastenheft, |
| M3: Pflichtenheft/Spezifikation, FMEA, Erprobungsplan |
| M4: Zeichnungen/Designdokumente |
| M5: Teile liegen vor |
| M6: Prüfbericht |
| M7: Abschlussbericht |

Abbildung 3: Meilensteinplanung

I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

I.4.1. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Es sind verschiedene Antriebskonzepte bekannt, bei denen zwei elektrische Maschinen zum Einsatz kommen, deren Anwendung spezifisch andere Fragestellungen beinhaltet, siehe Abbildung 4. Beim Antrieb nach [1] liegt der Schwerpunkt auf der Optimierung der schnelldrehenden Getriebe sowie die Anwendung für einen Hybridantrieb, beim Antrieb [2] liegt der Focus auf dem Getriebe sowie der Integration der Elektroantriebe in das Getriebegehäuse.

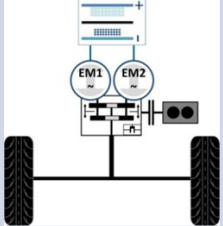
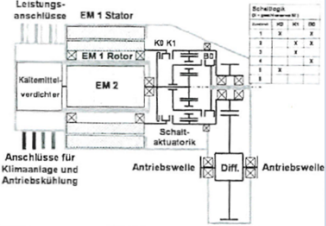
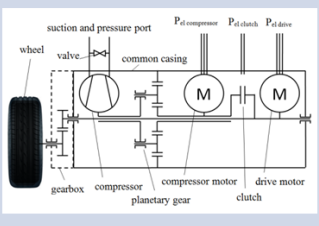
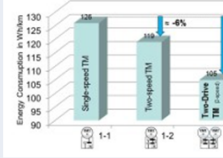
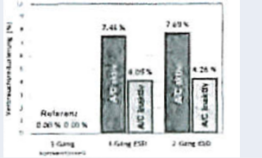
| Doppel-e-Antrieb Speed2-E Universität Darmstadt [1] Inst. für elektrische Antriebe | Efficient Synergy Drive – ESD Universität Chemnitz [2] Fakultät für Maschinenbau | 2 in 1 Motor TIOM DLR Stuttgart Inst. für Fahrzeugkonzepte |
|---|---|--|
|  |  |  |
| <p>NEFZ</p>  |  | <p>Erwartete Einsparung: Reichweite ohne AC: 5 % Reichweite mit AC: 10 % Kosten: 5-10 %</p> |
| <p>2 schnelldrehende Motoren auf ein Getriebe</p> | <p>2 radial ineinander konzentrische Motoren</p> | <p>2 axial hintereinander kuppelbare Motoren</p> |
| <p>Fokus Getriebetechnik</p> | <p>Fokus Thermomanagement</p> | <p>Fokus Integration</p> |
| <p>[1] http://www.ims.tu-darmstadt.de/forschung_9/fahrzeugantriebe/two_drive_transmission/Doppel-e-Antrieb.de.jsp [2] Danzer, C.; Unwerth, T.; Baumgart, R.: Effizienter Systemantrieb für Elektrofahrzeuge mit Klimaanlage als lastschaltbares 2-Gang-Getriebe, Haus der Technik, 26.-27.11.13</p> | | |

Abbildung 4: Bekannte Doppelmotorkonzepte

In einem vorangegangenen Projekt [3, 4, 5] aus den Jahren 2014 bis 2015 wurde ein erstes Doppelmotor-Konzept für Elektrofahrzeuge mit einer maximalen Fahr-Leistung von 20 kW gezeigt, wobei die damalige Hauptaufgabe darin bestand, für ein kleines Elektrofahrzeug den serienmäßigen Induktionsmotor durch eine kleinere Synchronmaschine zu ersetzen und zusätzlich einen Klimakompressor inklusive seines Antriebsmotors im gemeinsamen Gehäuse zu integrieren. Bei diesem Konzept lagen

beide Motoren auf einer Welle, die Räder des Fahrzeuges wurden vom Antriebsmotor über ein Transaxle-Design angetrieben, der Fahr-Motor konnte zusätzlich an den Klimakompressor-Motor angekuppelt werden, um einen mechanische Durchgriff der Räder direkt auf den Klimakompressor zu ermöglichen, siehe Abbildung 5.

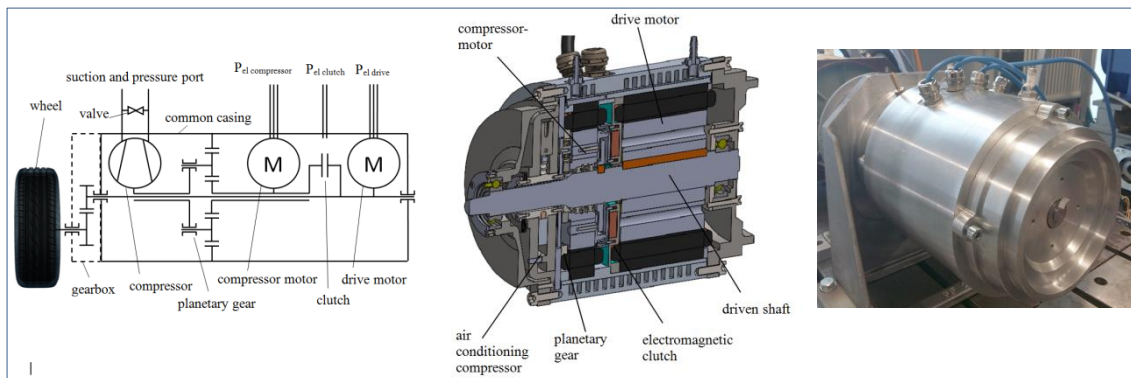


Abbildung 5: 20 kW-Doppelmotorsystem mit integriertem Klimakompressor

Mit diesem Konzept war es noch nicht möglich, beide elektrische Maschinen separat zum Antrieb des Fahrzeuges zu nutzen. Da die separate Nutzung der beiden Motoren weitere Wirkungsgradvorteile erwarten lässt, wurde das TIOM-Projekt angestoßen.

I.4.2. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

[1] *ims.tu-darmstadt.de*. [Online] 2012. http://www.ims.tu-darmstadt.de/forschung_ims/fahrzeugantriebe/doppel_e_antrieb/index.de.jsp

[2] Danzer, C., Unwerth, T. und Baumgart, R. (2013) *Effizienter Elektroantrieb für Elektrofahrzeuge mit Klimaanlage als lastschaltbares 2-Gang-Getriebe*. Haus der Technik, München, 26.-27.11.13.

[3] Kumar, Satheesh und Schier, Michael (2014) *Increasing efficiency of ecological vehicles by integrating auxiliary units directly to the driven shaft*. International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies EVER 14, 25.-27. Mär. 2014, Monte Carlo, Monaco

[4] Schier, Michael und Kumar, Satheesh (2014) *Steigerung der Effizienz elektrischer Fahrzeuge durch die Integration von Hilfsantrieben im Antriebsmotor*. Technische Hochschule Nürnberg, Institut ELSYS. Elektromobilitätsausstellung und Fachtagung EMA 2014, 12.-13. Sep. 2014, Nürnberg, Germany.



[5] Schier, Michael und Kumar, Satheesh (2015) [Design of a 2 in 1 Motor to increase the Efficiency of Electric Vehicles.](#) International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies EVER 15, 31. Mar. - 02. Apr. 2015, Monte Carlo, Monaco

I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) begleitet. In regelmäßigen Treffen mit dem FVA-Projektausschuß „Mobile Elektrifizierte Antriebssysteme (MEA)“ wurden Projektergebnisse halbjährlich vorgestellt und diskutiert. Zu den Treffen wurde seitens der FVA diskriminierungsfrei eingeladen, sodass die Ergebnisse des Projekts jedem Interessierten zur Verfügung standen.

II. Eingehende Darstellung

Es soll ein Antriebssystem für Elektrofahrzeuge entwickelt werden, welches den Fahrtrieb sowie den Antrieb des Klimakompressors anstelle zweier getrennter Einheiten wie in einem konventionellen Elektrofahrzeug in einer kompakten Einheit beinhaltet, siehe dazu Abbildung 6. Das erwartete Ziel ist eine Reduzierung des Energiebedarfs erstens durch direkte Kopplung des Klimakompressors an die Antriebswelle beim Bremsen sowie zweitens eine Energieeinsparung durch Nutzung zweier unterschiedlich starker Elektromotoren beim Fahren. Im ersten Fall umgeht man die mehrfache Energiewandlung vom Ladegerät bzw. der rekuperierten Bremsenergie bis zum Klimakompressor. Im zweiten Fall hat man die Möglichkeit, den Motor mit dem jeweils besten Wirkungsgradbereich zum Fahren oder zum Laden einzusetzen. Beide Elektromotoren sind dann für unterschiedliche Betriebsbereiche optimiert. Der erwartete Vorteil liegt allgemein in der verminderten Teileanzahl bei gleichzeitiger Erhöhung des Wirkungsgrades.

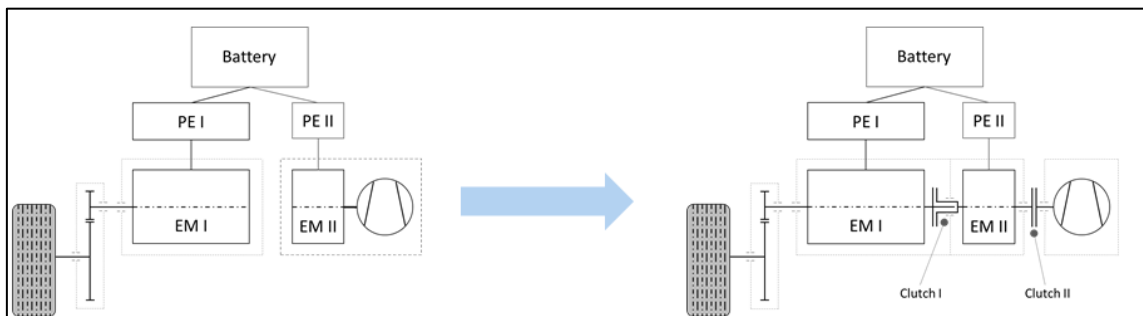


Abbildung 6: Konventioneller Elektrofahrzeugantrieb (links), TIOM-System (rechts)

Die Antriebseinheit darf optional auch weitere Hilfsaggregate antreiben können oder Zusatzaggregate beinhalten dürfen, sodaß in einem Elektro- oder Brennstoffzellenfahrzeug zu einem aus Batterien oder ggf. Brennstoffzellen bestehenden Power-Pack ein kompaktes Energy Management Pack eingebaut werden könnte, wie prinzipiell in der folgenden Skizze (Abbildung 7) angedeutet ist. Dies läßt weitere Optionen für andere Fahrzeugkonzepte offen. In diesem Projekt wird ausschließlich die Anwendung für ein Personenfahrzeug betrachtet.

Das dem Projekt übergeordnete Projektmanagement verfolgte in 9 Arbeitsschritten den Projektablauf und den Projektfortschritt (Abbildung 8), beginnend mit einer Kick-Off-Veranstaltung beim Projektträger und gefolgt von der durchgängigen Dokumentenerstellung der insgesamt 7 Meilensteininhalte in internen Meilensteinberichten. Um Dopplungen im vorliegenden Bericht zu vermeiden, werden die einzelnen Meilensteininhalte hier nur kurz umrissen.

M1: Kick-Off

M2: Lastenheft,

M3: Pflichtenheft/Spezifikation, FMEA, Erprobungsplan

M4: Zeichnungen/Designdokumente

MS5: Teile liegen vor

M6: Prüfbericht

MS7: Abschlussbericht

Die wichtigen Zwischenschritte und der zeitliche Ablauf des Projektes Im Einzelnen:

- Das Kick-Off (Meilenstein 1) wurde am 17.02.16 beim Projektträger in Köln abgehalten, s.a. II.1.1.1.
- Der Meilenstein 2, die Erstellung des Lastenheftes, wurde termingerecht am 31.03.16 abgeschlossen, siehe dazu II.1.1.2.
- Das Pflichtenheft (Meilenstein 3) wurde ebenso termingerecht zum 30.06.16 erstellt.
- Am 24.10.16 wurde ein erstes Treffen mit dem FVA – Arbeitskreis in Stuttgart durchgeführt. Für die Beteiligten war die erwartete Einsparung tendenziell wichtiger als ein ins Fahrzeug integrierbares fertiges Aggregat. Der Versuchsaufbau sollte in erster Linie die berechneten Erwartungen bestätigen. Der Schwerpunkt der Arbeiten wurde deshalb etwas mehr auf die Simulation verlegt, was auch die Komponentenentwicklung für die Prüfstanduntersuchungen etwas verzögerte. Die komplette Erfüllung des MS4 (Zeichnungserstellung) wurde deshalb um 6 Monate vom 31.09.16 auf den 31.03.17 geschoben.
- Am 08.03.17 erfolgte ein zweites Treffen mit dem FVA-Arbeitskreis in Frankfurt.



- Der Meilenstein 4 (Zeichnungen) wurde zum 31.03.17 abgeschlossen.
- Am 13.11.17 erfolgte ein drittes Treffen mit dem FVA-Arbeitskreis in Frankfurt. Als wichtiger Hinweis aus dem Arbeitskreis galt die Hinzunahme einer möglichen kurzzeitigen Leistungserhöhung bzw. Überlastbarkeit in die Simulation, speziell bei Asynchronmaschinen, die weniger temperaturanfällig sind als permanentmagneterregte Maschinen.
- Der Meilenstein 5 (Teile liegen vor) wurde abgeschlossen. Teile für den Prüfstandsumbau sind vorhanden, der Kompressor auch. Die Leistungselektronik ist bestellt, ebenso die Motorgehäuseteile. Es ist vorgesehen, alle Teile bis Ende März 2018 vorliegen zu haben. Damit wäre dieser Meilenstein um ein Jahr verzögert
- Aus Sicht des Projektmanagements wurde zu Beginn des Jahres 2018 vorgeschlagen, das Projekt um ein halbes Jahr in das Jahr 2019 hinein zu verlängern. Dies wurde im Jahr 2018 erledigt.
- Der Meilenstein 5 (Teile liegen vor) ist abgeschlossen.
- Erste öffentliche Vorstellung des TIOM-Systems auf der Messe Control 2018 in Stuttgart am 24.04.18 auf dem Gemeinschaftsstand des Clusters Mechatronik Baden-Württemberg zusammen mit der Fa. Kendrion.
- Viertes Treffen mit dem FAT-Arbeitskreis in Frankfurt am 20.06.18
- 20.-27.09.18 Vorstellung des TIOM-Systems auf der Messe IAA Nutzfahrzeuge 2018 in Hannover in der Halle 16 für Innovationen.
- Am 21.01.19 wurde in einem fünften Treffen mit dem FVA-Arbeitskreis in Frankfurt der aktuelle Stand vorgestellt.
- Der Meilenstein 6 (Prüfbericht) wurde zum 30.06.19 abgeschlossen.
- Der Projektabschluß erfolgte zum 30.06.19
- Abschließende Präsentationen waren für den 18.09.19 (Arbeitskreis FVA in Frankfurt) und den 04.12.19 (FVA-Informationstagung in Würzburg) vorgesehen

Die Durchgängigkeit der Meilensteininhalte Lastenheft, Pflichtenheft, FMEA, Erprobungsplan, Zeichnungen/ Designdokumente und Prüfbericht wurden in einer Durchgängigkeitsmatrix dokumentiert.

II.1.1.1. MS 1: Kick-Off

Beim Kick-Off-Treffen beim Projektträger in Köln wurde das Projekt vorgestellt und die Formalitäten zur Berichterstattung erläutert. Anwesend waren drei DLR-Kollegen aus dem DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte und Herr Zimmermann vom Ingenieurbüro Zimmermann sowie zwei Mitarbeiter des Projektträgers.

II.1.1.2. MS 2: Lastenheft

Die Lastenhefterstellung diente zur Festlegung der Nenngrößen für das zu entwickelnde TIOM-System. Die einzelnen Schritte werden in der Arbeitspaketbeschreibung zur Systemauslegung (AP 2) noch detailliert beschrieben. Der Bauraum für das TIOM-System (Abbildung 9, links) leitet sich aus zwei Referenzfahrzeugen ab. Als Referenz für Bauraum und Leistung dient der eSmart (Abbildung 9, mitte). Das TIOM-System soll auch für das DLR-interne Fahrzeugkonzept des Next Generation Car Urban Modular Vehicle (NGC-UMV) nutzbar sein (Abbildung 9, rechts).

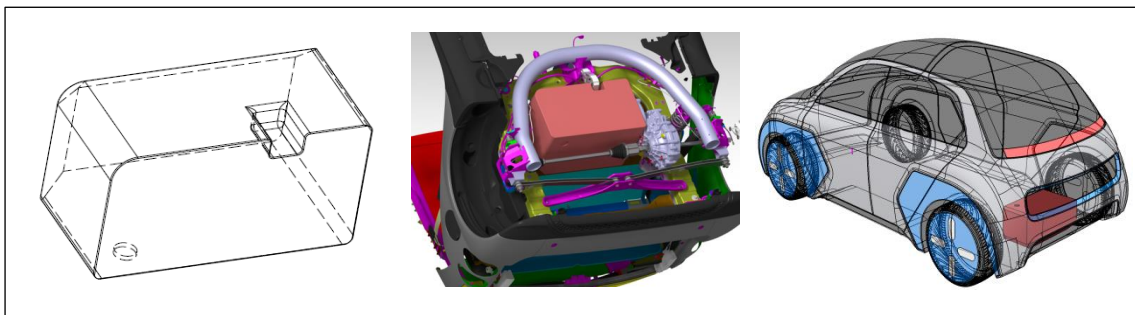


Abbildung 9: Bauraum und Einbau in eSmart sowie DLR-NGC-UMV

Das System soll beide Motoren unabhängig voneinander auf die Antriebsachse schalten können. Der Fahrmotor hat eine Maximalleistung von 50 kW, die Übersetzung 1:10 ist im Fahrzeug vorhanden. Die Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs liegt bei 135 km/h, der Fahrmotor muß ein Drehmoment von 100 Nm bis 5.000 1/min und 50 Nm ab 7.000 1/min erzeugen. Der Kompressormotor hat eine Maximalleistung von 10 kW und ein Drehmoment von 50 Nm bei 2.000 1/min. Der Kompressor ist ein Zweikammer - Flügelzellenverdichter eines Smart Fortwo Coupe (MC 01). Die Leistungselektronik wird mit einer Nennspannung von 400 V (passend für eSmart) betrieben. Der Umrichter für den Fahrmotor liefert 50 kW max. bei einer Drehfrequenz

von 12000 1/min, der Umrichter für den Kompressormotor: 10 kW max. bei einer Drehfrequenz von 12000 1/min = 900 Hz bei Polpaarzahl = 6. Als Eingangsgrößen werden Solldrehzahl oder Solldrehmoment vorgegeben, die Ausgangsgrößen sind Nenndrehzahl und Statorstrom. Das Einsparpotential wird auf ca. 1% durch Kopplung des Klimakompressors an die Achse und zu 9% durch Nutzung der beiden Motoren abgeschätzt. Dies ergibt ein gesamtes angenommenes Einsparpotential von ca. 10%. Die Anbindung des Kompressors erfolgt über eine an den kleineren Motor getriebene Riemenscheibe und einen Riemen.

Für die Darstellung der Machbarkeit eines solchen Konzeptes stehen für die Entwicklung nach Automotive-Standards bzgl. Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen keine ausreichenden Mittel zur Verfügung. Die Konzeptstudie und die Demonstration stehen hier im Vordergrund. Es wird ein Demonstrator mit TRL 4 (Versuchsaufbau im Labor) bzw. A-Musterstand angestrebt.

II.1.1.3. MS 3: Pflichtenheft/Spezifikation, FMEA, Erprobungsplan

Der Meilenstein 3 wurde ebenfalls im ersten Berichtszeitraum abgeschlossen und in einem separaten Meilensteinbericht MS3 dokumentiert. Das Pflichtenheft ist hauptsächlich identisch mit dem Lastenheft. Die FMEA leitet sich nach der Entwicklungsmethode aus der Traceability-Matrix unter Berücksichtigung der Lastenheft- und Pflichtenheftpunkte ab. Die FMEA ist hier auf dem System-Level gehalten, um die wichtigsten Risiken des Projektes im Vorfeld betrachten zu können. Wir sprechen in diesem Stand also von einer System-FMEA. Wesentliche offene bzw. kritische Kriterien sind:

1. Es bestehen noch Risiken bzgl. der Aussage zur Gesamtwirkungsgradverbesserung durch das TIOM-System. Dies betrifft die genaue Kenntnis zu Motoren- und Kompressorkennfelder, aber auch insbesondere die detaillierte Definition der Betriebsstrategien, mit denen das System gesteuert wird. Man wird unterscheiden müssen zwischen effizienzrelevanten Vorteilen, die sich dann nur in bestimmten Arbeitsbereichen realisieren lassen, und komfortrelevanten, die bei schnellem Abkühlen unter bestimmten Bedingungen dann wieder den Effizienzvorteil kompensieren können. Hier ist eine detailliertere Definition der Betriebsstrategien nötig.

2. Die Beschränkung auf permanentmagneterregte Maschinen erzwingt den Nachteil der vorhandenen Eisenverluste, wenn die Maschine im Leerlauf mit dreht, erbringt aber einen Effizienzvorteil gegenüber Asynchronmaschinen. Letztgenannte wiederum entlegen sich gewöhnlich selbst. Man wird diesen Effekt bei der Darstellung der Machbarkeit eines TIOM-Systems aus Zeitgründen vernachlässigen oder nur rechnerisch berücksichtigen müssen.

3. Eine genauere Untersuchung der Auswirkungen von räumlich getrenntem Klimakompressor und Expansionsventil ist nötig, da der Verdampfer gewöhnlich hinter dem Armaturenbrett, die meisten Zentralantriebe aber auf der Hinterachse angebracht sind. Diese räumliche Entfernung kann zur Effizienzreduzierung des Klimakreislaufs beitragen, welche wohlmöglich die Vorteile kompensieren können.

4. Käufliche Umrichter ermöglichen i.a. nicht die hohen Drehfrequenzen, wie sie für das TIOM-System wünschenswert sind. Zudem führen die hohen Drehzahlen zu kleinen Windungszahlen in den elektrischen Maschinen, was deren Induktivität besonders bei Einzelzahnwicklungen klein hält. Dies wiederum führt ggf. zu hohen Stromanstiegen in den Umrichter-Halbleitern mit auch entsprechenden Stromwärmeverlusten. Auch hier ist ein Kompromiß zwischen gewünschter Bauraumreduzierung und erreichbarer Effizienz zu finden. Wohlmöglich scheitert eine marktübliche Umrichterauswahl. Dann muß das System in kleineren Drehzahlbereichen getestet oder der Motor mit kleinerer Drehzahl oder gesehtem Wicklungssystem ausgelegt werden. Aus Zeitgründen wird man nicht mehrere Motoren aufbauen können.

5. Die dynamischen Eigenschaften des Systems sind noch relativ ungewiß. Das betrifft das Umschalten der elektrischen Maschinen auf der mechanischen ebenso wie auf der elektrischen Seite, aber auch das dynamische Verhalten eines Klimakompressors. Aus diesem Grund sollen die Fahrzyklen nicht durchgehend, sondern abschnittsweise durchfahren werden und die Maschinen manuell umgeschaltet werden.

Fazit

Zur Demonstration der Machbarkeit und zur wissenschaftlichen Untersuchung muß das System mit Einschränkungen aufgebaut und auf dem Prüfstand getestet werden. Es wird nicht in ein Fahrzeug eingebaut werden können.

Das Arbeitspaket 2 ist in vier Unterarbeitspakete gegliedert (Abbildung 10): Gesamtfahrzeug, Betriebsstrategie, Sensorik und Modularität. Bzgl. des Gesamtfahrzeuges erfolgt eine Unterteilung in die Arbeitsschritte Fahrzeuggröße, Nenngrößen und Gesamtenergieverbrauch.

II.1.2.1. AP 2.1 Gesamtfahrzeug

Das Methodische Vorgehen bei der Auslegung im Fahrzeug gliedert sich in folgende Punkte:

- Beschreibung verschiedener möglicher Fahrzeugkonzepte
- Bauraumstudie: Ableiten des maximal verfügbaren Bauraumes in einem Elektrosmart
- Berechnen des elektrischen Traktionsleistungsbedarfs des Referenzfahrzeugs
- Ableiten von Motormoment und Motordrehzahl für Haupt- und Hilfsantrieb. Unter dem Hauptantrieb wird der große Fahrmotor verstanden. Als Hilfsantrieb wird der Kompressormotor bezeichnet
- Berechnen des Einsparpotentials, durch nutzen des Hilfsantriebs zum Fahren in der Stadt bei ausgeschaltetem Hauptantrieb.
- Abschätzung des Energiebedarfs für die Innenraumkühlung im Sommerbetrieb
- Ermitteln des Einsparpotentials bei Nutzung der mechanischen Bremsenergie zur Innenraumkühlung
- Berechnen der Fahrzeugbeschleunigung unter Berücksichtigung der kombinierten Nutzung von Haupt- und Hilfsantrieb durch Boosten

II.1.2.1.1. AS 2.1.1 Fahrzeuggröße

Für die Auswahl der Fahrzeuggröße stehen aus bestimmten Gründen folgende Varianten zur Verfügung:

- Next Generation Car Urban Modular Vehicle NGC-UMV (DLR-internes Großprojekt zur Demonstration verschiedener Technologien)
- eSmart (vorhandenes Stadtfahrzeug)
- Renault Zoe (umfangreiche Erfahrungen aus eigenen Flottentests)

Im Folgenden werden die 3 Varianten kurz beschrieben. Zum Abschluss wird eine Fahrzeuggröße ausgewählt.

DLR-Next Generation Car (NGC)

Das DLR bearbeitet und demonstriert seine fahrzeugtechnischen Forschungsarbeiten schwerpunktmäßig im Projekt Next Generation Car (NGC). Das Projekt umfaßt die Entwicklung von Methoden, Werkzeugen und ausgewählten Technologien. Dabei werden drei Fahrzeugkonzepte mit unterschiedlichen Schwerpunktsetzungen betrachtet. Diese drei Fahrzeugkonzepte sind das Urban Modular Vehicle (UMV), das Safe Light Regional Vehicle (SLRV) und das Interurban Vehicle (IUV), siehe Abbildung 11.




| | |
|---|---|
| <p>Urban Modular Vehicle (UMV)</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Universal einsetzbares kompaktes Fahrzeug für den urbanen Bereich („Kleine Familie“ / „Handwerker, Zulieferfahrzeug“) • Viersitziges oder Transporter, ca. 3600 mm langes Fahrzeug der Mini-/Kompaktklasse |
| <p>Safe Light Regional Vehicle (SLRV)</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Kostengünstiges, sehr leichtes und sicheres Fahrzeug für junge Fahrzeugfahrer („Erstauto“ / „Einsteigerauto“) • Zweisitziges, ca. 4500 mm langes Fahrzeug in der Klasse L7E |
| <p>Interurban Vehicle (IUV)</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Komfortables Fahrzeug für den interurbanen Bereich bzw. überregionale und lange Strecken („Reisefahrzeug“) • Fünfsitziges, ca. 4500 mm langes Fahrzeug der Mittel- bzw. Oberklasse |

Abbildung 11: DLR Next Generation Car Fahrzeugkonzepte

Es ist daher aus Sicht des DLR möglich und auch hilfreich, die Anforderungen an das TIOM-System an eines dieser Fahrzeugkonzepte anzupassen. Aus erster Sicht kommt dabei das UMV in Betracht, dessen Grobkonzept in der folgenden Abbildung 12 dargestellt ist. Es handelt sich um ein Fahrzeug, daß hauptsächlich für den urbanen Einsatz gedacht ist, dessen Masse mit 680 kg relativ gering ist, im Energiemanagement optimiert ist, im Antriebstrang die Option zur Integration des Klimakompressors in den Fahrmotor hat, mit einem Leichtbaufahrwerk ausgestattet ist und mit einer drive-by-wire-Steuerung ausgestattet ist. Das Konzept zeichnet sich außerdem besonders durch seine Modularität in der Transportaufgabe (Personen oder

Gütertransport), in der Struktur (modulare Karosserie) und der Varianz im Antriebstrang (modularer Antrieb), aus (Abbildung 13).

NGC – Urban Modular Vehicle

Übersicht

Fahrzeugintelligenz

- Mehrere Automationsgrade von Assiiert bis Vollautomatisiert und Fahrerlos wählbar
- Volle 360° Umfelderfassung, sowie C2X-Vernetzung
- Kooperation mit dem Gesamtverkehr
- Konfigurierbare Innenraumgestaltung mit drive-by-wire
- Integration mobiler Endgeräte und intermodaler Reiseassistentz



Quelle: DLR

Fahrzeugkonzept

- Urbanes Konzept, Micro-/Miniklasse
- Modularisierbar 2+2 Sitzer, 2 + Cargo
- Intelligent, Leicht und Sicher
- Innenraumvariabilität
- Stückzahl 40.000 Stk/Jahr



Quelle: DLR

Fahrzeugstruktur

- Fahrzeugleermasse 680 kg
- Funktionsintegrierte Karosserie im Multi-Material-Design (z.B. strukturintegriertes Thermomanagement)
- Modulare Karosserie (z.B. in Fahrzeuglängsrichtung)
- Optimierte Strukturen speziell für batterieelektrisches Fahrzeug im Sinne des Purpose-Design
- Intelligente adaptierbare Sicherheitsstrukturen (aktiv/passiv)

Fahrwerk

- Modulare, mechatronische, integrierte Leichtaufbauwerke mit innovativen Werkstoffen
- Vorderachse: Doppelquerlenkerachse/ Querblattfeder mit Rad-integrierter Steer-by-Wire-Lenkung; Brake-by-wire.
- Hinterachse: Brake- und Drive-by-wire, radnaher Antrieb
- Integrierte Fahrwerkregelung



Quelle: DLR

Antriebsstrang

- Modularer elektrischer Antrieb über 2 x 25 kW Elektromotoren hoher Drehzahlspitzung auf der Hinterachse
- Integrierter Klimakompressor
- PCM-Energiespeicher



Quelle: DLR

Energiemanagement


- Intelligentes Gesamtfahrzeug-energiemanagement
- Bessere elektrische Effizienz
- Verknüpfung vorhandener Wärme- und Stoffströme von Kabine-, Batterie-, Elektromotorklimamanagement

Ansprechpartner: Marco Münster DLR-FK





Abbildung 12: NGC Urban Modular Vehicle


UMV Basic UMV Long UMV Cargo




UMV People mover UMV Cargomover




Modulare Karosserie



Modulare Transportaufgabe





Modularer Antrieb

Abbildung 13: Modulares urbanes Fahrzeugkonzept NGC-UMV mit modulatrer Struktur, modularer Innenraumgestaltung und modularer Antriebstrang

Für die angestrebten elektrischer Reichweite von 200 km und eine Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h wäre ein Antrieb mit 50 kW Leistung ausreichend. Da das Modularisierungskonzept auch für den Antrieb gilt, käme dieses Fahrzeugkonzept für die Dimensionierung des TIOM-Systems aus Sicht des DLR vorteilhaft in Frage. Die folgende Abbildung 14 zeigt den zum Zeitpunkt des Projektstarts vorhandenen Stand des UMV mit dem vorgesehenen Bauraum für das TIOM-System.

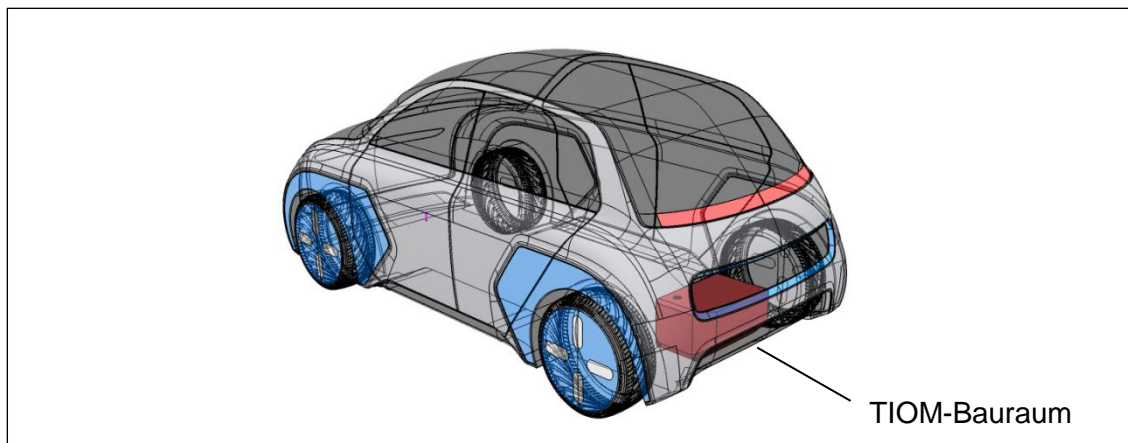


Abbildung 14: TIOM-Bauraum im DLR-Urban Modular Vehicle-Konzept

DLR-Versuchsfahrzeug eSmart

Am Institut für Fahrzeugkonzepte existierte zu Beginn des Projektes ein eSmart als Forschungsfahrzeug, das für die Demonstration neuartiger Energiearchitekturen genutzt wird. So ist z.Zt. ein Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzellen-Range-Extender als Nachrüstsatz eingebaut. Er ermöglicht die Erhöhung der Reichweite im Winter um den Faktor 2, d.h. auf die dreifache Distanz, indem er Wasserstoff als zusätzlichen Energieträger und die Abwärme des Brennstoffzellensystems für die Klimatisierung der Kabine nutzt (Abbildung 15). Dieses Fahrzeug kommt mit einer Dauerleistung von 35 kW und einer Spitzenleistung von 55 kW aus. Dieses Fahrzeug kann auch für die Demonstration des TIOM-Systems genutzt werden.



Abbildung 15: DLR-Versuchsfahrzeug eSmart mit HT-PEM-Brennstoffzellen-Range-Extender

Neben der Zugriffsmöglichkeit auf die Fahrzeugsteuerkomponenten ist von dem Fahrzeug auch ein CAD-Datensatz vorhanden, über dessen Hilfe die Bauraummaße für den TIOM-Konzeptmotor abgeleitet wurden, s. Abbildung 16. Das Fahrzeug wird vom Elektromotor über ein ins Getriebe integriertes Differential über die Hinterräder angetrieben.

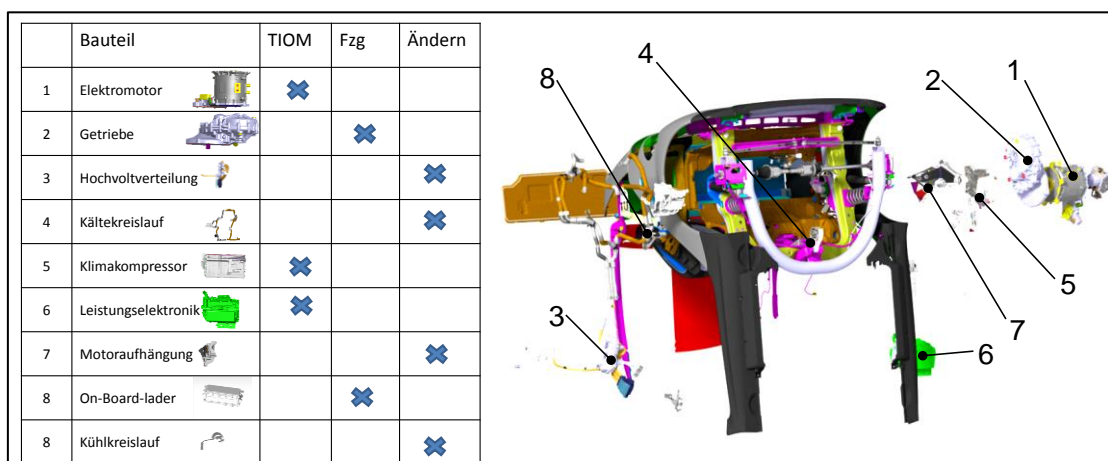


Abbildung 16: links: Übersicht der im Demonstratorfahrzeug verbauten Komponenten; rechts: Packaging der Komponenten im Ursprungsfahrzeug

Entfernt wurden alle in der Heckpartie des Fahrzeuges verbauten Komponenten. Die wichtigsten sind Klimakompressor, Elektromotor samt Leistungselektronik, Hochvoltsystem inkl. Hochvoltverteilerplatte, Kühlleitungen, On-Bord-Batterielader

sowie das Getriebe mit integriertem Differential. In das TIOM-Konzept sollen der Hauptantrieb, die Leistungselektronik, der Klimakompressor und der dafür benötigte Hilfsantrieb integriert werden. Für den Austausch des ursprünglich im Demonstratorfahrzeug eingebauten Elektromotors ist der mechanische Motoranschluss konstruktiv anzupassen. Weiter ist beim Einsatz des TIOM - Motors die Leitungsführung von Hochvolt- und Kühlsystem sowie des Kältemittelkreislaufs anzupassen. Zur Maximierung des Bauraumes wurde das Differential samt Getriebe um 200 mm in Richtung des hinteren linken Rades verschoben, s.a. Abbildung 17.

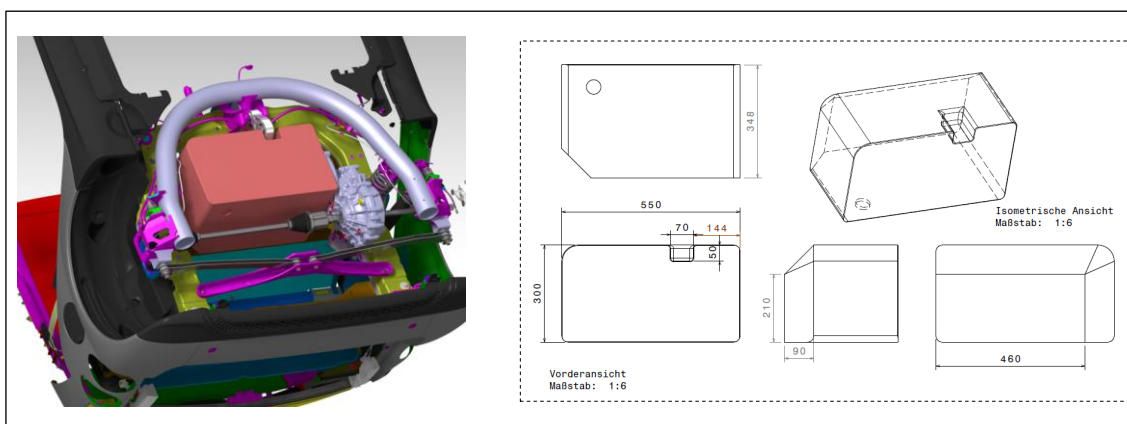


Abbildung 17: links: Packagingableitung für den TIOM-Motor mit um 200 mm verschobenem Getriebedifferential; rechts: Verfügbarer Bauraum im Demonstrator

Der maximal zur Verfügung stehende Bauraum reicht von der Hinterachse bis unter die Kofferraumabdeckung. Der Bauraum beinhaltet die in der linken Hälfte von Abbildung 16 aufgelisteten TIOM-Komponenten inklusive der Hochvoltverteilerplatte. Der Anschlussflansch muss auf die Getriebewelle passen. Es ist angedacht, die Motoraufhängungspunkte im Demonstratorfahrzeug zu verwenden.

Flottenversuche aus Projekt *InitiativE-BW*

Für das Design des TIOM - Motors fließen Ergebnisse aus dem Projekt *InitiativE-BW* mit ein. In diesem Projekt wurde die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen untersucht (Landesförderung für Leasingfahrzeuge). Ziel des Projektes war es, 300 Elektrofahrzeuge auf den Straßen Baden Württembergs zu nutzen und das Nutzerverhalten zu bewerten. Einige der Leasingfahrzeuge wurden mit einem Onboard-Diagnosedatenlogger ausgestattet, welcher am Fahrtende die vom OEM

freigegebenen, und auf der OBD–Schnittstelle verfügbaren Daten mittels UMTS an die gesicherten DLR–Server übermittelt. Zum jetzigen Stand des Projektes waren circa 60% aller Leasingfahrzeuge ein Renault Zoe. Abbildung 18 zeigt die Tagesfahrleistungen sowie die Energieverbräuche von 26 erfassten Renault Zoe, die eine gemeinsame Gesamtfahrleistung von 102.000 km zurückgelegt haben.

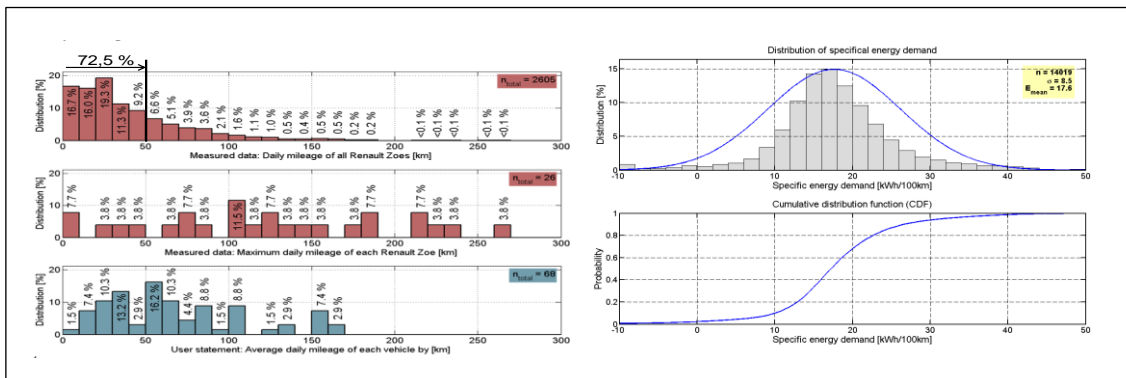


Abbildung 18: Tagesfahrleistungen (links) und spezifischer Energieverbrauch der ausgewerteten Renault Zoe im Projekt InitiativeE-BW

Es ist ersichtlich, dass 72,5% der Fahrzeuge eine Tagesfahrleistung von unter 50 km haben (Diagramm links oben). Aus einer Auswertung von 14.000 Fahrten ergibt sich, daß die größte Auftretenshäufigkeit des Energieverbrauchs bei 17,6 kWh/100 km liegt (mit einer Standardabweichung von 8,5 kWh (rechts oben)). Die relativ hohe Standardabweichung kann durch die Höhendifferenz zwischen Start- und Endpunkt erklärt werden. Sie beträgt bei einigen 3D-Streckenauswertungen bei wenigen Kilometern Fahrstrecke bis zu 300 Höhenmeter. Von diesen Fahrzeugen liegen relativ viele Nutzerdaten vor. Mit installierten 46 kW Dauer- und 65 kW maximaler Leistung fällt auch dieses Stadtfahrzeug in den anvisierten Bereich der beiden Vorgängerbeispiele. Das Packaging orientiert sich auch hier am verfügbaren Bauraum eines e-Smarts und dem NGC–Fahrzeugkonzept Urban Modular Vehicle.

Auswahl der Fahrzeuggröße

Übereinstimmend sind alle drei genannten Beispiele Stadtfahrzeuge. Der eSmart ist als Versuchsfahrzeug vorhanden, die Technologie läßt sich gut in das DLR-interne Projekt NGC integrieren, und vom Zoe liegen viele Flottenversuchsdaten sowie Simulationsmodelle vor. Daher wird für das Lastenheft der Bauraum des eSmart

vorgegeben, sodaß er sich auch in das NGC-UMV integrieren läßt. Im eSmart ist ein Differential vorhanden, das in diesem Projekt auch nicht ersetzt werden soll.

II.1.2.1.2. AS 2.1.2 Nenngrößen

Für eine erste Abschätzung des Nutzens und der Nenngrößen des TIOM-Systems wird eine Simulation durchgeführt, die der Einfachheit wegen mit den Kenndaten des Renault Zoe gespeist ist. Die charakteristischen Parameter sind in untenstehender Tabelle 1 zusammengefasst:

Tabelle 1: Fahrzeugparameter eines Renault Zoe zur Antriebsstrangauslegung

| Fahrzeug | $m_{\text{Vehicle,leer}}$ | m_{Sim} | $m_{\text{Fahrzeug,max}}$ | m_{Dyn} | A_{front} | C_W | f_{roll} |
|----------|---------------------------|------------------|---------------------------|------------------|---------------------|-------|-------------------|
| Zoe | 1503 kg | 1600 kg | 1943 kg | 150 kg | 2,18 m ² | 0,29 | 0,015 |

Traktionsleistungsbedarf für einen Renault Zoe als Auslegungsgrundlage

Als Fahrprofile wurden der NEDC, der WLTP Class II sowie der WLTP Class III als Vergleichszyklen gewählt. Ein DLR-eigener Realfahrtzyklus zwischen den DLR-Standorten Stuttgart (ST) und Lampoldshausen (LA), Abbildung 19, wird für weitere Vergleiche mit aufgenommen.

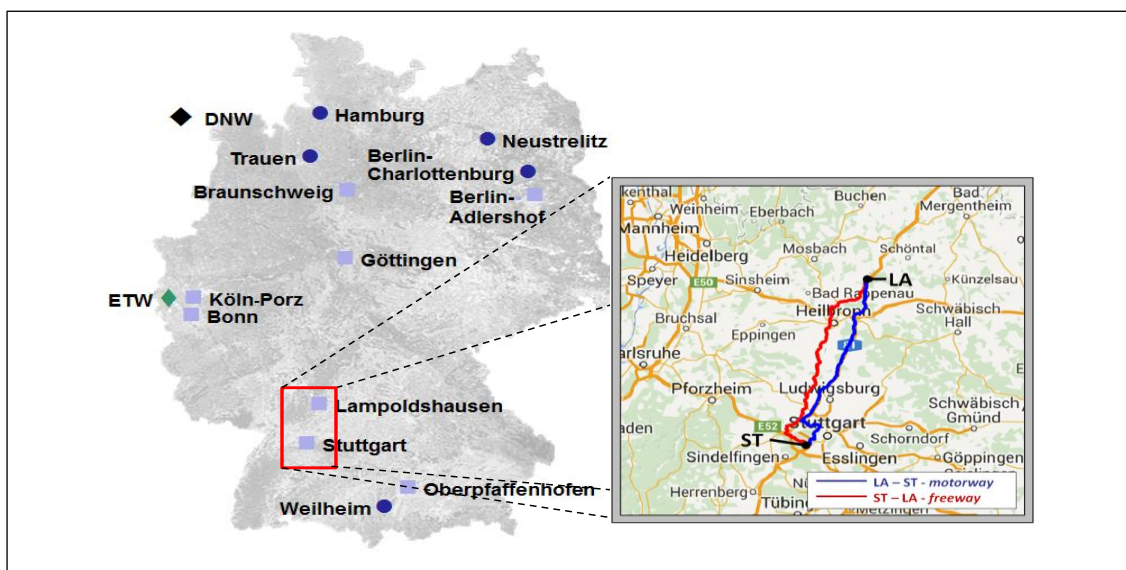


Abbildung 19: DLR - Referenzstrecke zwischen den DLR-Standorten Stuttgart (ST) und Lampoldshausen (LA)

Die mittleren Leistungsanforderungen für einen Renault Zoe wurden über die fahrdynamischen Grundgleichungen berechnet. Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Es ergibt sich ein mittlerer Radleistungsbedarf zwischen 3,1 kW (WLTP – Class II) und 14,4 kW (LA-ST, Autobahn).

Tabelle 2: Zykluszeit, Weglänge, Durchschnittsgeschwindigkeit und mittlere Radleistung

| | NEDC | WLTP - Class II | WLTP - Class III | ST-LA | LA-ST |
|---------------------------------------|------|-----------------|------------------|-------|-------|
| Zykluszeit [s] | 1184 | 1477 | 1800 | 5792 | 3133 |
| Weglänge [km] | 11,0 | 14,6 | 23,3 | 95,3 | 81,0 |
| Durchschnittsgeschw. [km/h] | 33,4 | 35,7 | 46,5 | 59,2 | 93,1 |
| Mittlerer Leistungsbedarf am Rad [kW] | 3,5 | 3,1 | 5,9 | 5,9 | 14,4 |

Dies erscheint zunächst als wenig, täuscht aber über die maximal benötigten Leistungsanforderung hinweg. Die benötigte Maximalleistung am Rad wurde über eine statistische Auswertung ermittelt. Dafür wurden die Daten in 1 kW-Schritte klassiert und aufbereitet. Untenstehende Abbildung 20 zeigt das Ergebnis der statistischen Auswertung.

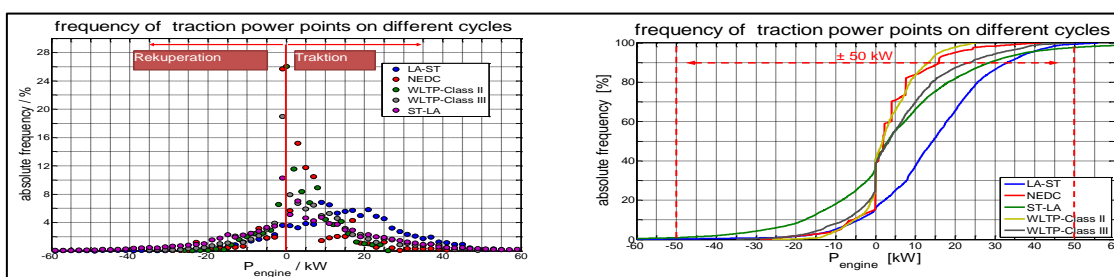


Abbildung 20: Auftrittswahrscheinlichkeit verschiedener Motorleistungsbetriebspunkte in den unterschiedlichen Fahrzyklen (links); kumulierte Häufigkeit der Motorleistungspunkte (rechts)

Der Schwachlastzustand ist vor allem bei den Normprüfzyklen NEFZ und WLTP der dominierende Fall. Erst bei den DLR–Realfahrzyklen zwischen Stuttgart und Lampoldshausen werden häufiger hohe Radleistungen über 20 kW benötigt. Eine kumulierte Betrachtung der benötigten Leistungen führt zu dem Entschluss, dass eine Antriebsmaschine mit 50 kW eine sinnvolle Auslegungsgröße ist. Hiermit können 98% der berechneten Betriebspunkte aller Zyklen abgedeckt werden.

Auslegung des Hauptantriebs

Für die Berechnung des Motormomentes und der Motordrehzahl wurde ein Getriebe mit einer Übersetzung von 10:1 sowie der Reifendurchmesser von 17“-Rädern verwendet, siehe Tabelle 3. Um die Maximalgeschwindigkeit von 135 km/h zu erreichen, muss der Hauptantrieb eine Drehzahl von 12.000 1/min aufweisen.

Tabelle 3: Randbedingungen zur Berechnung der Motorwellenleistung

| Fahrzeug | M_{Sim} | P_{rad} | V_{Max} | r_{Dyn} | $i_{Getriebe}$ |
|----------|-----------|-----------|-----------|-------------|------------------|
| Zoe | 1600 kg | 50 kW | ~135 km/h | 0,3 m (17") | 10:1 (Mot:Welle) |

Abbildung 21 zeigt die Drehmomenten-Drehzahlcharakteristik am Motor für die unterschiedlichen Zyklen und unter der Voraussetzung, daß ein Getriebe mit einer Übersetzung 10:1 dazwischengeschaltet ist.

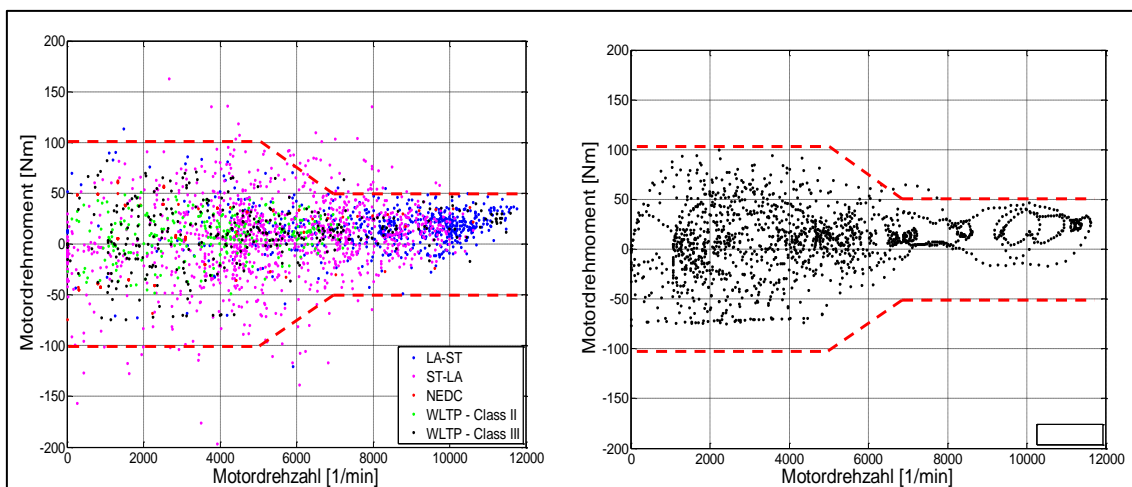


Abbildung 21: kombiniertes Drehmoment-Drehzahldiagramm aller Fahrzyklen mit einer Zeitauflösung von 30s (links); Drehzahl-Drehmoment - Diagramm im Zyklus WLTP - Class III mit einer Zeitauflösung von einer Sekunde (rechts)

Bei einem Drehmoment von 100 Nm erfüllt der Hauptantrieb die Drehmomentanforderungen aus den Fahrzyklen. Das Moment muss bis zu einer Grenzdrehzahl von 5.000 1/min aufzubringen sein, Tabelle 4. Ab einer Drehzahl von 7.000 1/min reichen 50 Nm Drehmoment an der Motorwelle aus.

Tabelle 4: Auslegungsergebnisse für den Hauptantrieb

| i_{Motor} | $M_{\text{Motor,Grenz,Min}} \text{ [Nm]}$ | $n_{\text{Motor,Grenz,Min}} \text{ [1/min]}$ | $n_{\text{Motor,Max}} \text{ [1/min]}$ | $M_{\text{MotorMax}} \text{ [Nm]}$ |
|--------------------|---|--|--|------------------------------------|
| 10:1 | 100 Nm | 5.000 | ~ 12.000 | ~50 Nm |

Auffallend ist die Drehmoment/Drehzahlverteilung in den unterschiedlichen Fahrzyklen. Es ist ersichtlich, dass für die Fahrzyklen NEFZ (kleine rote Striche im linken Diagramm) und WLTP (rechts) bei geringen Drehzahlen häufig auch geringe Drehmomente gefordert werden. Aus diesem Grund liegt der Gedanke nahe, für langsame Stadtfahrten, wie sie beispielsweise im Feierabendverkehr auftreten, den Hilfsantrieb für den Klimakompressor etwas größer auszulegen. Dadurch kann in der Stadt mit dem Hilfsantrieb gefahren werden, der wegen der kleineren Dimensionierung im Vergleich zum Hauptantrieb in einem besseren Wirkungsgrad betrieben wird.

Auslegung des Hilfsantriebs zum Fahren

Das ausschließliche Fahren mit dem Hilfsantrieb soll in der Stadt bis <50 km/h möglich sein. Bei höheren Geschwindigkeiten bzw. Leistungen können durch die Anordnung von Haupt- und Hilfsantrieb beide Maschinen gleichzeitig auf die Motorwelle wirken. Die Auslegung des Hilfsantriebs erfolgt für den Stadtteil des WLTP, s. Abbildung 22.

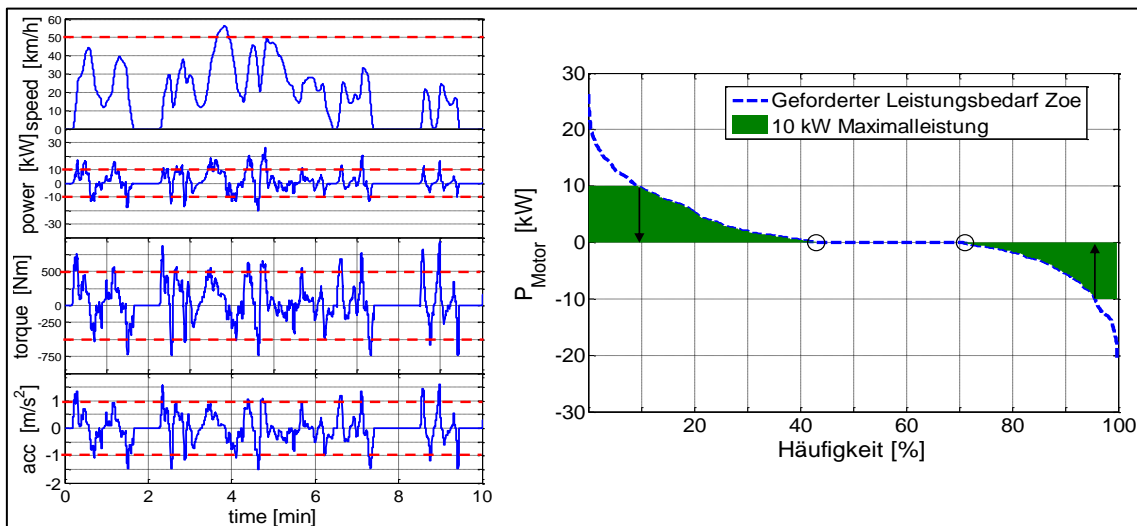


Abbildung 22: Geschwindigkeit, Leistung, Drehmoment sowie Beschleunigungen am Rad im WLTP - Class III - Stadtfahrzyklus (links); Kumulierte Darstellung des Streckenleistungsbedarfs im WLTP - Class III (rechts)

Eine Auswertung ergab, dass mit 10 kW maximaler Antriebsleistung 75% der Traktionslastzustände im WLTP abgedeckt werden können (in der Abbildung 22 rechts ist das der linke grüne Traktions-Bereich zwischen 10% und 40% Häufigkeit). Mit dem maximalen Motordrehmoment von 50 Nm ist aus dem Stand heraus eine maximale Beschleunigung von bis zu $1 \frac{m}{s^2}$ zu erreichen, Tabelle 5. Ein Hilfsantrieb mit 50 Nm Drehmoment und 10 kW Leistung scheint eine sinnvolle Ergänzung zum Hauptantrieb darzustellen, falls der Hilfsantrieb für langsame Stadtfahrten genutzt werden soll.

Tabelle 5: Auslegungsergebnisse für den Hilfsantrieb (Kompressormotor)

| i_{Motor} | $M_{Motor,Soll} [Nm]$ | $n_{Motor,Soll} [1/min]$ | $n_{Motor,Max} [1/min]$ | $M_{MotorMax} [Nm]$ |
|-------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 10:1 | 50 Nm | 2.000 | ~ 10.000 | ~50 Nm |

Durch die Limitierung auf 50 Nm sowie einer maximalen Hilfsantriebsleistung von 10 kW kann ein Zoe im WLTP–Class III Stadtanteil nicht durchgängig mit dem Hilfsantrieb fahren. Hierfür müssen zukünftig geeignete Betriebsstrategien für einen kombinierten Betrieb von Haupt- und Hilfsantrieb entwickelt werden.

Auslegung des Hilfsantriebs zum Fahren

Mit den bisher gewonnenen Ergebnissen wurden die Drehmoment-Drehzahldiagramme der gesamten Maschine abgeleitet. Durch das gemeinsame Wirken von Haupt- und Hilfsantrieb auf einer Motorwelle soll eine zusätzliche Boost-Funktion verwirklicht werden. Nachfolgende Abbildung 23 zeigt das kombinierte Drehmoment/Drehzahldiagramm von Haupt- und Hilfsantrieb.

Mit der ausgewählten Antriebsstrangkombination können die geforderten 100 Nm Drehmoment bei 5000 1/min mit dem 50 kW–Fahrmotor erzeugt werden. Zur Verwirklichung der Boost-Funktion für Überholvorgänge wird die Maximaldrehzahl des Elektromotors auf 10.000 1/min festgelegt. Dadurch kann der Hilfsmotor bis zu einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 113 km/h auf die Antriebswelle wirken. Das kombinierte Motordrehmoment von Haupt- und Hilfsantrieb an der Abtriebswelle steigt für Überholvorgänge zwischen 50...113 km/h um 21...10 Nm. Das entspricht einer Drehmomentsteigerung um 20% im Vergleich zur ausschließlichen Nutzung des Hauptantriebs.

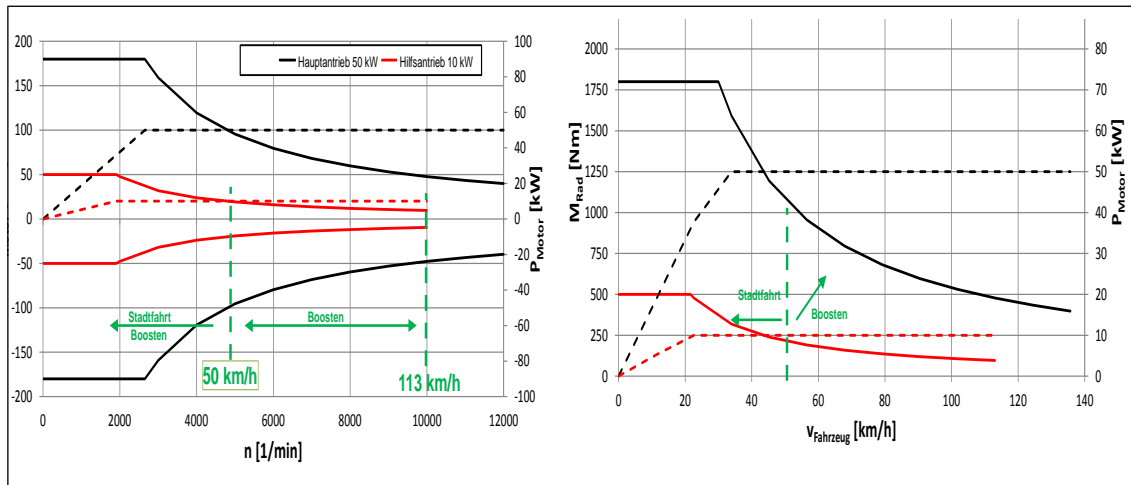


Abbildung 23: Drehmoment-Drehzahldiagramm einer kombinierten Haupt- und Hilfsantriebseinheit mit unterschiedlichen Drehzahlgrenzen (links); Raddrehmoment in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit (rechts)

II.1.2.1.3. AS 2.1.3 Gesamtenergieverbrauch

In diesem Arbeitspaket sollen die Antworten auf folgende 3 Fragen geliefert werden:

- Wie hoch ist das Einsparpotential durch Nutzen der mechanischen Bremsenergie zum Betreiben des Klimakompressors im Sommerbetrieb?
- Wie hoch sind die Wirkungsgradvorteile des Hilfsantriebs in der Stadtfahrt im Vergleich zum ausschließlichen Fahren mit dem Hauptantrieb?
- Wie hoch ist der Beschleunigungsvorteil bei der kombinierten Nutzung von Haupt- und Hilfsantrieb beim Überholen?
-

Einsparpotential beim Nutzen der mechanischen Bremsenergie für die Klimatisierung im Sommerbetrieb

Nachfolgende Abbildung 24 zeigt die Klassische Energiewandlungskette für das Kühlen eines konventionellen Elektrofahrzeuges (links) sowie ein mit TIOM ausgestattetes Fahrzeug während der Rekuperation (rechts). Sowohl für ein konventionelles Fahrzeug als auch für ein mit TIOM ausgestattetes Fahrzeug werden 2 Umrichter benötigt: ein großer Umrichter für den Antriebsmotor sowie ein Hilfsumrichter für den Hilfsantrieb. Der Hilfsantrieb treibt über eine mechanische Welle den Verdichter an. Als Energiespeicher kommt eine konventionelle Traktionsbatterie zum Einsatz, die Hilfsantrieb und Antriebsmotor mit elektrischer Energie versorgt.

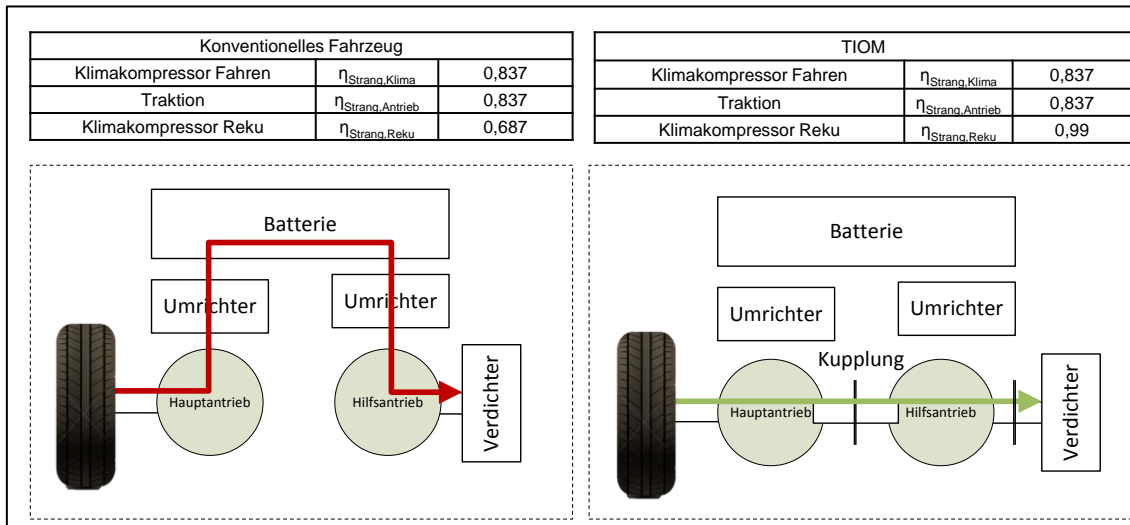


Abbildung 24: Energiewandlungskette eines Elektrofahrzeuges beim Kühlen mittels Rekuperationsenergie (links); Energiewandlungskette eines über eine mechanische Kupplung gekoppelten Kältemittelverdichters an die Antriebsmotorwelle (rechts)

Die gespeicherte elektrische Energie wird in beiden Antriebsstrangvarianten mit einem angenommenen Wirkungsgrad von jeweils circa 84% in Fahrenergie und Kühlenergie umgewandelt. Für den Kältemittelverdichter wird von 5 kW Antriebsleistung ausgegangen. Dieser ergibt sich bei einer zu installierenden Kälteleistung von circa 8 kW, bei einem COP von 1.8. Das entspricht ungefähr den Richtwerten aus DIN 1946-3 über die zu installierende Kühlleistung für PKW-Fahrzeuge.¹ Unterschiede zwischen konventionellen und mit dem TIOM ausgestatteten Antriebskonzepten ergeben sich in den Bremsphasen. In diesen wird mit beiden Ansätzen zuerst elektrisch gebremst und die Batterie geladen. Reicht die elektrische Bremsleistung des Motors nicht aus, so wird über eine mechanische Bremse die kinetische Energie des Fahrzeuges in Wärme umgesetzt. Während des Bremsvorganges ergeben sich folgende Energieflusspfade:

- E-Fahrzeug: Die durch den Antriebsmotor zurückgespeiste Energie wird über einen Umrichter in die Traktionsbatterie zurückgeführt und zwischengespeichert. Gleichzeitig wird der Batterie über den Hilfsantrieb eine Klimatisierungsenergie für den Verdichter entnommen. Die vom Antriebsmotor

¹ Zu installierende Kühlleistung für Kabinen zwischen 2...4m³: 3...7 kW bei 40°C; 40%rF; 1 kW/m² Solar

rekuperierte Energie kommt also mit einer Gesamteffizienz von ca. 69% am Verdichter an.

- Rekuperation TIOM: Durch einen direkten mechanischen Kraftschluss mittels Kupplung zwischen Antriebswelle und Kältemittelverdichter wird die Wirkungsgradkette deutlich verkürzt. Durch den mechanischen Kraftschluss und nicht näher quantifizierbaren Reibschlussverlusten während des Kuppelvorganges wird für die Klimatisierung von einem Gesamtwirkungsgrad von 99% ausgegangen.

Der Effizienzvorteil des TIOM-Konzeptes lässt sich über die Kenntnis des mechanischen Bremsanteils quantifizieren. Für die hier aufgezeigten Betrachtung wird sowohl für das konventionelle Elektrofahrzeug als auch für das TIOM-Konzept die Bremsleistung des Hauptantriebs auf 20 kW begrenzt.²

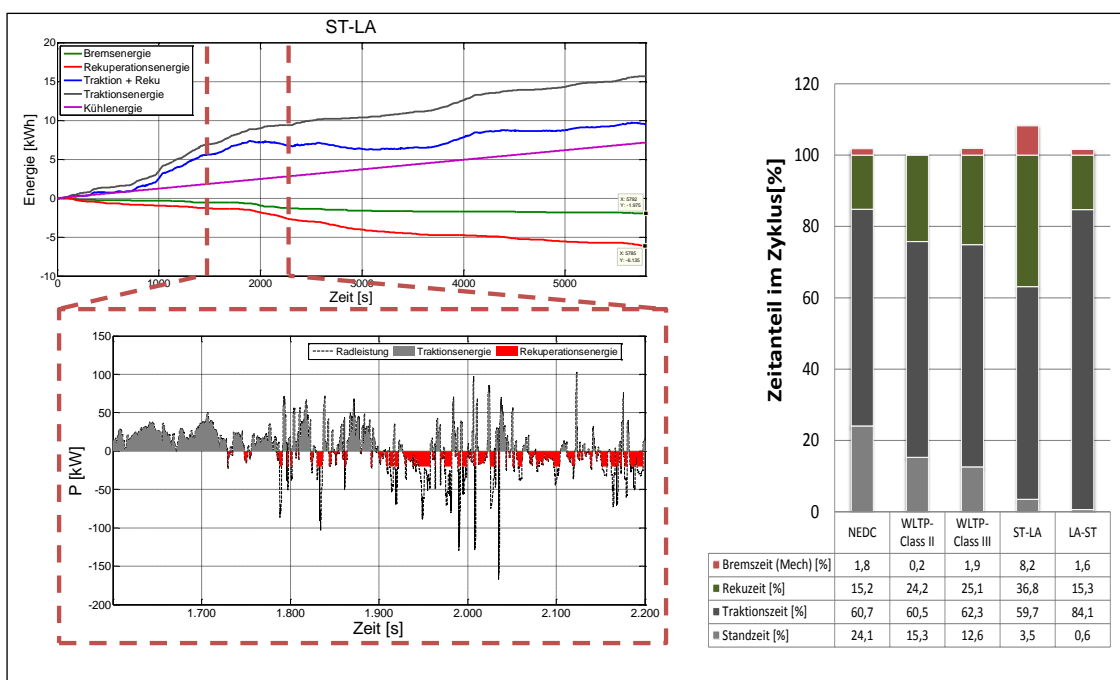


Abbildung 25: Energien am Rad im Zyklus ST→ LA (oben links); Auszug von Rekuperationsanteil (rot) und mechanischen Bremsbedarf (gepunktet) (unten links); Mechanischer Bremszeitanteil im Zyklus (rechts)

² 20 kW entspricht bei einer 20 kWh-Traktionsbatterie einen maximalen Ladebelastung von 1C

Eine Auswertung der Ergebnisse (Abbildung 25) ergab, dass unter den oben genannten Voraussetzungen der mechanische Bremsanteil zwischen 0,2% (WLTP – Class II) und 8,2% (ST→LA) beträgt. Über die Kenntnis des mechanischen Bremsanteils wird der Energiebedarf für das Klimatisieren und das Fahren berechnet.

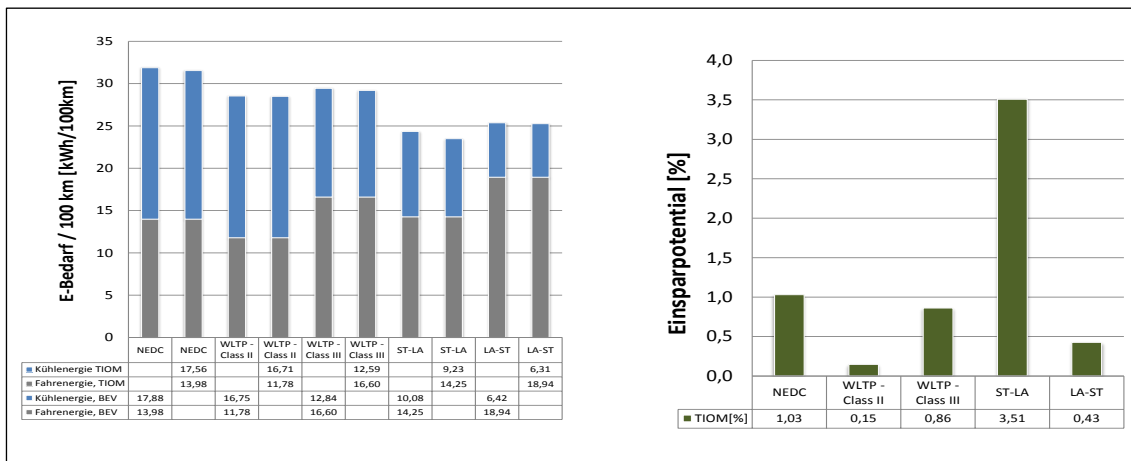


Abbildung 26: Energiebedarf und Einsparpotential bei unterschiedlichen Fahrzyklen

Der wirkungsgradbehaftete Energiebedarf für ein Batteriefahrzeug beträgt zum Fahren zwischen 11,8 kWh/100 km (WLTP – Class II) und 18,9 kWh/100 km (LA→ST, Autobahn). Bei einem elektrischen Dauerleistungsbedarf des Verdichters von 5 kW benötigt das Elektrofahrzeug zwischen 24,3 kWh/100 km (ST→LA, Überland) und 31,9 kWh/100 km (NEDC) an elektrischer Energie, Abbildung 26. Ersetzt man die konventionelle Antriebseinheit durch den TIOM – Motor, und nutzt die mechanische Bremsenergie für das Kühlen, so ergibt sich ein Einsparpotential zwischen 1% (NEFZ) und 3,5% (ST→LA, Überland).

II.1.2.2. AP 2.2 Betriebsstrategie

Betriebsstrategie „Fahren mit dem Hauptantrieb“

Der Hauptantrieb des TIOM – Motors soll bei der ersten Abschätzung aus einer permanenterregten Synchronmaschine bestehen. Da zum frühen Projektstand noch keine elektrische Maschine vorhanden ist, wurde ein veröffentlichtes Kennfeld digitalisiert, und skaliert als Grundlage für die Wirkungsgradstudien verwendet.

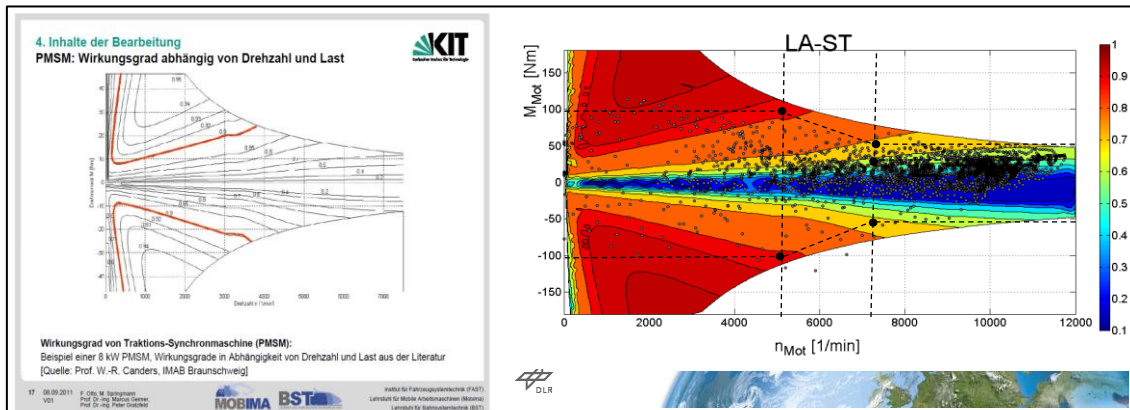


Abbildung 27: Wirkungsgradkennfeld einer 8 kW PSM – Maschine, veröffentlicht vom IMAB Braunschweig (links); Digitalisiertes und skaliertes Wirkungsgradkennfeld mit Hüllkurve (rechts)

Abbildung 27 links zeigt das ursprüngliche Kennfeld aus der Veröffentlichung. Auf der rechten Seite ist das skalierte Kennfeld der Maschine aufgezeigt. Es handelt sich um eine 50 kW Antriebsmaschine mit einem maximalen Moment von 180 Nm. Darin eingezeichnet sind die Drehmomentanforderungen eines Renault Zoe auf der Autobahnstrecke zwischen Lampoldshausen und Stuttgart mit einer Zeitauflösung $\Delta t = 1s$. Die gemittelten Wirkungsgrade der betrachteten Zyklen variieren in dem skalierten Kennfeld zwischen 50% (LA → ST; Autobahnfahrt) und 65% (NEDC), Tabelle 6.

Tabelle 6: gemittelte Wirkungsgrade einer 50 kW - Antriebsmaschine im Zyklus

| | NEDC | WLTP Class II | WLTP Class III (complete) | ST - LA | LA - ST |
|--|-------|---------------|---------------------------|---------|---------|
| $\eta_{\text{Mittel}50\text{kW}\text{Hauptantrieb}}$ | 0,648 | 0,614 | 0,629 | 0,585 | 0,498 |

Betriebsstrategie „Fahren mit dem Hilfsantrieb“

Für den Vergleich zwischen Haupt- und Hilfsantrieb wurde der Stadtfahranteil aus des WLTP – Class III herangezogen. Dieser hat einen Anteil am Gesamtfahrzyklus von circa 33%. Das Kennfeld des Hilfsantriebs wurde auf eine 10 kW Antriebsmaschine mit einem maximalen Drehmoment von 50 Nm skaliert. Die Maximaldrehzahl der elektrischen Maschine wurde auf 10.000 1/min begrenzt.

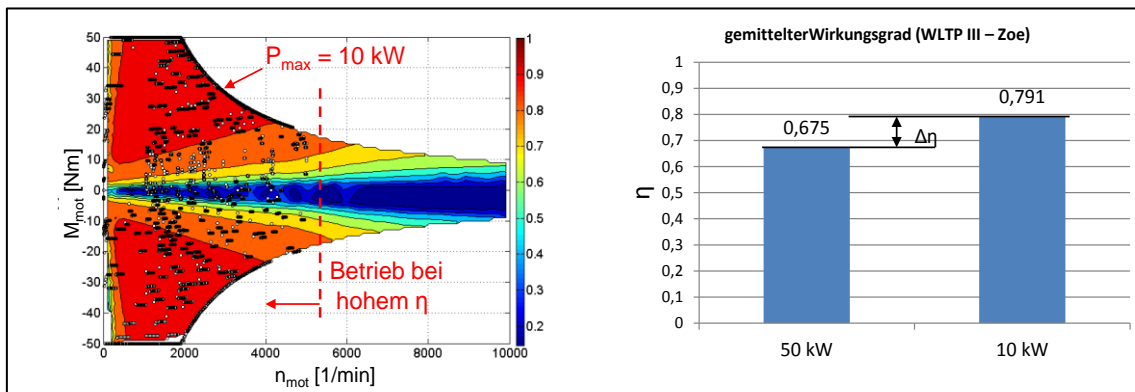


Abbildung 28: links: Wirkungsgradkennfeld einer skalierten 10 kW - Maschine; rechts: gemittelter Wirkungsgrade im WLTP – Class III Stadtzyklus beim Einsatz einer 50 kW oder einer 10 kW Antriebsmaschine

Durch die Getriebeübersetzung von 10:1 und den geringen Geschwindigkeiten werden am Elektromotor nur Drehzahlen bis max. 5000 1/min benötigt. Durch die Limitierung der elektrischen Maschine auf 10 kW können nur 75% der Betriebspunkte im Zyklus abgedeckt werden. Bedingt durch die hohen Lastpunkte erhöht sich der mittlere Wirkungsgrad von 67,5% beim Fahren mit dem Hauptantrieb auf 79% beim Fahren mit dem Hilfsantrieb, s. Abbildung 28. Das entspricht einen Wirkungsgradvorteil von circa 12%.³

Betriebsstrategie „Boosten mit dem Hilfsantrieb“

Die Beschleunigungsleistung des Fahrzeuges ergibt sich aus der elektrischen Maximalleistung des Elektromotors abzüglich der Verluste durch Rollreibung, Luftwiderstand und Steigung. Die Ergebnisse sind in folgender **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** graphisch aufgetragen. Zum konstanten Fahren einer Geschwindigkeit von 135 km/h müssen circa 32 kW an elektrischer Leistung durch den Hauptantrieb aufgebracht werden. Die vorhandene Zugkraftreserve von 18 kW reicht zum Halten der Maximalgeschwindigkeit bis zu einer Steigung von 3%. Das Fahrzeug kann in 4 Sekunden von 0 auf 50 km/h und innerhalb von 13,5 Sekunden auf 100 km/h beschleunigt werden. Beim ausschließlichen Fahren mit dem 10 kW Hilfsantrieb erreicht das Fahrzeug nach knapp 55 Sekunden eine Maximalgeschwindigkeit von 80

³ Der 10 kW Hilfsantrieb kann bei alleinigem Betrieb nur 75% der Leistungsanforderungen im Zyklus abdecken

km/h auf der Ebene. Beim Beschleunigen mit dem Hilfsantrieb von 0 auf 50 km/h werden mit dem Hilfsantrieb 20 Sekunden benötigt. Beim Einsetzen von beiden Antriebsmotoren kann das Fahrzeug in 10,8 Sekunden von 0 auf 100 km/h beschleunigt werden. Durch das kombinierte Nutzen verbessert sich die Beschleunigungszeit um 20%.

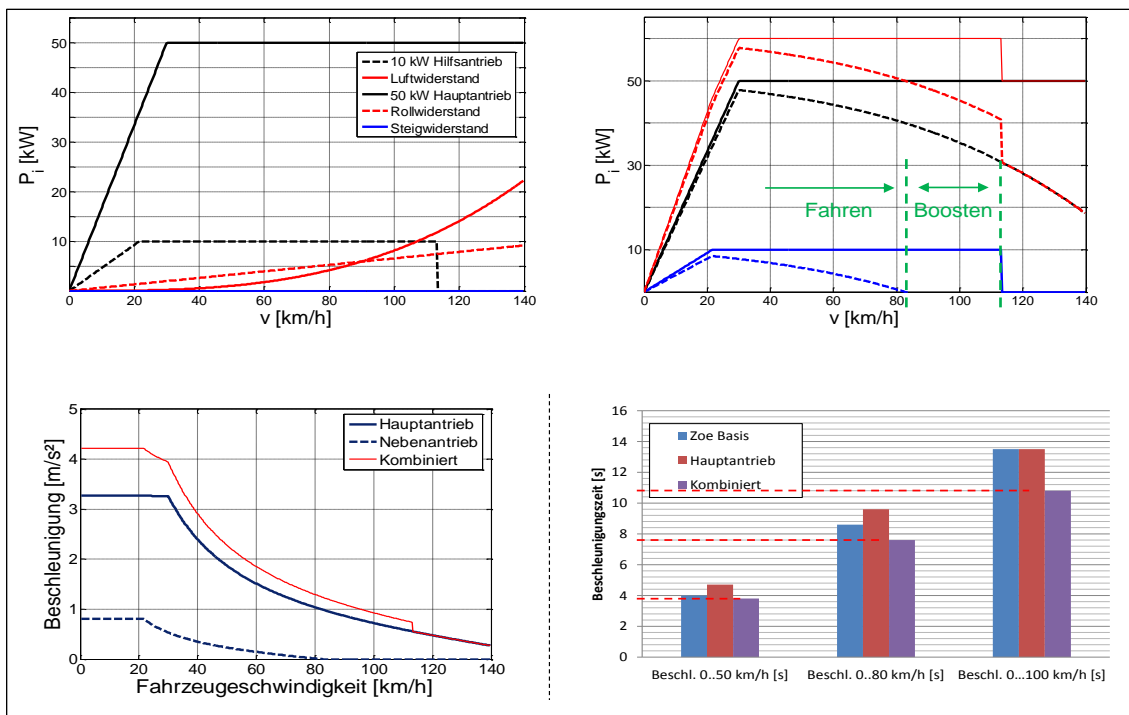


Abbildung 29: oben links: Leistungsbilanz eines Renault Zoe mit 10 und 50 kW Antriebsmaschine; oben rechts: Verfügbare Beschleunigungsleistung für 10 kW (blau), 50 kW (schwarz) und kombiniert (rot); unten links: Beschleunigung in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit; unten rechts: erzielbare Beschleunigungszeiten

Tabelle 7 zeigt die Beschleunigungszeiten.

Tabelle 7: Antriebsvergleich eines Zoe mit und ohne TIOM - Antriebskonzept

| | Zoe Basis | Hauptantrieb | Nebenantrieb | Kombiniert |
|------------------------|------------|--------------|--------------|------------|
| P_{max} [kW] | 65 | 50 | 10 | 60 |
| P_{dauer} [kW] | 46 | ?? | ?? | ?? |
| M_{max} [Nm] | 220 | 180 | 50 | 230 |
| n_{Mmax} [1/min] | 250...2500 | 0...2600 | 0...2600 | 0...2600 |
| v_{max} [km/h] | 135 | 135 | 80 | 135 |
| Beschl. 0..50 km/h [s] | 4 | 4,7 | 23 | 3,8 |
| Beschl. 0..80 km/h [s] | 8,6 | 9,6 | 55 | 7,6 |

| | | | | |
|--------------------------|------|------|------|------|
| Beschl. 0...100 km/h [s] | 13,5 | 13,5 | "--" | 10,8 |
|--------------------------|------|------|------|------|

Die erzielten Auslegungsgrößen für den TIOM - Motor werden deshalb als zentrale Ergebnisse für das Lastenheft übernommen. Im Kapitel 3.2.3 zum Gesamtenergieverbrauch sind drei Betriebsstrategien angenommen worden:

- Betriebsstrategie „Fahren mit dem Hauptantrieb“, siehe Kapitel 0.
- Betriebsstrategie „Fahren mit dem Hilfsantrieb“, siehe Kapitel 0,
- Betriebsstrategie „Boosten mit dem Hilfsantrieb“, siehe Kap. 0.

Simulationsmodell

Das Simulationsmodell erlaubt nun die Parametrisierung des Systems und ist damit universell auch für andere Leistungsklassen nutzbar. In den folgenden Abbildung 30 und Abbildung 31 sind die neun Betriebsmodi des Systems dargestellt. Die ersten drei Betriebsmodi in Abbildung 30 beschreiben das reine Fahren ohne Betrieb der Klimaanlage, die nächsten drei das Fahren mit Klimaanlage, die letzten drei Betriebsmodi beschreiben noch die Zustände, dass erstens der Klimakompressor ohne weiteren Betrieb der Motoren alleine von der Antriebsachse des Fahrzeuges angetrieben wird, zweitens der Fahrmotor zum Fahren und der Klimakompressor ausschließlich für die Klimaanlage genutzt wird, und drittens den Zustand, dass das Fahrzeug steht oder rollt und alleine die Klimaanlage betrieben wird.

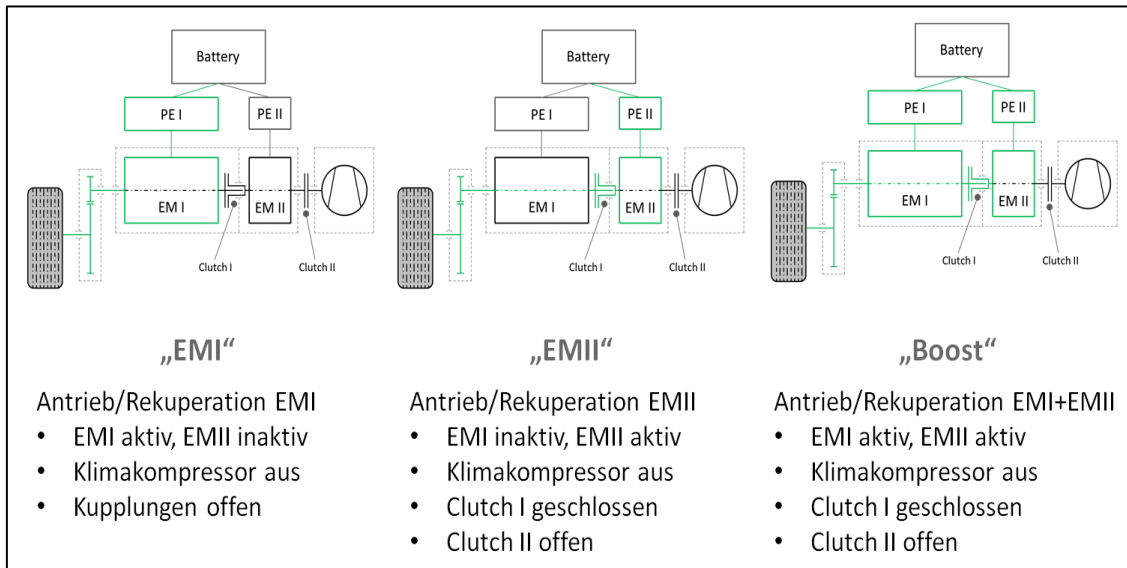
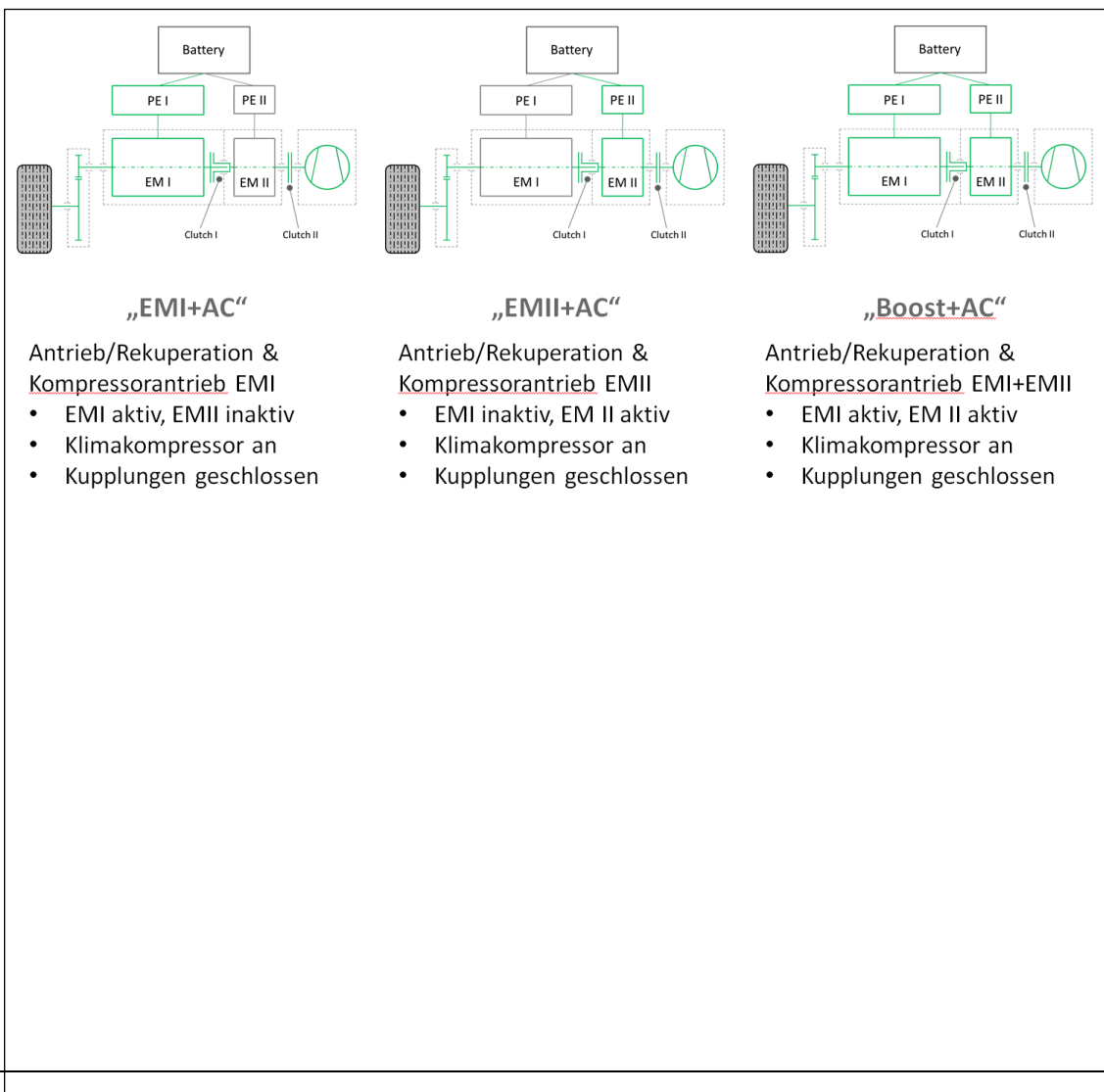
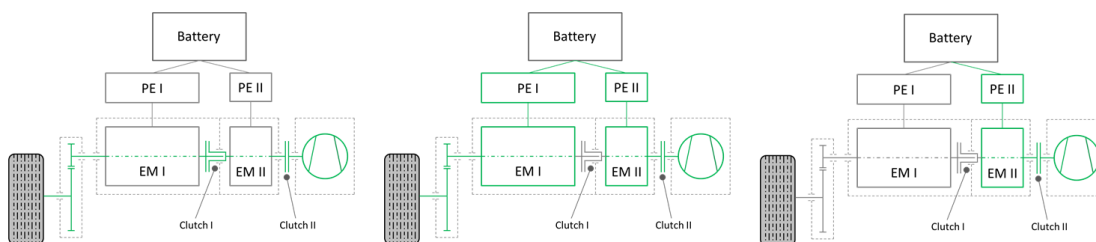


Abbildung 30: Darstellung der 3 Betriebsmodi ohne Klimakreislauf





„RekupAC“

- Kompressorantrieb durch Bremsleistung
- EMI inaktiv, EMII inaktiv
 - Klimakompressor an
 - Kupplungen geschlossen

„SplitAC“

- Antrieb/Rekuperation EMI, Kompressorantrieb EMII
- EMI aktiv, EMII aktiv
 - Klimakompressor an
 - Clutch I offen
 - Clutch II geschlossen

„Off+AC“

- Stillstand Kompressorantrieb EMII
- EMI inaktiv, EMII aktiv
 - Klimakompressor an
 - Clutch I offen
 - Clutch II geschlossen

Abbildung 31: Darstellung der 6 Betriebsmodi mit Klimakreislauf

Abbildung 32 zeigt noch einmal zusammengefaßt die Schaltzustände der beiden Maschinen sowie der beiden Kupplungen zugehörig zu den jeweiligen Betriebsmodi. Die in Abbildung 32 dabei rot umrandeten Betriebsmodi stellen die Betriebsmodi dar, die denen eines herkömmlichen Elektrofahrzeugs entsprechen. Der Modus EMI bedeutet dabei reines elektrisches Fahren bzw. Rekuperieren mit dem Fahrmotor, mit dem auch die später folgenden Verbrauchseinsparungen verglichen werden, der Modus SplitAC bedeutet, daß der Fahrmotor das Fahrzeug und getrennt davon der Klimakompressormotor den Klimakompressor antreibt.

| Mode | Beschreibung | EM I | EM II | Clutch I | Clutch II | Compressor |
|----------|---|------|-------|----------|-----------|------------|
| Off | Parken | off | off | open | open | off |
| EMI | Antrieb/Rekuperation durch EMI | on | off | open | open | off |
| EMII | Antrieb/Rekuperation durch EMII | off | on | closed | open | off |
| Boost | Antrieb/Rekupertation durch EMI + EMII | on | on | closed | open | off |
| EMI+AC | Antrieb/Rekuperation & <u>Kompressorantrieb</u> durch EMI | on | off | closed | closed | on |
| EMII+AC | Antrieb/Rekuperation & <u>Kompressorantrieb</u> durch EMII | off | on | closed | closed | on |
| Boost+AC | Antrieb/Rekuperation & <u>Kompressorantrieb</u> durch EMI + EMII | on | on | closed | closed | on |
| RecupAC | <u>Kompressorantrieb</u> durch Bremsleistung | off | off | closed | closed | on |
| SplitAC | Antrieb/Rekuperation durch EMI, <u>Kompressorantrieb</u> durch EMII | on | on | open | closed | on |
| Off+AC | Stillstand & <u>Kompressorantrieb</u> durch EMII | off | on | open | closed | on |

Abbildung 32: Schaltzustände der elektrischen Maschinen und der Kupplungen in den verschiedenen Betriebsmodi (rot umrahmt sind die beiden dem reinen Elektrofahrzeug entsprechenden Modi Fahren und Klimakompressorbetrieb).

Die Auswahl des Betriebsmodus erfolgt anhand der geforderten Leistungen aus den zugrunde liegenden Fahrzyklen, der Wahl des Klimaanlagebetriebs und der vorgegebenen Motoren-Wirkungsgrad-Kennfeldern, wie in Abbildung 33 dargestellt.

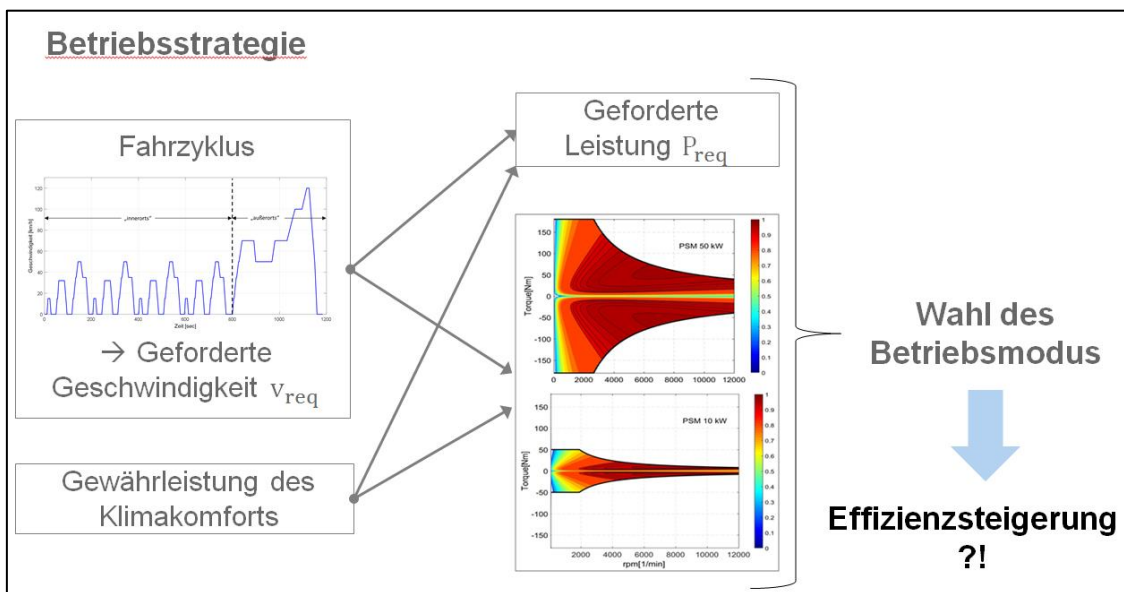


Abbildung 33: Betriebsstrategie für die Implementierung im Simulationsmodell

Das in Dymola/Modelica erstellte Simulationsmodell beinhaltet diese Betriebsmodisteuerung unter dem Modul Nr. 9 in Abbildung 34. Der Fahrzyklus ist in Modul Nr. 8 abgebildet, die restlichen Module zur Simulation der Fahrzeug-Längsdynamik (Nr. 7) und zu den Motoren und Kupplungen sind selbsterklärend. Hinter dem Modul Nr. 6 ist ein Dymola-Modell eines Klimakreislaufs implementiert.

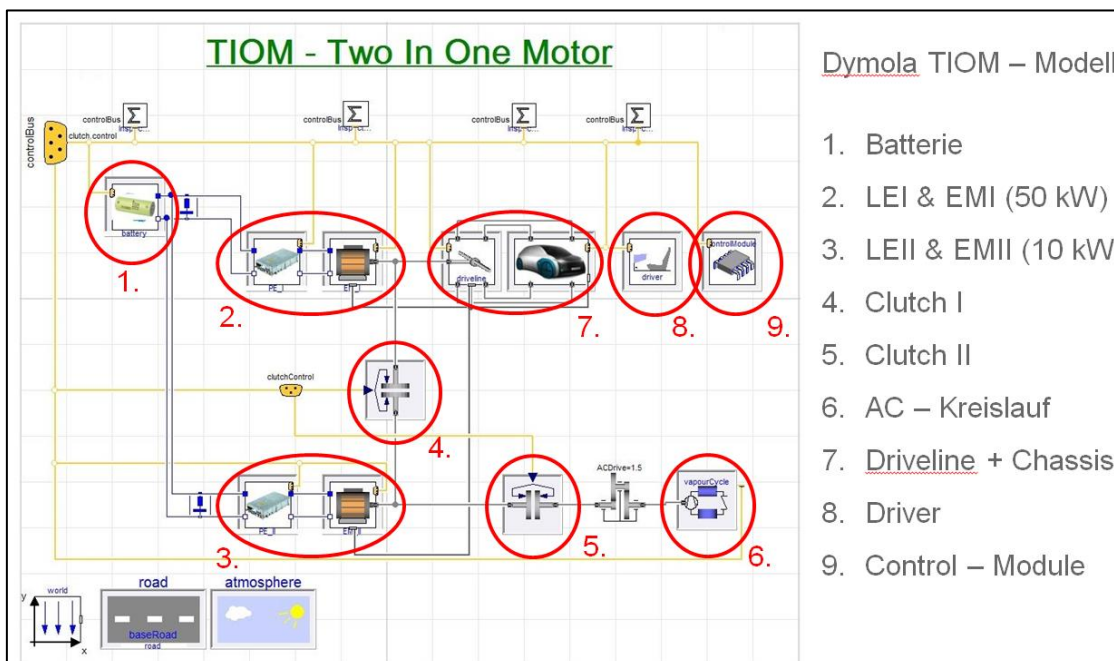


Abbildung 34: Simulationsmodell in Dymola/Modelica

Die zeitliche Verteilung der unterschiedlichen Betriebsmodi sind in Abbildung 35 (ohne Klimaanlage) und Abbildung 36 (mit Klimaanlage) für die 4 typischen Fahrzyklen, NEFZ, WLTC und Stuttgart/Lampoldshausen sowie Lampoldshausen/Stuttgart dargestellt. Die Leistungsaufteilung bzw. die Einsatzzeit der beiden unterschiedlich großen Motoren ist im NEFZ etwa gleich groß (Abbildung 35, oben links), dieser Zyklus ist aber wenig praxisrelevant. Im NEFZ gibt es auch eine relativ hohe Stillstandzeit. Im WLTC liegt der Bereich großer Antriebsleistungen naturgemäß höher. Letzterer kommt am nächsten an den Überland-Zyklus zwischen Stuttgart und Lampoldshausen heran. Festzuhalten ist, daß in allen Zyklen der (größere) Fahrmotor am meisten im Einsatz ist und daher in der wirtschaftlichen und effizienzbezogenen Betrachtung das Hauptaugenmerk verdient. Es gibt keine wesentlichen bzw. beachtenswerten Unterschiede zum herkömmlichen Elektrofahrzeug.

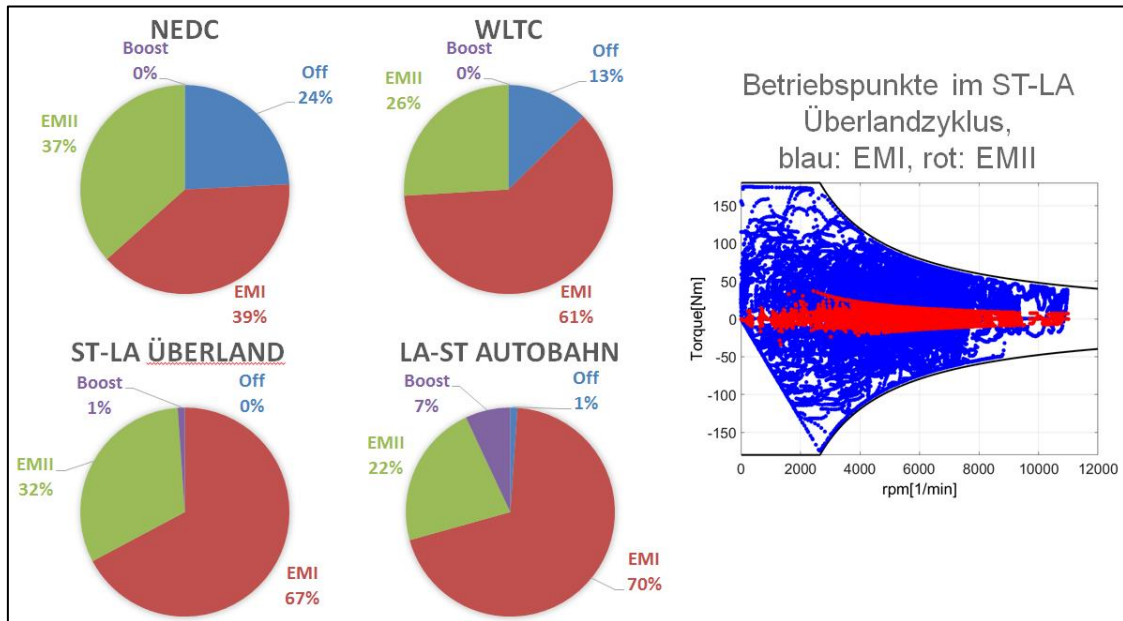


Abbildung 35: Einsatzzeiten der unterschiedlichen Betriebsmodi beim Fahren ohne Klimaanlage

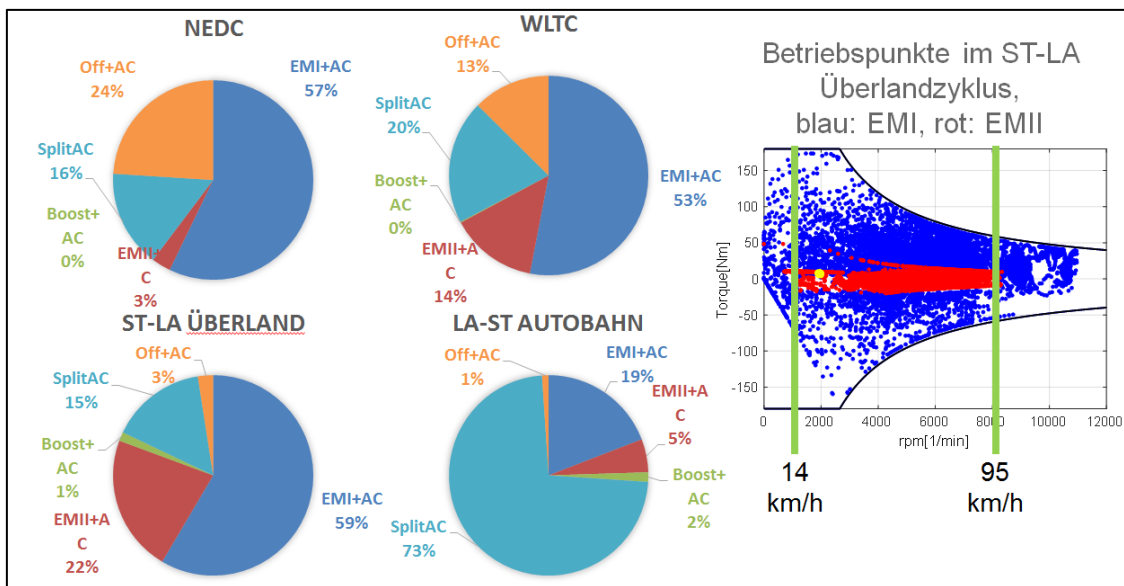


Abbildung 36: Einsatzzeiten der unterschiedlichen Betriebsmodi beim Fahren mit Klimaanlage

In der Abbildung 36 sieht man nun die zeitliche Aufteilung der unterschiedlichen Betriebsmodi, wenn der Klimakreislauf zugeschaltet ist, d.h. eine konstante Klimatisierungsleistung bereitgestellt wird. Dabei ist berücksichtigt, daß der

Klimakompressor nur zwischen einer Minimal- und einer Maximaldrehzahl betrieben werden kann, also nicht immer mit der Geschwindigkeit des Fahrzeuges direkt korreliert, sondern auch getrennt vom Motor 2 angetrieben werden muß (hellblauer Bereich SplitAC in der Abbildung 36).

Die Drehzahlbegrenzungen für den Klimakompressor, auf die Fahrzeuggeschwindigkeit umgerechnet, sieht man im Drehmoment/Drehzahl-Kennfeld auf der rechten Seite der Abbildung 36. Sie bewirken z.B. beim Betrieb des Systems auf der Autobahn (Zyklus LA-ST-Autobahn), dass während der meisten Zeit der Fahrmotor zum Fahren und der Klimakompressormotor für den Antrieb des Kompressors genutzt wird, da die Fahrzeugachsendrehzahl in diesem Fall für den Antrieb des Kompressors zu hoch liegen.

Beide Motoren sind nun ständig im Betrieb und wechseln ihren Einsatzzweck je nach dem Bestpunkt ihrer jeweiligen Wirkungsgradkennfelder und der Anpassung der Klimakompressordrehzahl an die Fahrzeuggeschwindigkeit. Im Fall Autobahn (Abbildung 36 rechts unten) wird zu 75% der Zeit mit dem Fahrmotor gefahren, während der Klimakompressormotor den Kompressor antreibt, da die Fahrgeschwindigkeit zu groß für eine direkte Kopplung der Achse an den Kompressor ist. Weitere 19% übernimmt der Fahrmotor auch den Klimakompressor, der Fahrmotor ist fast 95% in Betrieb. Für die Autobahnfahrt hat das System nur verschwindend geringe Vorteile.

Das Fahren mit dem kleineren Motor (incl. AC) im Realbetrieb kommt mit einem Anteil zwar nur von ca. 20% (14% WLTC bis 22% ST-LA) vor (zur Erinnerung: ohne Klimakreislauf zu etwa 25% aus Abbildung 35, auch auf der Autobahnfahrt), zusammen mit dem Klimaanlagebetrieb aber zu etwa 35 bis 40%.

II.1.2.3. AP 2.3 Sensorik

Zur Erfassung des Nutzens des TIOM-Systems sind essentielle Meßsignale für die Bestimmung der Energiebilanzen notwendig:

- Elektrische Leistung des Fahrmotors, des Kompressormotors, der Kupplungen
- abgegebene mechanische Leistung an der Ausgangswelle
- abgegebene mechanische Leistung an der Kompressorwelle

Im Verlauf der weiteren Konzept- und Modellvalidierung müssen weitere Sensoren mit in die Systemprüfstände integriert werden. Aktuell wird von weiteren elektrischen und verfahrenstechnischen Messstellen wie Strom, Spannung, Kältemitteldrücke, Temperaturen sowie Durchflüsse ausgegangen. Eine detaillierte Ausarbeitung der Messstellen erfolgt im Rahmen der Prüfplanung. Essentielle Meßgrößen sind:

- Temperaturmessstellen
- Strom, Spannung
- Rotorlagesensor
- Durchfluss Kältemittel
- Druck Kältemittel
- Drehmoment

II.1.2.4. AP 2.4 Modularität

Antriebseinheit

In der Abbildung 37 sind ausgewählte Antriebseinheiten eines für ein verbrennungsmotorisch (links), ein brennstoffzellenbetriebenes (mitte), und ein rein elektrisch (rechts) betriebenes Fahrzeugkonzept dargestellt.



Abbildung 37: Riementrieb für die Hilfsaggregate am Verbrennungsmotor (links); Modulares Brennstoffzellensystem (mitte); Antriebseinheit aus zwei Elektromotoren mit Leistungselektronik (rechts)

In der linken Abbildung ist ein konventioneller Verbrennungsmotor mit hochintegrierten Hilfsaggregaten dargestellt.



Diese werden i.a. über einen Riementrieb angetrieben, der sich durch niedrige Kosten (Riemenscheiben und Spannrollen) und extrem hohe Flexibilität (Übersetzungen) auszeichnet. Durch den hohen Entwicklungsstand können sämtliche Hilfsaggregate dynamisch betrieben werden, um bei allen Betriebspunkten des Verbrennungsmotors ihren Zweck zu erfüllen (Generator durch leistungsbegrenzende Induktivität der Wicklung sowie elektronischem Erregungs-Regler, Klimakompressor bzw. Luftkompressor durch Magnetkupplung und Volumenstromregelung, Starter durch Freilaufvorgelege, Pumpen meist direkt usw.).

Abbildung 37 in der Mitte zeigt einen Brennstoffzellenantrieb der Fa. Daimler. Das Hauptaugenmerk liegt auch hier in der Einsetzbarkeit des Aggregats in vorhandene Fahrzeuge, also in der Modularität des gesamten Antriebs.

Ein Beispiel für eine aus zwei Motoren bestehenden Antriebseinheit für Elektromotoren ist in der rechten Abbildung dargestellt. Die Antriebseinheit beinhaltet zwei Leistungselektroniken für den unabhängigen Betrieb der einzelnen Elektromotoren und die notwendigen Getriebe- und Übersetzungsstufen zum Antrieb der Räder.

Es ergibt sich die zweckmäßige Forderung, beim TIOM-Konzept den Fahrmotor und den Klimakompressor mit seinem Antriebsmotor in einer ähnlich modularen Struktur aufzubauen, sodaß Leistungsänderungen in gewissen Stufen möglich sind. Dies dient dem Grundgedanken des Projektes, die Machbarkeit darzustellen. Der Kostenaufwand für aufwendige Produktionseinrichtungen steht daher hier nicht im Vordergrund. Bei allen Konzepten ist zu erkennen, daß zusätzlich zur oben beschriebenen Modularität die Zugänglichkeit für evt. Wartungs- oder Servicearbeiten gewährleistet ist. Das muß auch beim TIOM so sein. In diesem Projekt soll aber nur eine Variante aufgebaut und demonstriert werden.

Kompressor

Für die Auswahl des Kompressors wurde folgendes Vorgehen gewählt:

- Auswahl eines Kreisprozesses basierend auf dem Kältemittel R134a
- Vergleich verschiedener Verdichter
- Beschaffung und auseinanderbauen des ausgewählten Kompressors

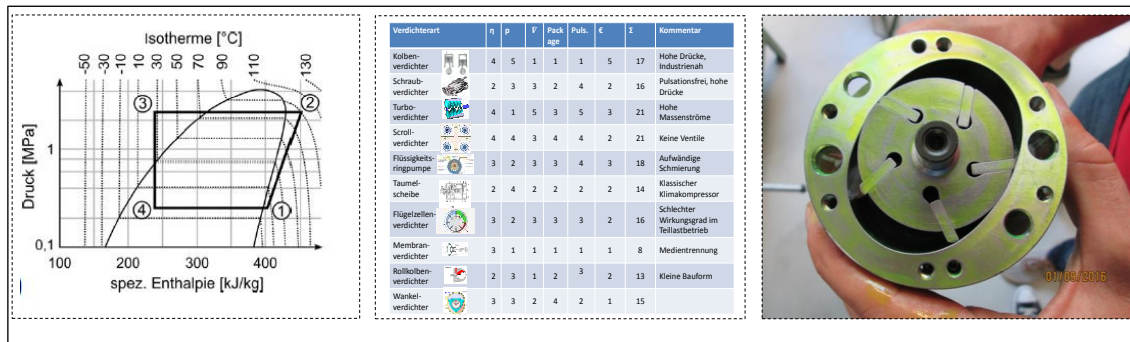


Abbildung 38: Kreisprozess im log(p)-h – Diagramm (links); Vergleich verschiedener Kompressoren (mitte); Geöffneter Flügelzellenverdichter eines Smart mit Verbrennungsmotor (rechts)

Der Kreisprozess im log(p)-h Diagramm wird allgemein in 4 Prozesse unterteilt, Abbildung 38 links:

- Verdampfen des Kältemittels im Verdampfer (4→1) bei circa 2..3 bar
- Verdichten des Kältemittels mit dem Kompressor (1→2) auf circa 18..20 bar
- Verflüssigen des verdichteten Kältemittels im Kondensator (2→3)
- Drosseln des flüssigen Kältemittels im Expansionsventil (3→4)

Als Kältemittel im Kreisprozess kommen in Fahrzeugen aktuell R134a bzw. sein Ersatzstoff R1234yf zum Einsatz. Der kritische Punkt des Kältemittels R134a liegt bei circa 40 bar und 100°C. Beim Kühlen der Fahrzeugkabine im Sommer ist der COP des Kreisprozesses stark abhängig von der Umgebungstemperatur. Bei variablen COP zwischen 1,5 und 4 ergibt sich bei einer benötigten Kühlleistung von 6 bis 8 kW eine zu installierende Verdichterleistung von 5 kW. Bei einer angenommenen Verdampfungstemperatur von 0°C und einer daraus resultierenden Dichte des Kältemittels von 14,2 kg/m³ muss vom Kompressor ein Volumenstrom von ~250 l/min an verdampften Kältemittel komprimiert werden. Der Kompressor ist im TIOM – Motor zu integrieren. Für die Auswahl eines geeigneten Verdichters wurde eine Gegenüberstellung technisch sinnvoller Kompressortechnologien durchgeführt (Abbildung 38, mitte). In Fahrzeugen werden als Weiterentwicklung der Hubkolbenverdichter moderne Taumelscheibenkompressoren eingesetzt. Diese beinhalten oftmals mehrere Kolben, die über eine Taumelscheibe mit Gegendruck aus dem Kältemittelkreis beaufschlagt sind. Durch die verwirklichte Hubraumregelung entsteht am Axialkolbenverdichter ein Kräftegleichgewicht an der Vorder- und

- Nennspannung: 400 V (passend für eSmart).
- Minimale Spannung: 310 V
- Maximale Spannung: 392 V
- Umrichter für Fahrmotor: 50 kW max, Drehfrequenz 12000 1/min = 1200 Hz bei Polpaarzahl = 6.
- Umrichter für Kompressormotor: 10 kW max, Drehfrequenz 12000 1/min bei Polpaarzahl = 6.
- Eingangsgrößen: Solldrehzahl, Solldrehmoment, Ausgangsgrößen: Nenndrehzahl und Statorstrom, Rotorlagesignal (um ggf. Synchronlauf zu ermöglichen): TTL 2 Kanal 90 Grad mit anzupassender Inkrementation

Es werden keine speziellen EMV-Anforderungen aus dem Automobilbereich gefordert, die Umrichter können auch Labormuster sein. Die Umrichter können auch aus dem Industriebereich oder Automobilbereich stammen oder auch als Prototypen vorliegen. Das Ziel ist, die Umrichterkomponenten im TIOM-Bauraum unterzubringen. Wenn dies nicht möglich ist und dadurch das Projekt in Frage gestellt würde, können die beiden Umrichter such extern aufgebaut werden. Es kommt auf die Darstellung und Untersuchung des Systems an, nicht auf eine optimierte Integration. Trotzdem soll das TIOM-System für Ausstellungszwecke geeignet sein, d.h. ein zusammenhängender Demonstrator. Die Elektronik muß in den Kühlkreislauf integriert sein. Im Falle der Nutzung eines Industrieumrichters darf der Gleichrichter entfernt werden. Ggf. muß eine Zwischenkreisvorladeschaltung eingebaut werden. Ein Verpolschutz soll mechanisch oder elektronisch integriert sein. Einbau von Temperatursensoren an den kritischen Bauteilen wie Leistungstransistoren.

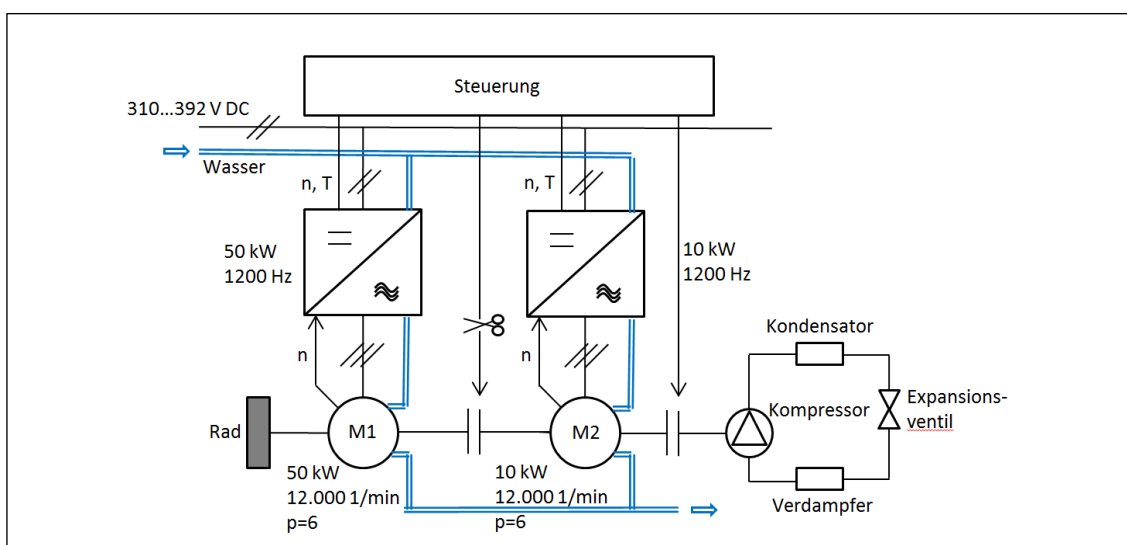


Abbildung 40: Getrennte Umrichter für beide Motoren

2.3.2. AP3.2 Aufbau

Die Umrichter sollten ursprünglich im oben liegenden freien Bauraum des TIOM-Bauraums nach Abbildung 9 untergebracht werden (siehe Skizze in Abbildung 41). Sie wurden abschließen direkt an den beiden Motoren befestigt (Abbildung 95).

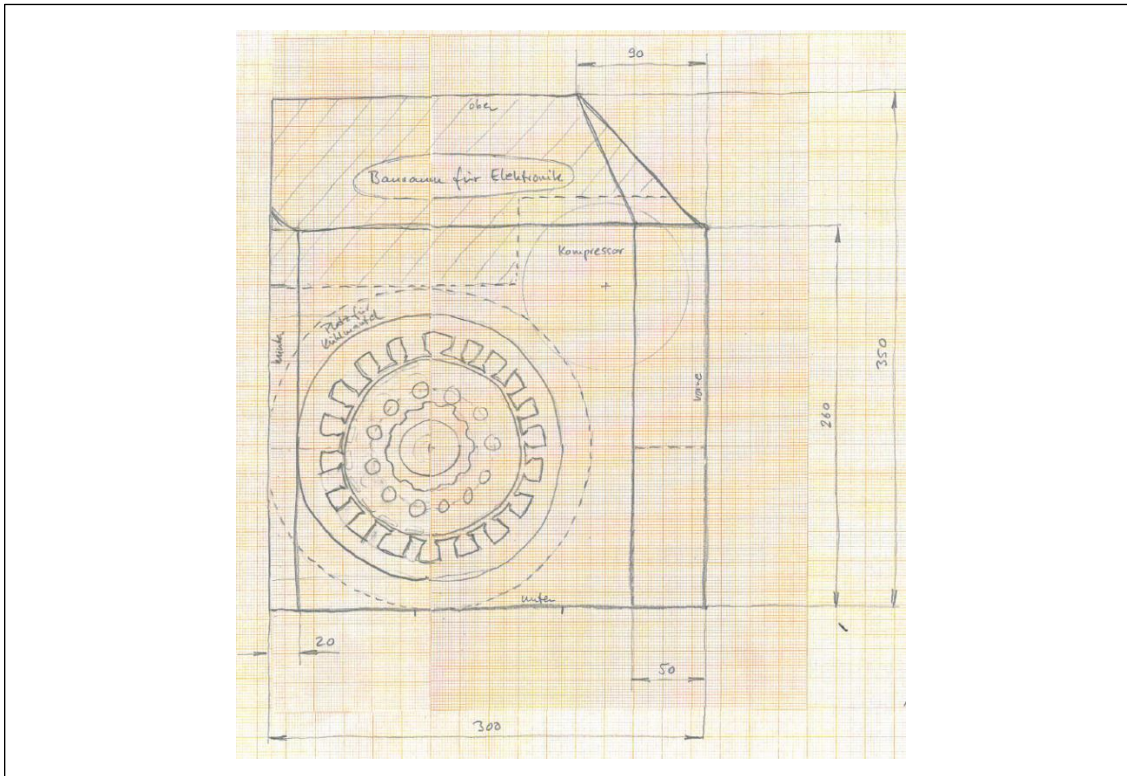


Abbildung 41: Bauraum für Umrichter

Eine weitere Möglichkeit ist die Vergrößerung des Elektronikbauraums in eine Richtung und damit eine Abweichung der Smart-Bauraum-Vorgabe, die aber nicht favorisiert werden soll.

Der Bauraum neben den Motoren kann auch noch für die Leistungselektronik genutzt werden, das ist eine weitere Möglichkeit. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**Abbildung 42 zeigt den Umrichter. Der Umrichter wurde vom Ingenieurbüro Zimmermann entwickelt. Er zeichnet sich durch seine sehr geringe Baugröße aus. Innerhalb der Abmessungen 150x90X65 mm erzeugt er eine elektrische Leistung von 20 kW und ist kurzzeitig auf 30 kW überlastbar. So kann er modular für beide Motoren eingesetzt werden.

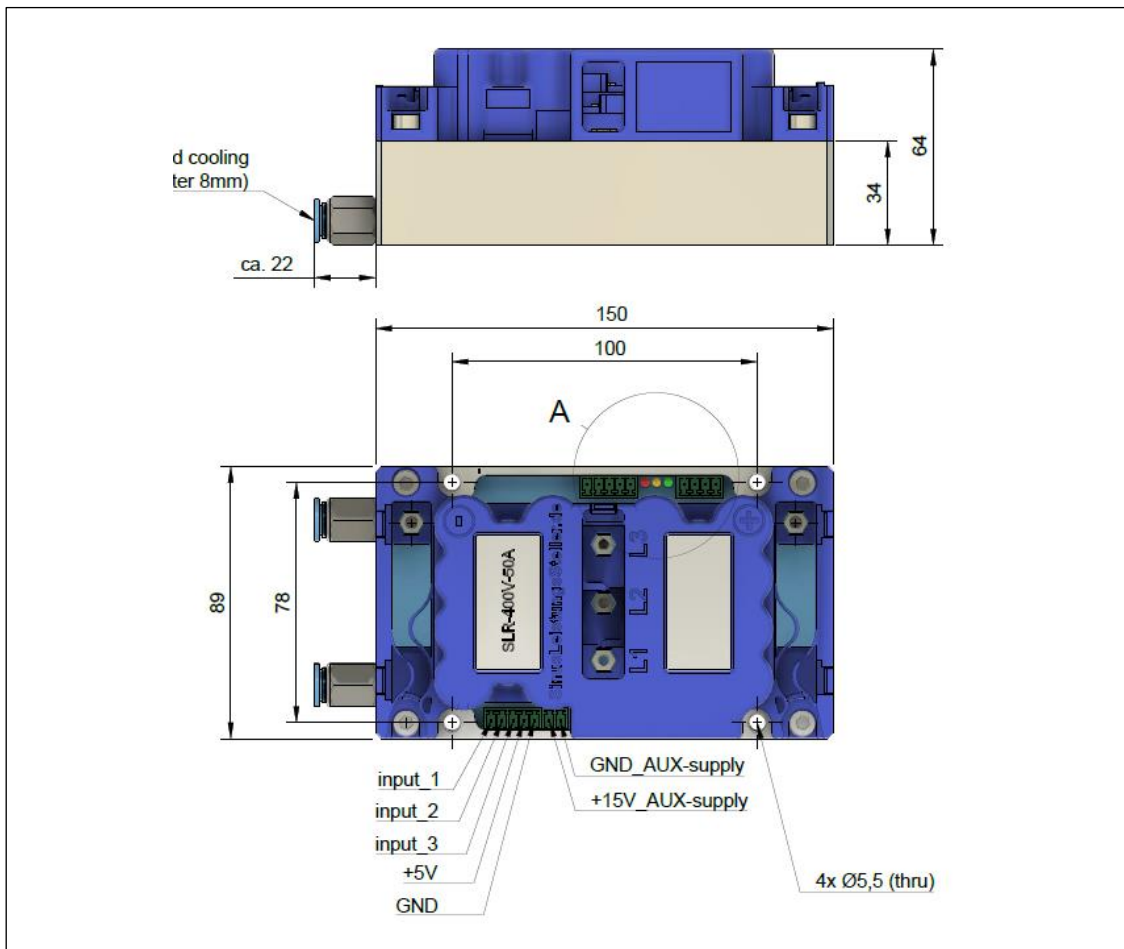


Abbildung 42: Umrichter mit einer Leistung von 20 kW im Bauraum 150x90x65 mm

2.3.3. AP3.3 Regelung

Motorregelung

An den beiden Motoren soll ein Drehzahlgeber zur Drehzahlregelung der konstanten Fahrzyklusanteile sowie für alle Prüfstandversuche angebracht und als Ausgangssignale herausgeführt werden.

Der Sensor soll zwei um 90 Grad versetzte TTL-Pegel mit anzupassender Inkrementation besitzen (Abbildung 43, mitte), da die meisten Umrichter dieses Signal verarbeiten können. Damit ist keine Positionierung wie beim Resolver mit zwei sinusförmigen Signalen (Abbildung 43, oben), aber eine Drehzahlregelung möglich. Die Nullposition (Abbildung 43, blaues Signal) ist zur Drehzahlregelung nicht notwendig.

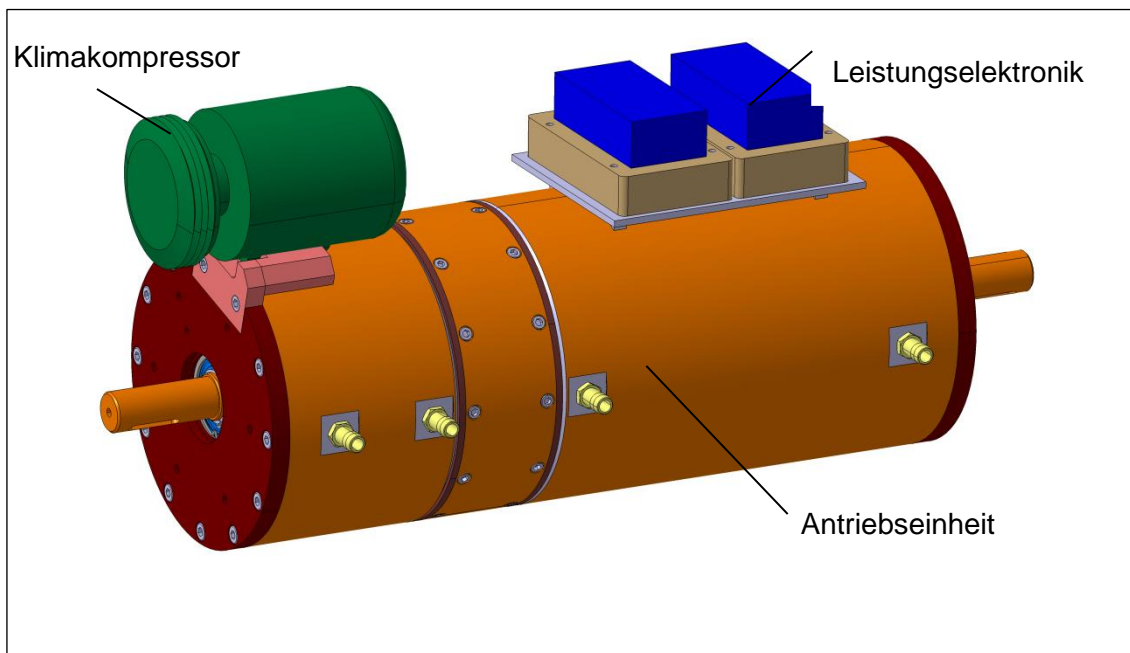


Abbildung 45: TIOM-System, bestehend aus der Antriebseinheit (braun, mit den beiden Elektroantrieben M1 und M2 sowie der Kupplung C1), einem Kompressor (grün, mit integrierter elektromagnetischer Kupplung C2) und zwei Umrichtern (blau, PE1 und PE2 für die beiden Motoren).

Abbildung 46 zeigt den inneren Aufbau des Aggregats. Der große Motor M1 ist auf einer separaten Welle befestigt, die zwischen der elektromagnetischen Kupplung C1 und dem vorderen Lagerschild gelagert ist. Der kleine Motor M2 ist zum einen am anderen Lagerschild und zum anderen auf der Welle des großen Motors gelagert. Beide Motoren haben einen eigenen Kühlmantel, wobei die Kühlkanalgeometrie eine spiralförmige Kontur aufweist. Die Leistungselektroniken (Umrichter) sind ebenfalls flüssigkeitsgekühlt.

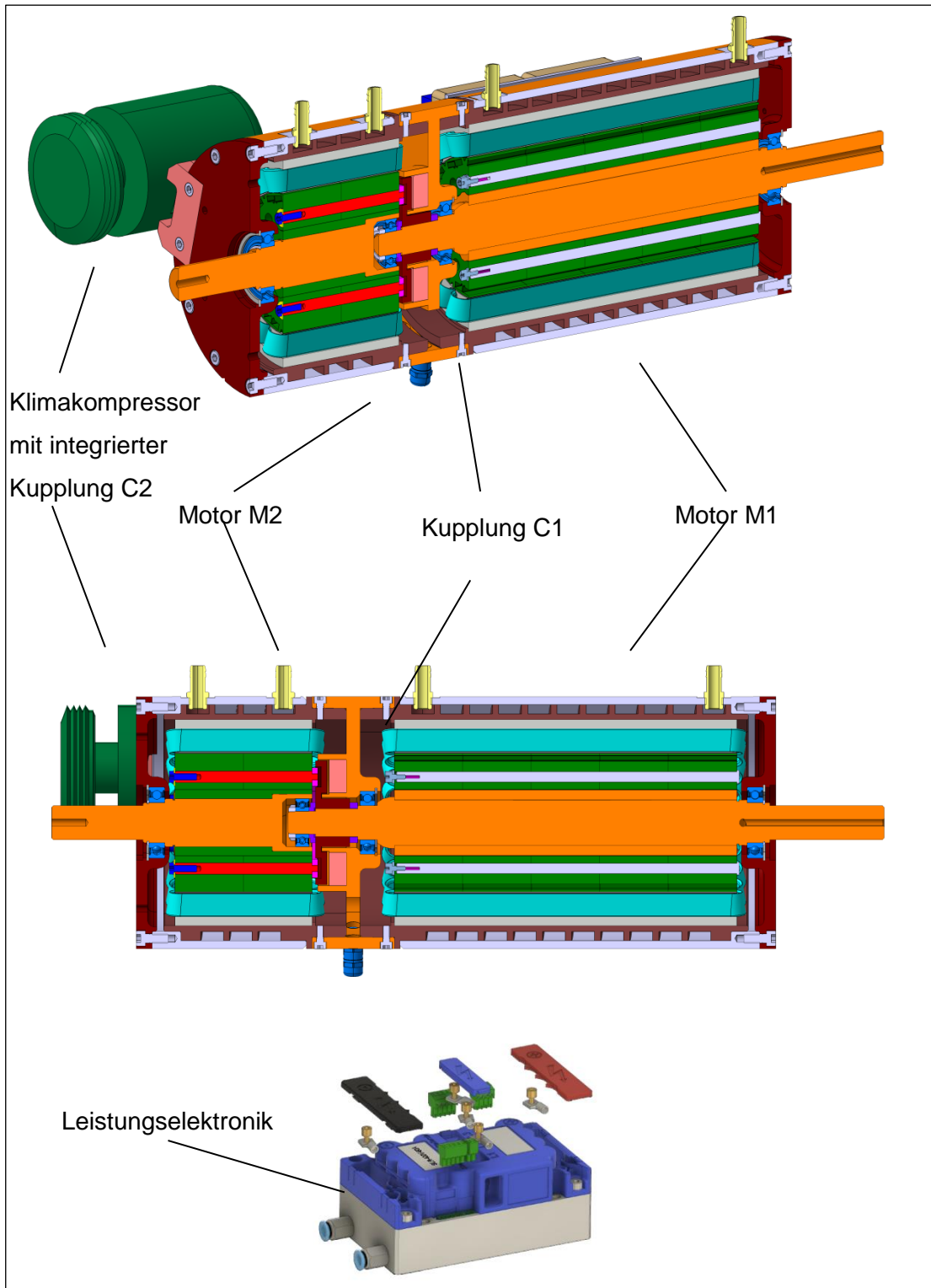


Abbildung 46: Aufbau des TIOM-Systems, gegenüber Abb. 21 um 90 Grad nach hinten gedreht.

2.4.1. AP4.1 magn. Kreis

Abbildung 47 zeigt den Statorblechschnitt für den Motor M1.

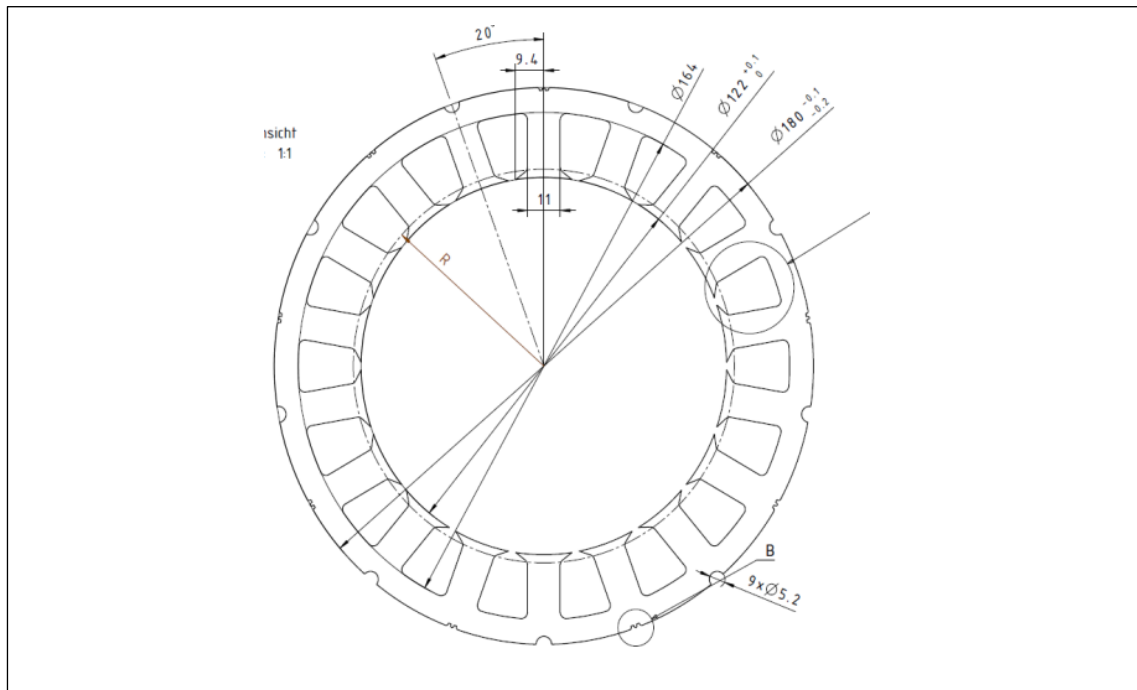


Abbildung 47: Statorblechschnitt und Statorpaket des Motors M1

Notwendige Luftspaltmantelfläche

Die Umfangskraft für den Fahrmotor ist dann

$$F_{\text{Fahrmotor}} = \frac{T_{\text{Motor}}}{r_s} = \frac{126}{0,122/2} = 2066 \text{ N} \quad (1)$$

und für den Kompressormotor

$$F_{\text{Kompressormotor}} = \frac{T_{\text{Motor}}}{r_s} = \frac{50}{0,122/2} = 820 \text{ N.} \quad (2)$$

Mit einem wassergekühlten Mantel wird der Drehschub zu 2 N/cm² angenommen. Dann ergibt sich eine Luftspaltmantelfläche für den Fahrmotor von

$$A_{\delta} = \frac{F_{Motor}}{\sigma} = \frac{2066}{2} = 1033 \text{ cm}^2 \quad (3)$$

und für den Kompressormotor von

$$A_{\delta} = \frac{F_{Motor}}{\sigma} = \frac{820}{2} = 410 \text{ cm}^2 \quad (4)$$

und bei dem gegebenen Luftspaltdurchmesser von 122 mm die aktive Eisenlänge für den Fahrmotor (5) und Kompressormotor (6) zu

$$l_{\delta} = \frac{A_{\delta}}{2 \cdot r_s \cdot \pi} = \frac{1033 \cdot 10^{-4}}{0,122 \cdot 3,14} = 269 \text{ mm} \quad (5)$$

$$l_{\delta} = \frac{A_{\delta}}{2 \cdot r_s \cdot \pi} = \frac{410 \cdot 10^{-4}}{0,122 \cdot 3,14} = 107 \text{ mm} \quad (6)$$

Windungszahl

Die maximale Drehzahl der beiden Motoren liegt bei 12000 1/min. Der Bereich hohen Wirkungsgrades soll für ein Stadtfahrzeug im Bereich um die 60 km/h liegen, das ist etwa die Hälfte der maximalen Geschwindigkeit. So sollte die Leerlaufspannung des Motors etwas überhalb der Drehzahl mit dem besten Wirkungsgrad liegen, die Maximaldrehzahl kann dann nur durch Feldschwächung erreicht werden. Um die Feldschwächung nicht übertrieben groß zu gestalten, wird hier von einer Leerlaufdrehzahl bei etwa 80% der Maximaldrehzahl ausgegangen.

Die für das maximale Moment noch geltende Nenndrehzahl des Fahr-Motors ist bei einer Getriebeübersetzung von $\ddot{u} = 10$:

$$n_{Motor} = n_{Rad} \cdot \ddot{u} = 300 \cdot 10 = 3000 \text{ 1/min} = 200 \text{ 1/s.} \quad (7)$$

Bei einer angenommenen maximalen Luftspaltinduktion von

$$\hat{B}_{\delta} = 0,8 \text{ T} \quad (8)$$

und unter der Voraussetzung, die Leerlaufdrehzahl U_0 läge bei Versorgung mit der minimalen Zwischenkreisspannung von 370 V DC (abzüglich der Spannungsabfälle an Transistoren und Zuleitungen von ca. 20 V = 350 V DC entspricht 250 V AC) bei 20 % unter der Maximaldrehzahl, also bei 9600 1/min (160 1/s), dann ergäbe sich die maximale Windungszahl zu

$$N = \frac{U_{\min DC}}{\frac{d\phi}{dt}} = \frac{U_{\min DC}}{2 \cdot \xi \cdot B_\delta \cdot \frac{dA}{dt}} = \frac{U_{\min DC}}{2 \cdot \xi \cdot B_\delta \cdot l_{Fe} \cdot \frac{dU}{dt}} = \frac{U_{\min DC}}{2 \cdot \xi \cdot B_\delta \cdot l_{Fe} \cdot v} = \frac{370 - 20}{2 \cdot \xi \cdot B_\delta \cdot l_{Fe} \cdot n_{Motor} \cdot U_\delta} = \frac{350}{2 \cdot 0,866 \cdot 0,8 \cdot 0,269 \cdot 0,8 \cdot 200 \cdot 0,122 \cdot 3,14} = 19. \quad (9)$$

Für die Konstruktion der Wicklung kommen mehrere Nutzahl-Polpaarzahlkombinationen nach Abbildung 48 in Betracht. Für 18 Nuten und Polpaarzahlen von 7 und 10 (14 und 20 Pole) ergeben sich besonders hohe Wickelfaktoren von über 0,9. Dagegen ergeben die Kombinationen mit Polpaarzahlen von 6 oder 12 niedrigere Wickelfaktoren von etwas kleiner als 0,9, sie lassen sich i.a. aber einfacher wickeln.

| | | Number of poles, P | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 |
| Number of slots, Z | 3 | 0.866 | 0.866 | q<1/4 | | | | | | | | | | | | | | |
| | 6 | q>1/2 | 0.866 | | 0.866 | q<1/4 | | | | | | | | | | | | |
| | 9 | | q>1/2 | 0.866 | 0.866 | 0.945 | 0.866 | q<1/4 | | | | | | | | | | |
| | 12 | | | q>1/2 | 0.866 | 0.933 | | | | 0.866 | q<1/4 | | | | | | | |
| | 15 | | | | q>1/2 | 0.866 | | | | | 0.866 | q<1/4 | | | | | | |
| | 18 | | | | | q>1/2 | 0.866 | 0.866 | | | 0.945 | 0.902 | 0.866 | q<1/4 | | | | |
| | 21 | | | | | | q>1/2 | 0.866 | 0.866 | | 0.866 | q<1/4 | | | | | | |
| | 24 | | | | | | | q>1/2 | 0.866 | | 0.933 | 0.866 | 0.866 | q<1/4 | | | | |
| | 27 | | | | | | | | q>1/2 | 0.866 | 0.877 | 0.917 | 0.945 | 0.915 | 0.877 | | | |
| | 30 | | | | | | | | | q>1/2 | 0.866 | 0.874 | 0.951 | 0.951 | 0.936 | | | |
| | 33 | | | | | | | | | | q>1/2 | 0.866 | 0.903 | 0.928 | 0.936 | 0.936 | 0.936 | |
| | 36 | | | | | | | | | | | q>1/2 | 0.866 | 0.867 | 0.902 | 0.933 | 0.945 | 0.953 |
| | 39 | | | | | | | | | | | | q>1/2 | 0.866 | 0.863 | 0.917 | 0.936 | 0.936 |
| | 42 | | | | | | | | | | | | | q>1/2 | 0.866 | 0.89 | 0.913 | 0.913 |
| | 45 | | | | | | | | | | | | | | q>1/2 | 0.866 | 0.858 | 0.886 |
| | 48 | | | | | | | | | | | | | | | q>1/2 | 0.866 | 0.857 |
| 51 | | | | | | | | | | | | | | | | q>1/2 | 0.866 | |
| 54 | | | | | | | | | | | | | | | | | q>1/2 | |

Abbildung 48: Wicklungsfaktoren bei unterschiedlicher Nutzahl-Polzahl-kombination

Wir haben hier die Kombinationen 18-12, 18-14 und 18-20 betrachtet (Nutzahl-Polzahl), siehe Abbildung 49. Dargestellt sind hier Zweilagewicklungen, es gibt

nämlich auch die Möglichkeit, mehrere Lagen in den Nuten unterzubringen, dies folgt weiter unten.

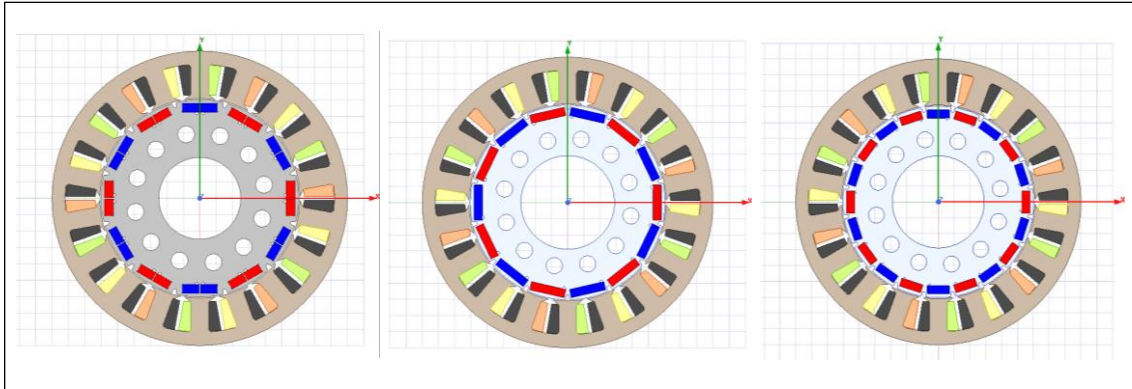


Abbildung 49: Nutzahl-Polpaarzahlkombinationen 18-12, 18-14 und 18-20.

Die induzierten Spannungen der Leiter in den Nuten sind in der folgenden Abbildung 50 dargestellt. Die Zusammenschaltung zu Spulen ergibt sich bei Einzelzahnwicklungen nun aus erstens der Hintereinanderschaltung von zwei Zeigern der Spannungen in benachbarten Nuten, danach zweitens durch die Hintereinanderschaltung von einzelnen Spulen, die sich in den Sektoren der aus den drei Phasen resultierenden Sektoren im Nutenstern befinden.

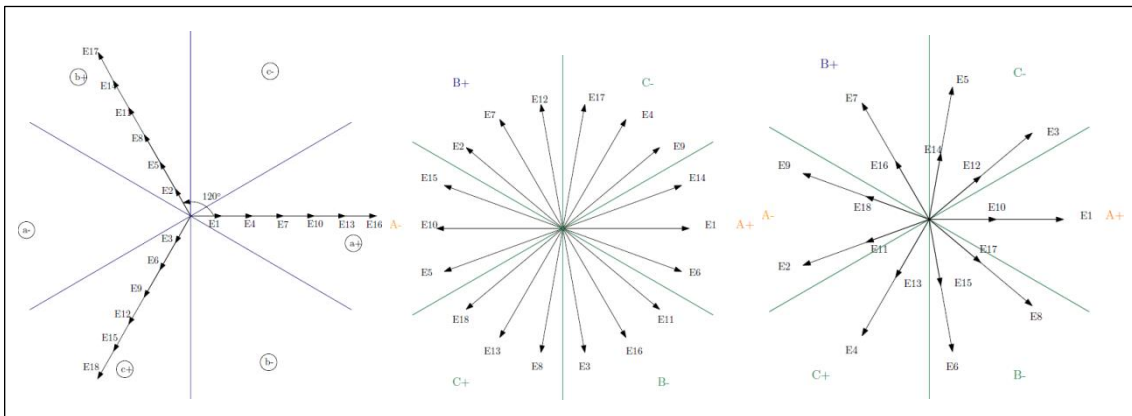


Abbildung 50: Nutensterne der drei Kombinationen 18-12, 18-14 und 18-20

Das Statorpaket aus 0,35 mm dicken Trafoblechen hat eine Länge von 300 mm und wird an der Außenkontur an speziell dafür vorgesehenen Konturen zusammenschweißt. Nuten und Endscheiben werden mit Isolierpapier isoliert. Die folgende Abbildung 51 zeigt das Wickelschema für die Kombination 18-20, das sich

durch eine besonders einfache Zusammenschaltung der Stränge im Dreieck auszeichnet, wie in Abbildung 52 gezeigt.

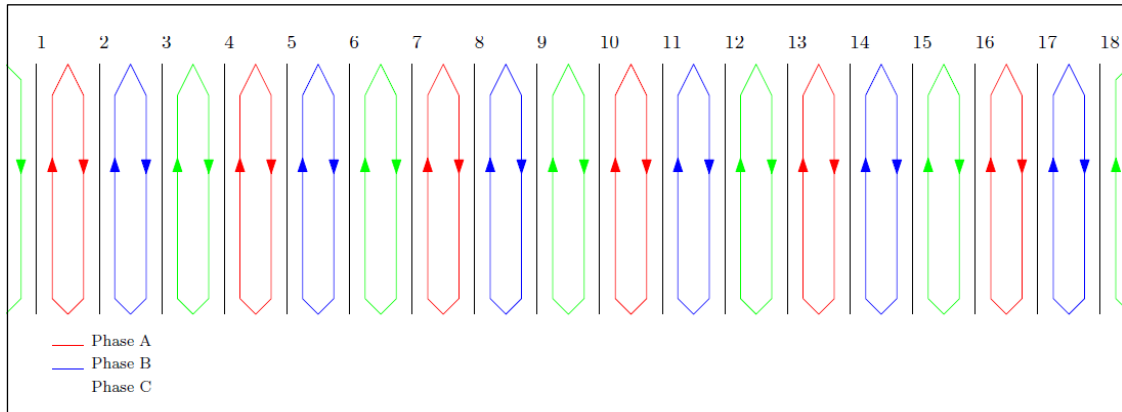


Abbildung 51: Zweilagiges Wickelschema für die Kombination 18-12

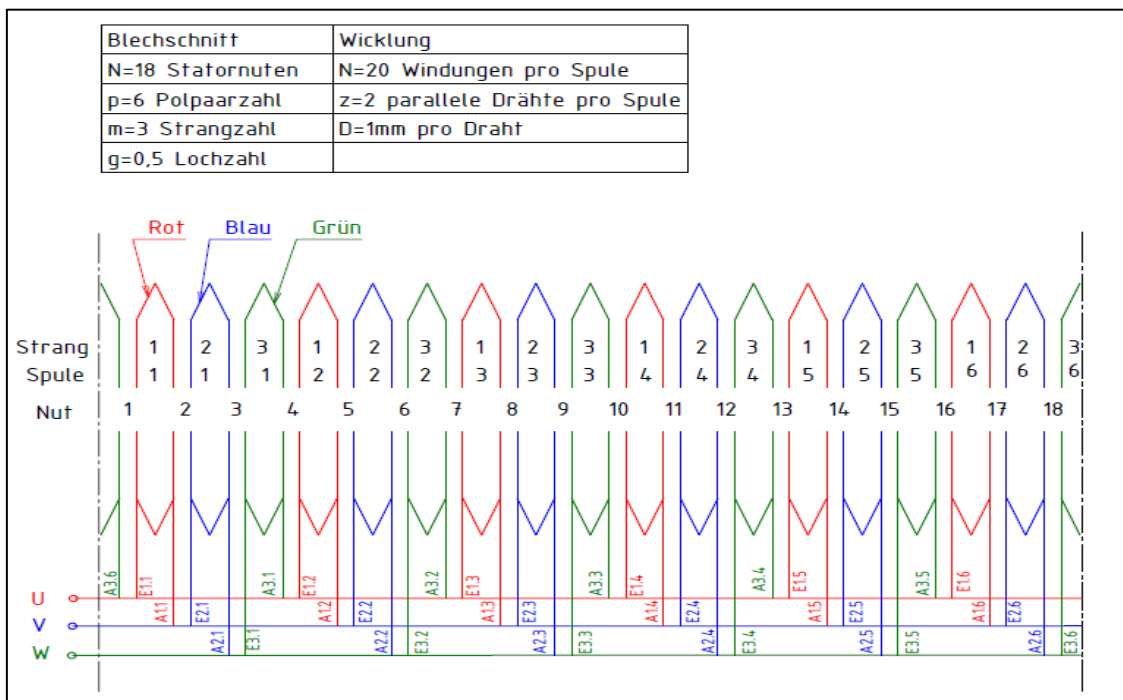


Abbildung 52: Zusammenschaltung der Spulen mit jeweils 6 parallelen Spulen zu einem Strang und dann die drei Stränge im Dreieck.

Die Spulen lassen sich einfach an drei umlaufende sog. Schaltringe anschließen, sodaß die Verbindungen an der Stirnflächen der Motoren wenig Platz in Anspruch nimmt. Außerdem übernimmt die Zusammenschaltung über die Schaltringe auch gleichzeitig die Funktion der Zusammenschaltung der drei Phasen im Dreieck.

Angegeben sind hier auch die Wickeldaten, wobei zu vermerken ist, daß für ein manuelles und dann später auch für ein maschinelles Wickeln ein Draht mit einem Durchmesser von 1 mm noch gängig möglich ist, bei dickeren Drähten wird der Aufwand, speziell beim manuellen Wickeln, sehr groß. Dann müssen für eine Windungszahl von 20 bereits 2 parallele Drähte gewickelt werden. Für eine maschinelle Wicklung wäre ein einzelner Draht mit dickerem Durchmesser noch möglich.

Die folgende Abbildung 53 zeigt das Wickelschema für die zweilagige Wicklung zur Kombination 12-14. Hier ist es bereits schwieriger, die Zusammenschaltung von zwei nebeneinander liegenden Spulen und noch einer um 4 Zähne weiter liegenden Spule vorzunehmen.

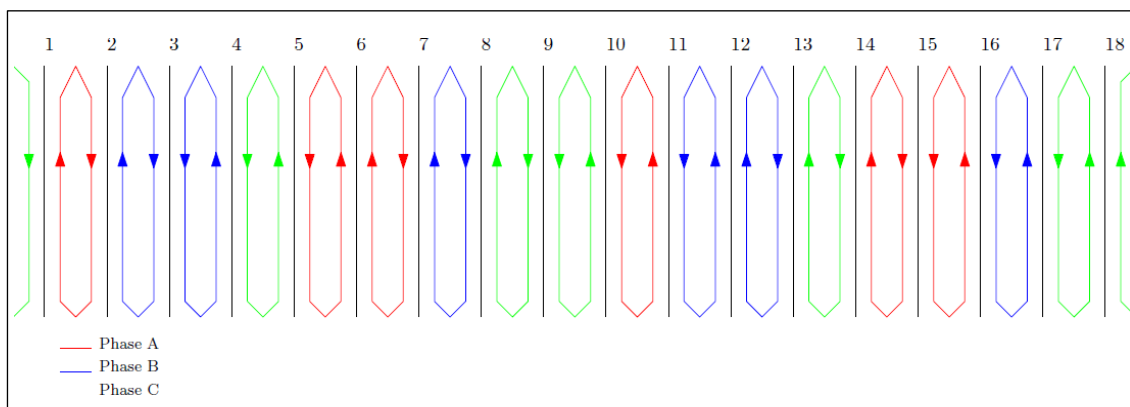


Abbildung 53: Zweilagiges Wickelschema für die Kombination 18-14

Die Kombination 18-20 ergibt ein zweilagiges Wickelschema nach Abbildung 54.

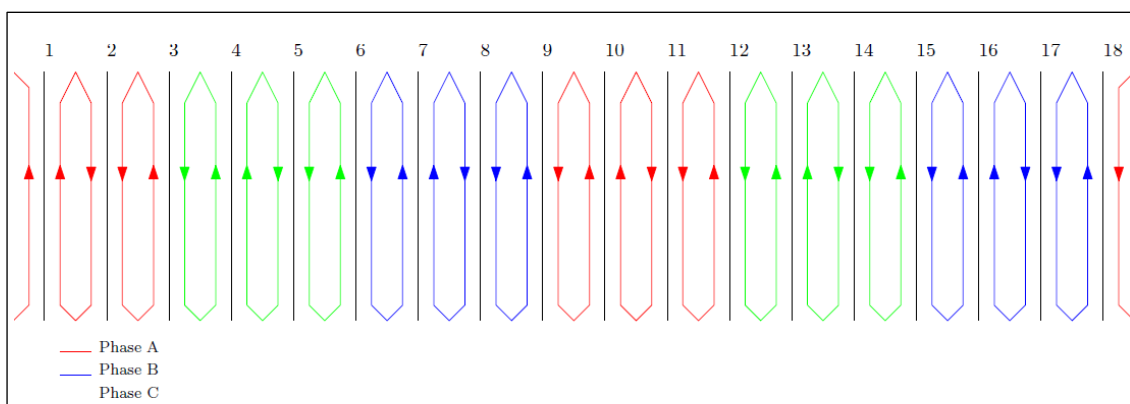


Abbildung 54: Zweilagiges Wickelschema für die Kombination 18-20

Auch hier ist die Zusammenschaltung der Spulen zu einem Strang aufgrund der nicht direkt nebeneinander liegenden Ein- und Ausgänge der einzelnen Spulen aufwändiger.

Es gibt nun für die Kombinationen 12-14 und 12-20 noch die Möglichkeit, die Wicklungen über mehrere Lagen zu verteilen, siehe dazu Abbildung 55.

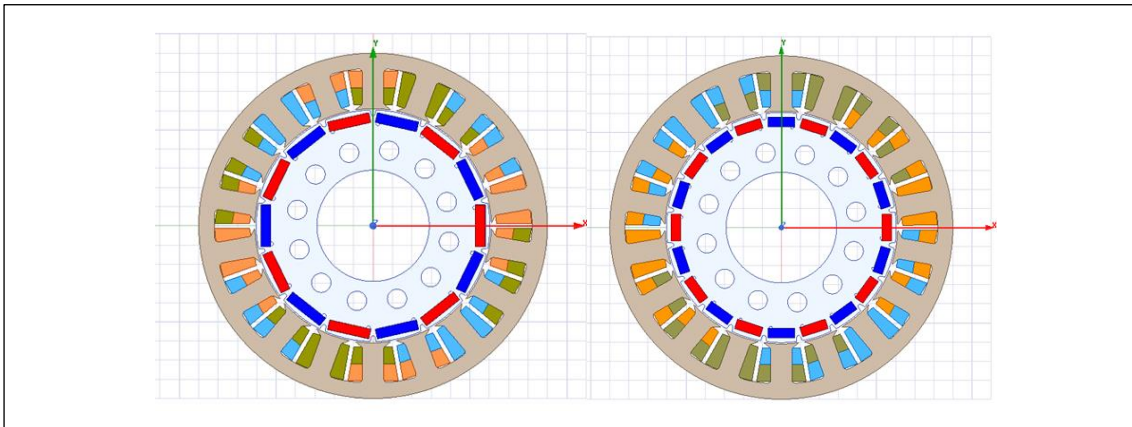


Abbildung 55: Mehrlagenwicklungen für die Kombinationen 12-14 und 12-20.

Sie haben aber eher theoretischen Charakter, denn das Wickeln von mehr als zwei Lagen in eine Nut ist selbst manuell kompliziert und das Zusammenschalten zu Wicklungen auch.

Die folgenden Abbildung 56 und Abbildung 57 zeigen die Wickelschemen für die beiden Kombinationen 12-14 und 12-20, bei denen nun 5 Spulen hintereinander zu einem Strang zusammengeschaltet werden müssten.

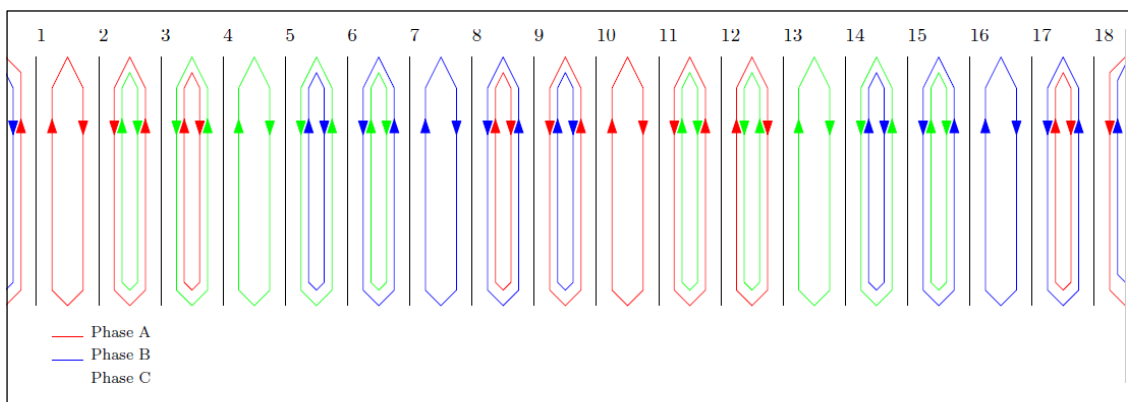


Abbildung 56: Dreilagiges Wickelschema für die Kombination 12-14

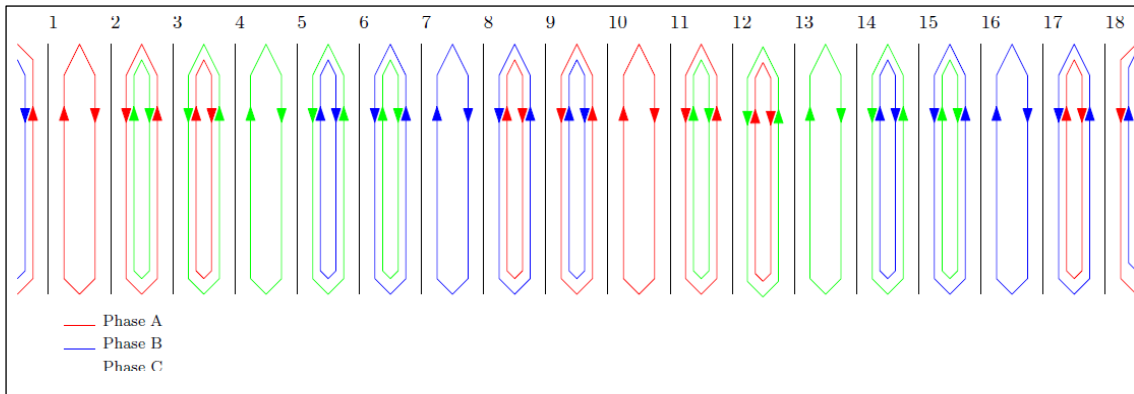


Abbildung 57: Dreilagiges Wickelschema für die Kombination 12-20

Die Kombinationen 12-14 und 12-20 führen wegen der Hintereinanderschaltung der Spulen eines Stranges zu höheren induzierten Spannungen als bei der Kombination 18-12. Das führt zu geringeren Windungszahlen als in Abbildung 51 angegeben und damit zu mehr parallelen Drähten. Die scheint für eine prototypische Umsetzung, ebenso für eine maschinelle Wicklung, eher ungeeignet.

Abbildung 58 zeigt die Induktion im Luftspalt für die 18-12-Kombination in einer speziellen Rotorposition. Die Einbrüche in den positiven Bereichen rühren von der Statornutung, die sich bei dieser Kombination daraus ergibt, daß jeweils ein Pol (in dieser Position) direkt unter einem Statorzahn und der andere zwischen zwei Zähnen steht, s.a. Abbildung 61, links. Es ergeben sich Maximalwerte von 0,75 T, eingebaut sind Magnete mit einer Remanenzinduktion von 1,1 T.

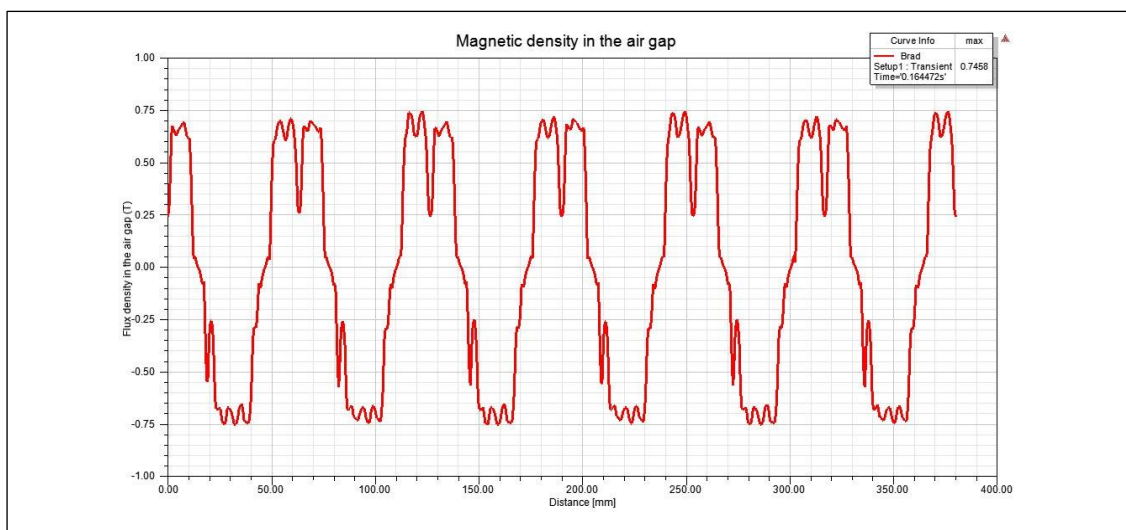


Abbildung 58: Luftspaltinduktion für die Kombination 18-12.

Die Abbildung 59 zeigt die Luftspaltinduktion für die Kombination 18-14 nach Abbildung 49, mitte, mit ebenfalls 0,75 T im Maximum und einer entsprechend der Kombination verteilten Ausprägung der durch die Statornutung verursachten Einbuchtungen.

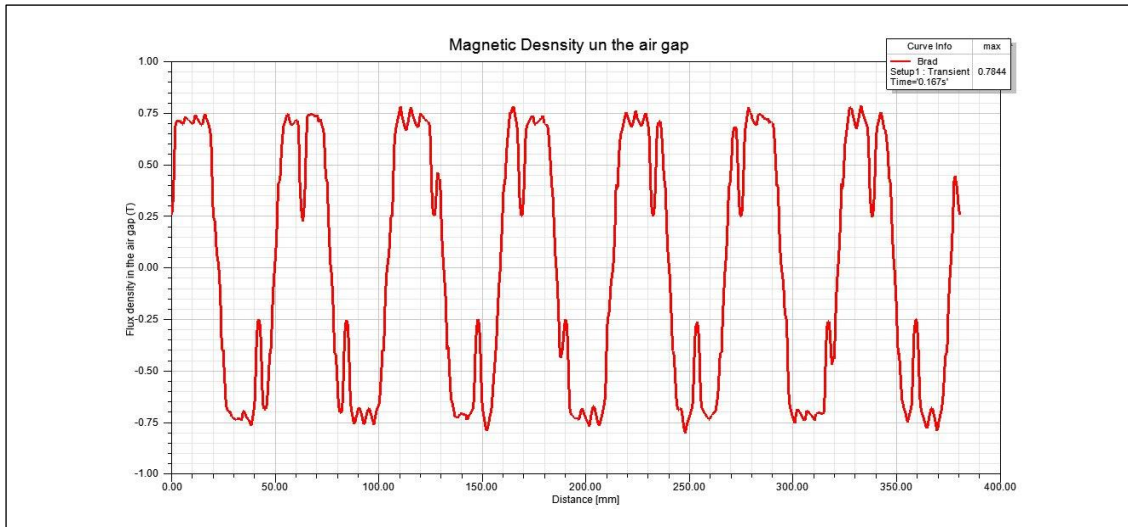


Abbildung 59: Luftspaltinduktion für die Kombination 18-14.

In der Abbildung 60 ist noch die Luftspaltinduktion für die Kombination 18-20 aufgezeigt.

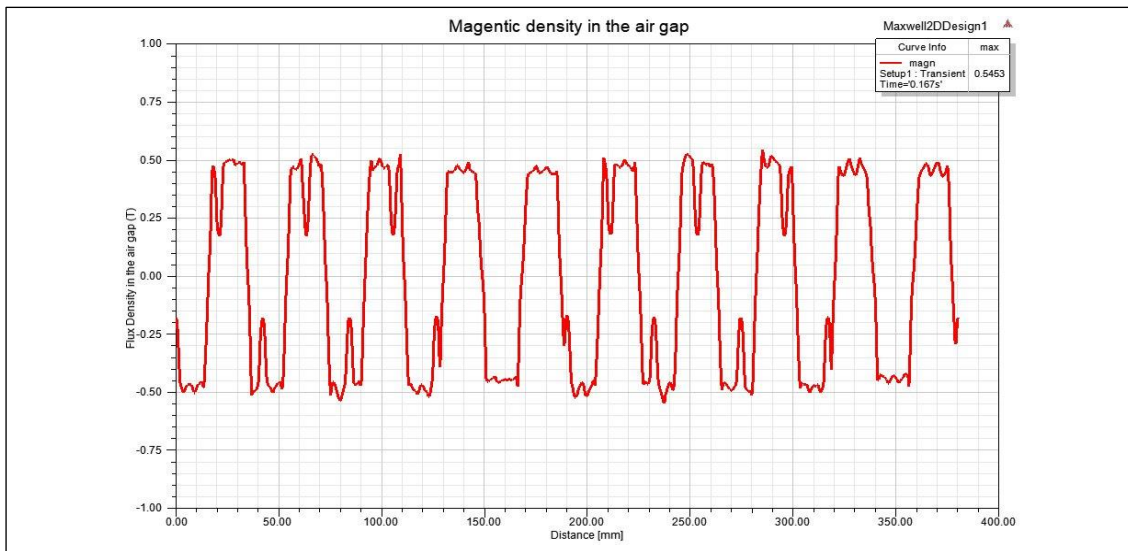


Abbildung 60: Luftspaltinduktion für die Kombination 18-20.

Man erkennt hier bereits die Problematik, daß die Nutschlitzöffnung des Staors einen hohen Einfluß hat, außerdem das Problem, daß nur eine Maximalinduktion von 0,5 T

erreicht wird, da die Vielzahl der Magnete am Umfang auch einen hohen Streufluß zwischen den Magneten erzeugt.

Man kann dies noch in den Induktionsverläufen im Vergleich zwischen den drei Varianten in Abbildung 61 verdeutlichen, obgleich in allen drei Variante speziell magnetische Engpässe zwischen den Polen in Form von Nuten in den Rotorblechschnitt eingebracht wurden.

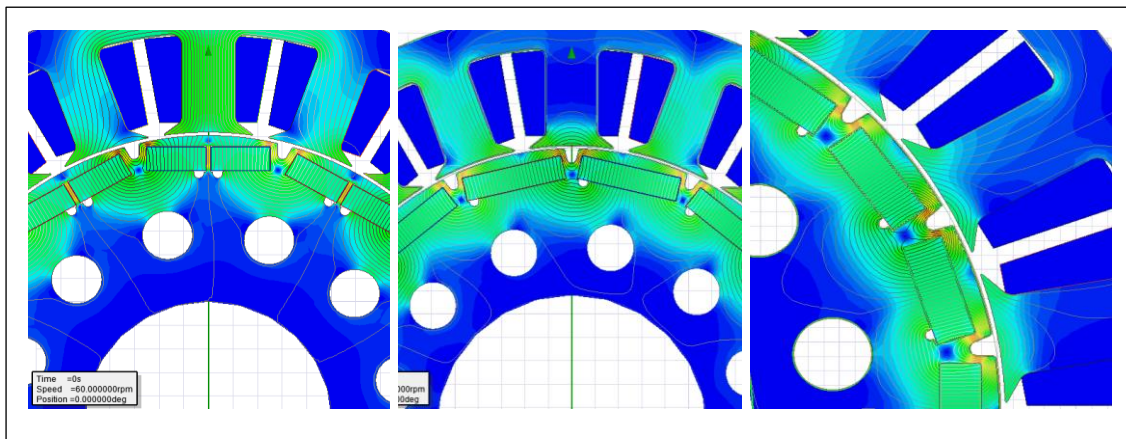


Abbildung 61: Feldverlauf im Vergleich der drei Varianten 18-12, 18-14 und 18-20

Der Verlauf der induzierten Spannung letztendlich, der von der Flußverkettung des Erregerfeldes zur Spule abhängt, ist in der Variante 18-12 zwar am niedrigsten, da nur die induzierte Spannung einer Spule die Strangspannung darstellt, die Varianten 18-14 und 18-20 erzeugen trotz der Hintereinanderschaltung von drei Spulen zu einem Strang aber nur etwa 2 mal so hohe induzierte Spannungen, siehe den Vergleich in Abbildung 62.

Hier erscheint die 14 polige variante (mitte) noch besonders gut, wenn man den nahezu sinusförmigen Verlauf der induzierten Spannung betrachte, die absolute Höhe erfordert aber eine im Vergleich zu 18-12-variante nur in etwa gedrittelte Windungszahl, was zu einer Verdreifachung der Anzahl paralleler Drähte, also dann 6, führt. Das ist wickeltechnisch nicht darstellbar.

So verbleibt in der Summe nur eine elektromagnetische Architektur mit 18 Nuten und 12 Polen, die eine machbare Wickeltechnik mit 2 parallelen Drähten und einer einfachen zusammenschaltung erlaubt.

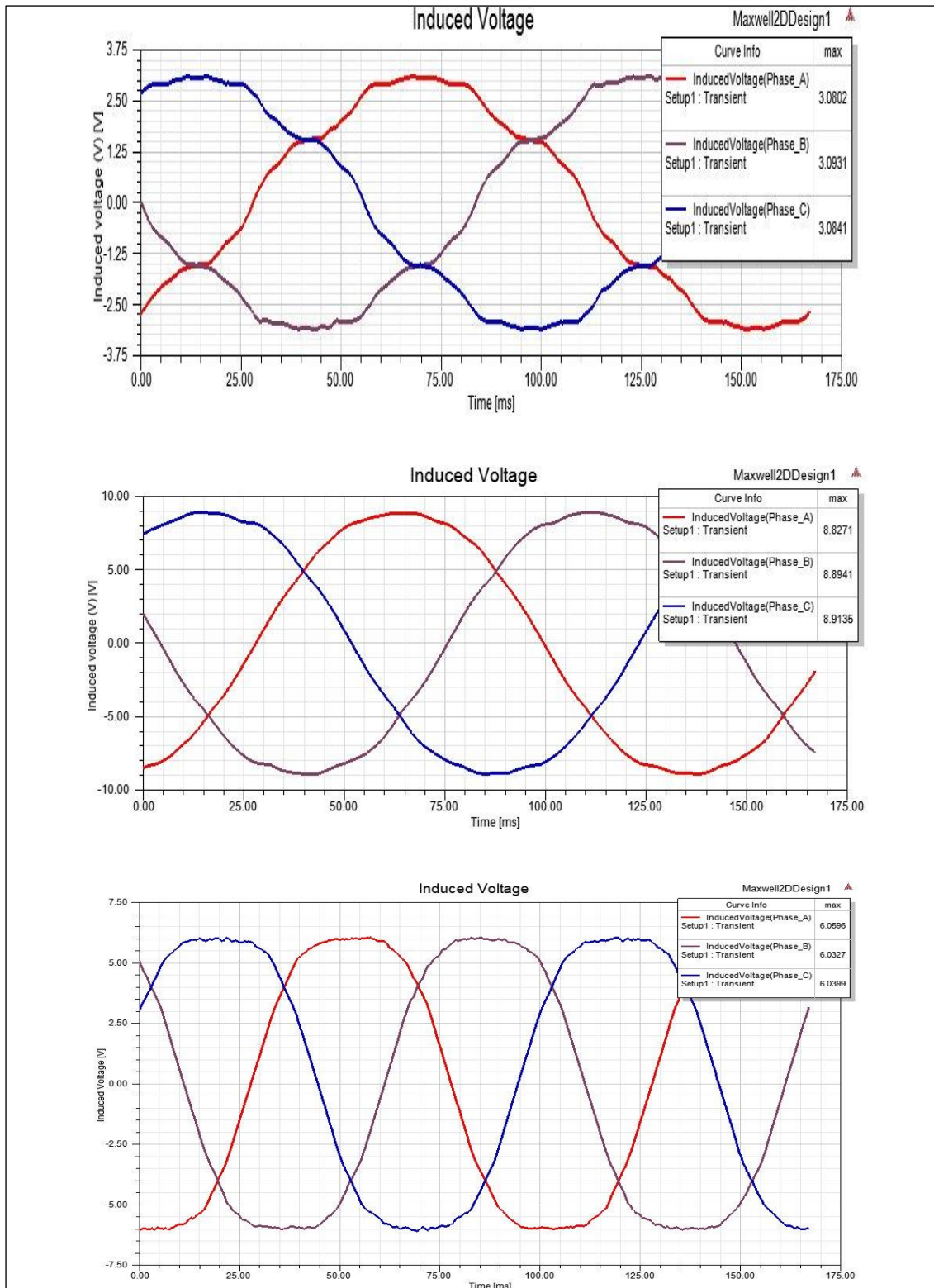


Abbildung 62: Induzierte Spannungen der drei variante 18-12 (oben), 18-14 (mitte) und 18-20 (unten) bei einer Drehzahl von 60 1/min

Abbildung 63 zeigt nun die Konstruktion des Stators, Abbildung 64 die des Rotors.

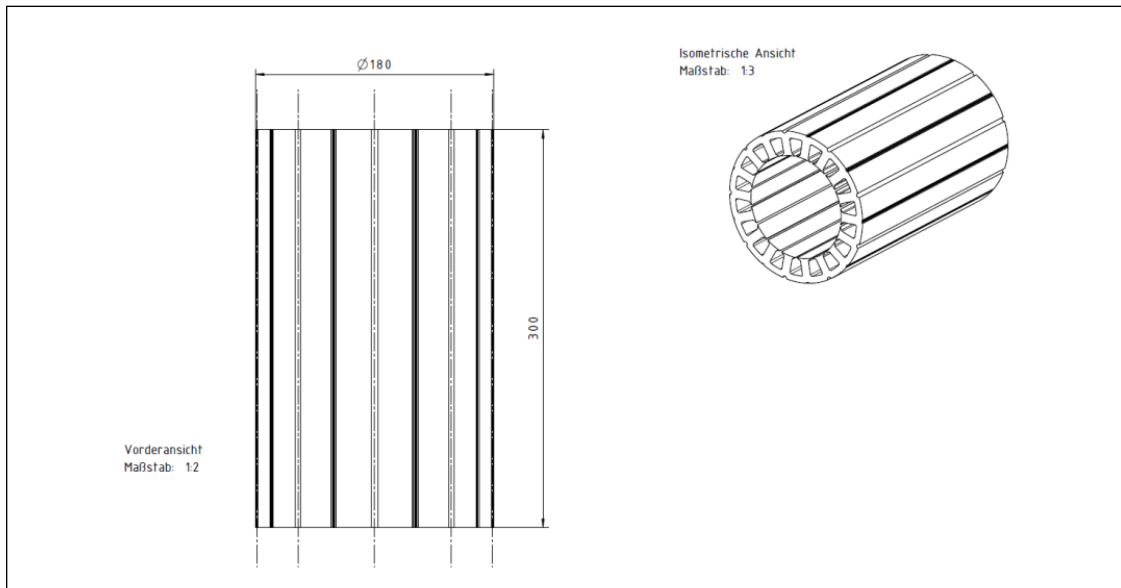


Abbildung 63: Stator des Motors M1

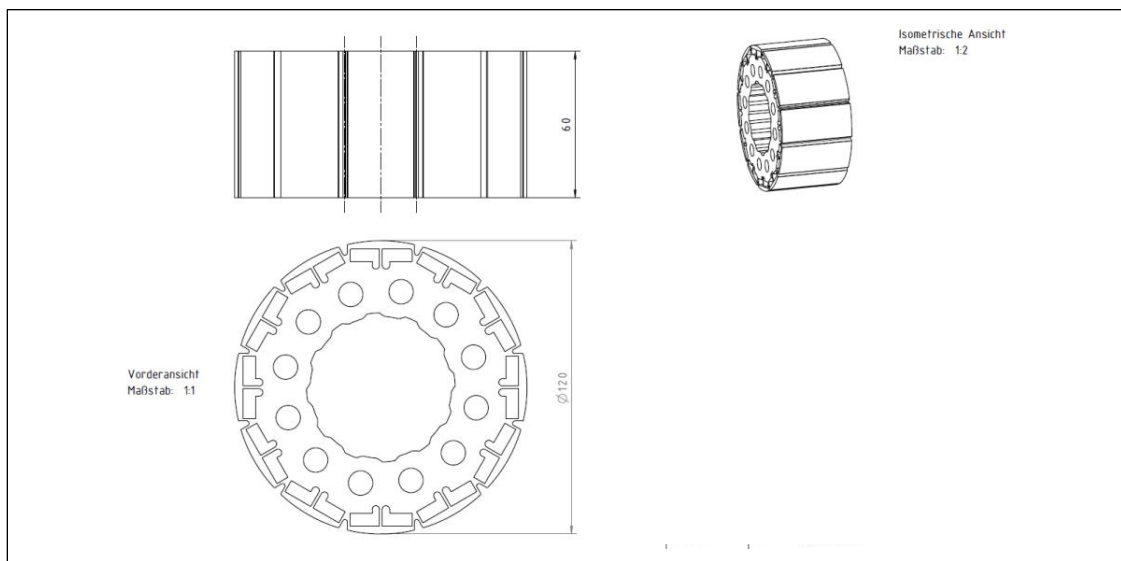


Abbildung 64: Rotorblechschnitt und -teilkpaket des Motors M1

Der Rotor ist aus fünf Einzelpaketen nach Abbildung 65 mit jeweils 60 mm Länge zusammgebaut. Dadurch wird gewährleistet, daß sich die Magnete (Abmessungen 20x10x5 mm, Neodym-Eisen-Bor; Remanenzinduktion 1,3 T) durchgängig gut in die Teilpakete einkleben lassen, was in einem 300 mm langen Rotorpaket schlecht möglich wäre.

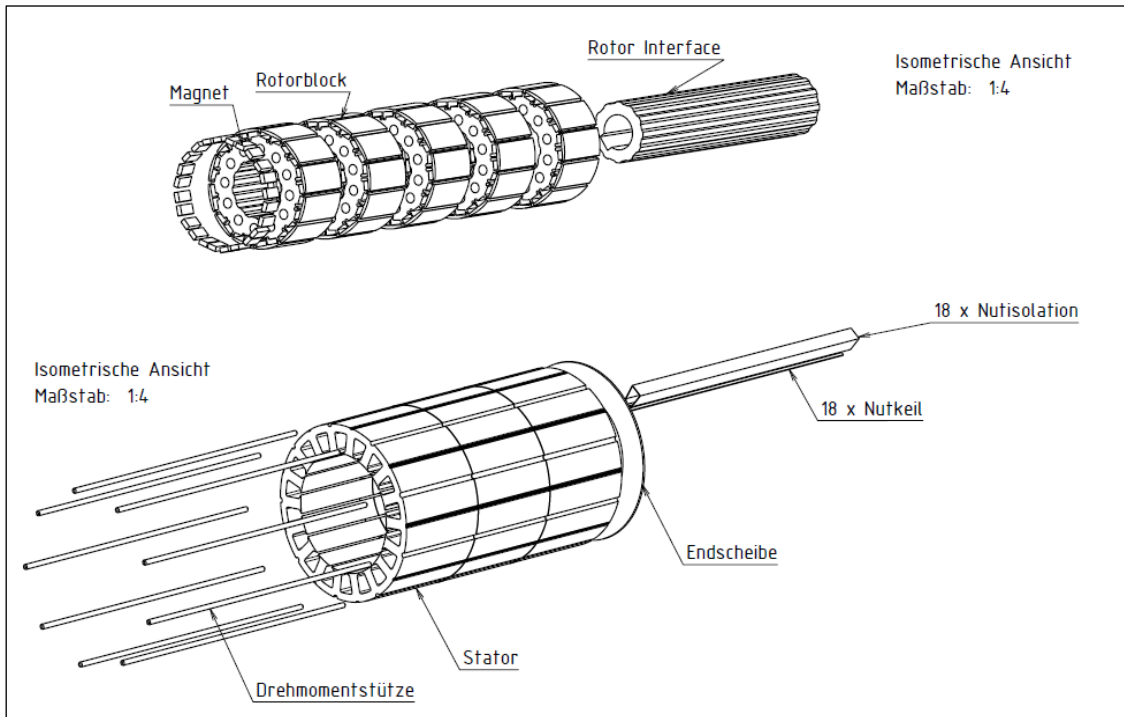


Abbildung 65: Zusammenbau der Baugruppe Motor M1

2.4.2. AP4.2 Kennfeld

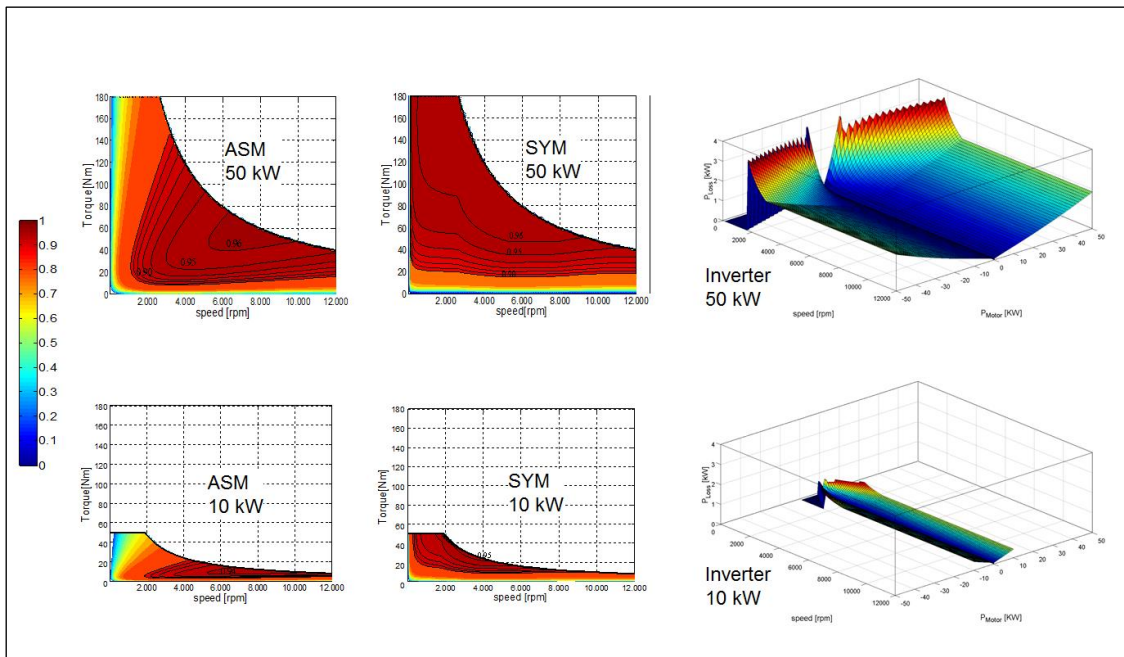


Abbildung 66: Wirkungsgrad- und Verlustkennfelder von Synchronmaschinen, Asynchronmaschinen und Umrichtern der gewünschten Leistungsklassen

Für die ersten Simulationsrechnungen wurden Wirkungsgrad-Kennfelder von Synchronmaschinen, Asynchronmaschinen und Verlustkennfelder von Umrichtern nach Abbildung 66 herangezogen. Abbildung 67 zeigt die aus den Auslegungsdaten ermittelten Wirkungsgradkennfelder der beiden Motoren M1 und M2 inclusive deren Leistungselektroniken.

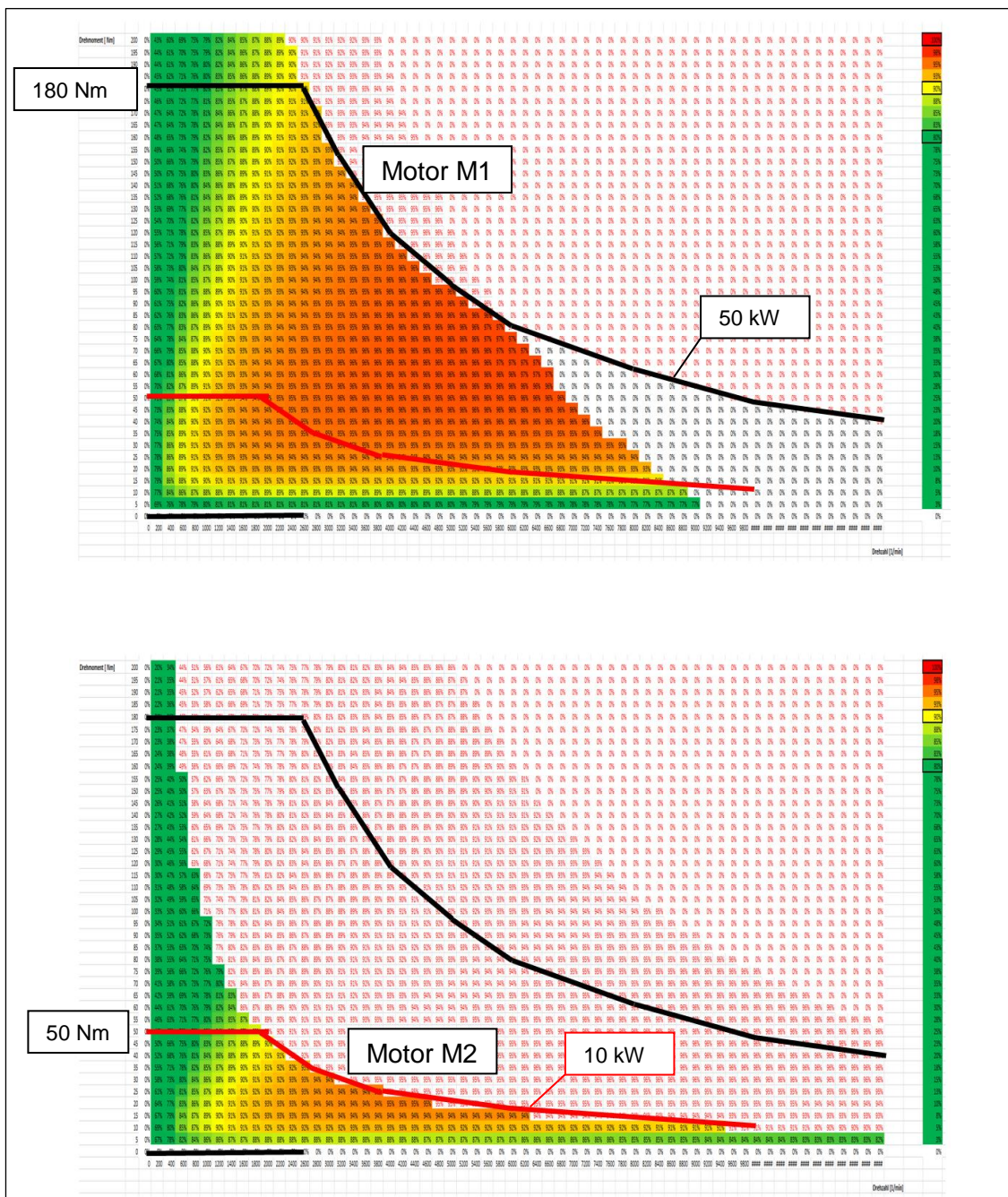


Abbildung 67: Wirkungsgradkennfelder für M1 und M2 (ohne Feldschwächung)

Eingezeichnet sind die Auslegungskennlinien (M1: schwarz, M2: rot). Rote Zahlen markieren den Bereich, in dem die Leistung über 50 kW bzw. 10 kW liegt. Schwarze Zahlen > 0% markieren den Bereich, in denen Strom fließen kann, schwarze Zahlen 0% den Bereich, in dem die induzierte Spannung so hoch liegt, daß ohne Feldschwächung kein Strom mehr fließen kann. Aus ihnen wurde das Potential an Wirkungsgraderhöhung hergeleitet. Auf dem Prüfstand konnten dann die Kennfelder der beiden Motoren gemessen werden. Abbildung 68 zeigt das Wirkungsgradkennfeld des großen Fahrmotors M1, die Abbildung 69 das Kennfeld des kleineren Motors M2, beide ohne Feldschwächung gemessen.

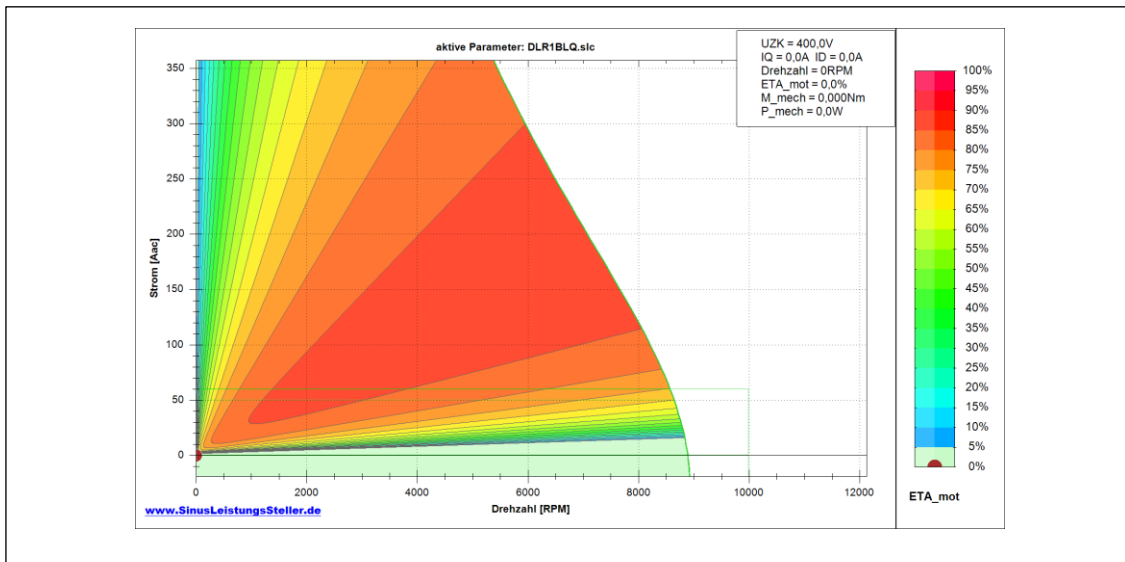


Abbildung 68: Wirkungsgradkennfeld M1

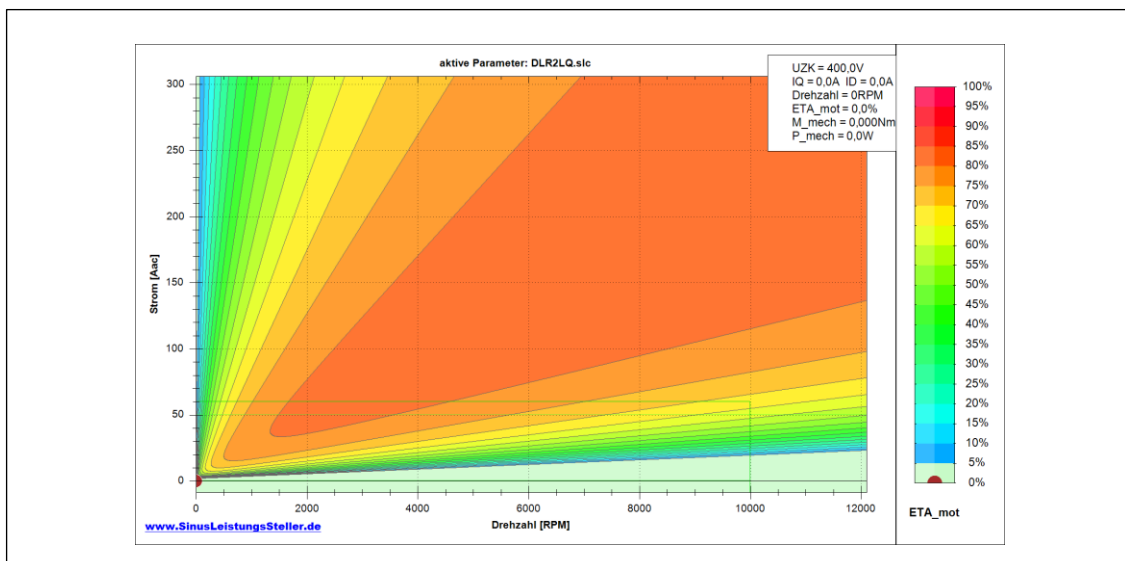


Abbildung 69: Wirkungsgradkennfeld M2

Da beide Motoren mit dem gleichen Wickelschema und der gleichen Windungszahl gewickelt sind, der kleinere Motor M2 aber kürzer ist, ist auch seine induzierte Spannung bei gleicher Drehzahl geringer. Der Bereich höherer Wirkungsgrade liegt damit höher als bei dem größeren Motor M1. Der größere Motor muß für die hohen Drehzahlbereiche im Feldschwächbereich betrieben werden, der kleinere Motor erzielt die Drehzahlen ohne Feldschwächung.

Auf gleiche Drehmomentwerte skaliert zeigt Abbildung 70 die beiden Kennfelder im direkten Vergleich.

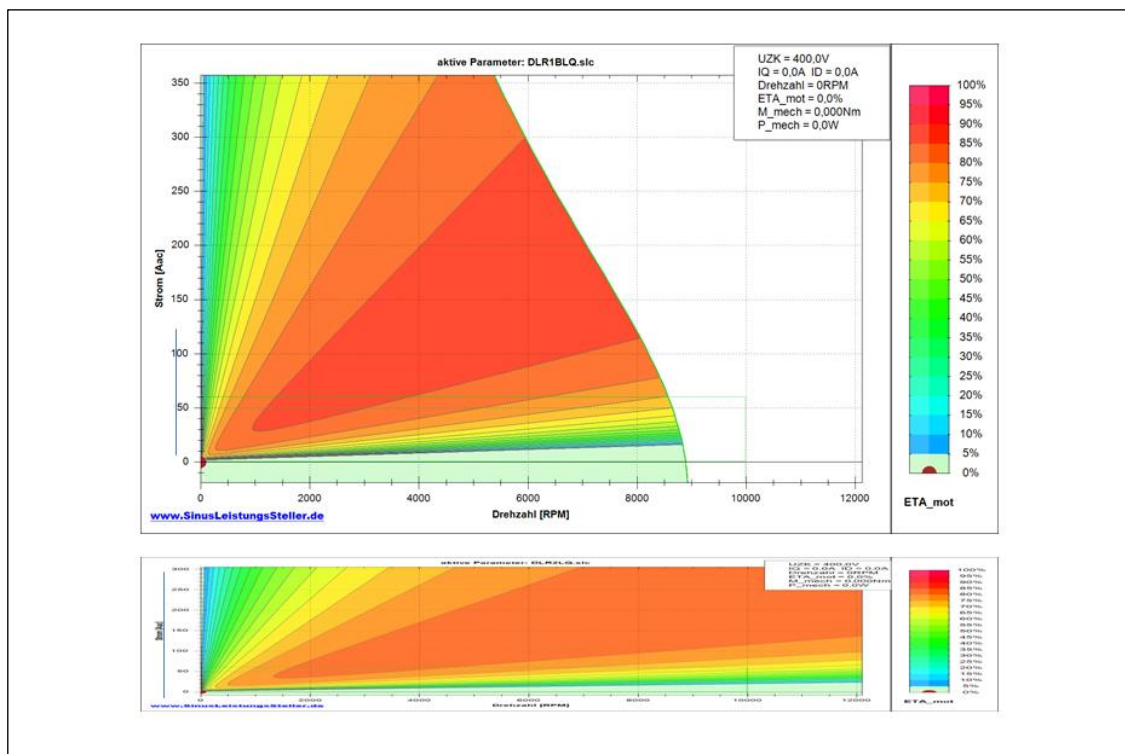


Abbildung 70: Auf gleiche Drehmomente skalierte Kennfelder der Motoren M1 und M2

2.4.3. AP4.3 Kühlung

Zu Beginn stellte sich die Frage, ob für das TIOM-System eine Kühlung der Motor-Wicklungen durch Anbindung an den Kältekreislauf vorteilhaft in Frage käme. Die Frage stellte sich aus dem Grund, daß bekannt ist, daß durch eine direkte Wicklungskühlung mit Öl (z.B. das Getriebeöl) den Wärmewiderstand gegenüber einer Kühlung mit einem Wassermantel halbieren kann [xx] und daher eine weitere Optimierung nur durch Kühlung mit Kältemittel erreicht werden kann. Aus Gründen der

zeitlichen Begrenzung kann in diesem Projekt dieser Aufwand aber nicht getrieben werden, sodaß eine Kühlung mit einem Wassermantel hier Genüge trägt.

Verschiedene Geometrien für eine Wassermantelkühlung konnten untersucht und verglichen werden, Abbildung 71, wobei die meisten aus fertigungstechnischen Gründen eher nicht in Frage kommen. Spiralförmige Geometrien ermöglichen definierte Strömungsverhältnisse.

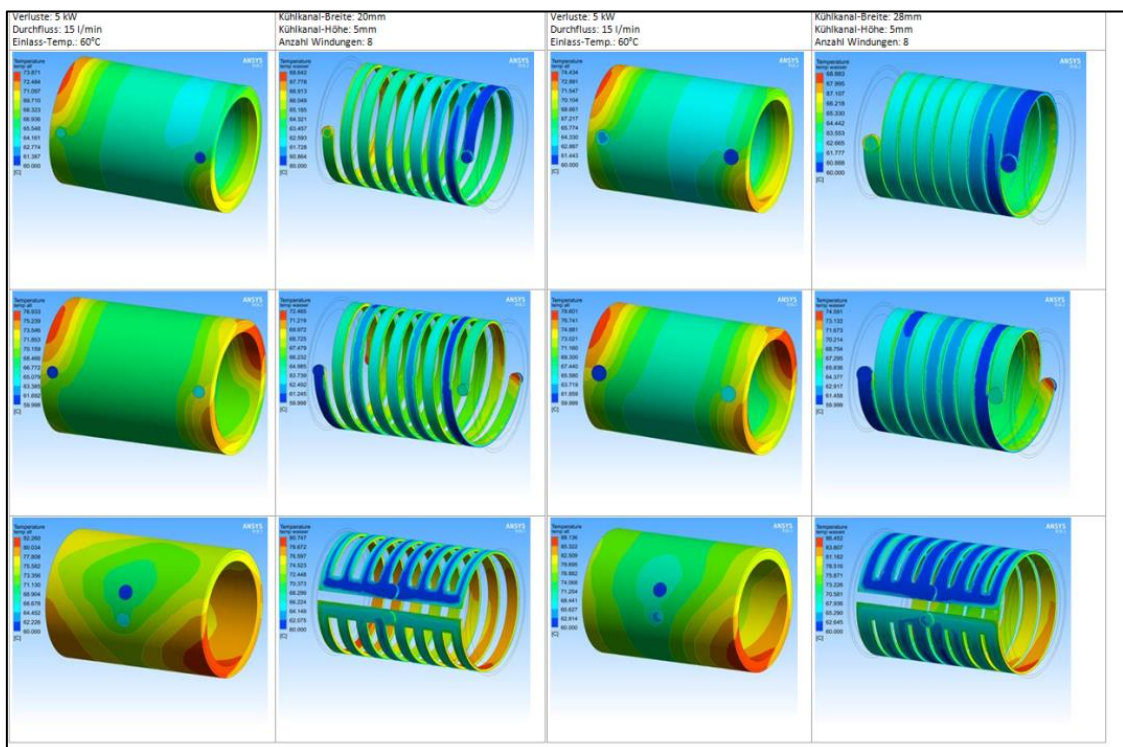


Abbildung 71: CFD-Simulation verschiedener Kühlkanalgeometrien

Interessant war noch die Fragestellung, ob axial in die äußere Statorkontur eingebrachte Kühlrohre, in denen auch Kältemittel des Klimakreislaufs verdampft werden kann, eine bessere Kühlung als eine Mantelkühlung ergeben, s.a. **Abbildung 66** mit den Tabelle 8 und Tabelle 9 für unterschiedliche Kühlmittel/Kühlkontur-Konzepte. Natürlich kann mit Kältemittel eine viel größere Temperaturdifferenz erzielt werden als mit Wasser, der Unterschied zwischen Röhren und Mantel war aber nicht gravierend. Wie oben schon erwähnt, blieb man der Einfachheit wegen bei einer Wassermantelkühlung.

Tabelle 8: 4 Konzepte für eine Kältemittelkühlung

| | | |
|-------------------------|---------------|--------------------|
| Kühlmedien | Wasser | Kältemittel |
| Kühlgeometrien | | |
| Axiale Kühlrohre | Konzept 1 | Konzept 2 |
| Mantelkühlung | Konzept 3 | Konzept 4 |

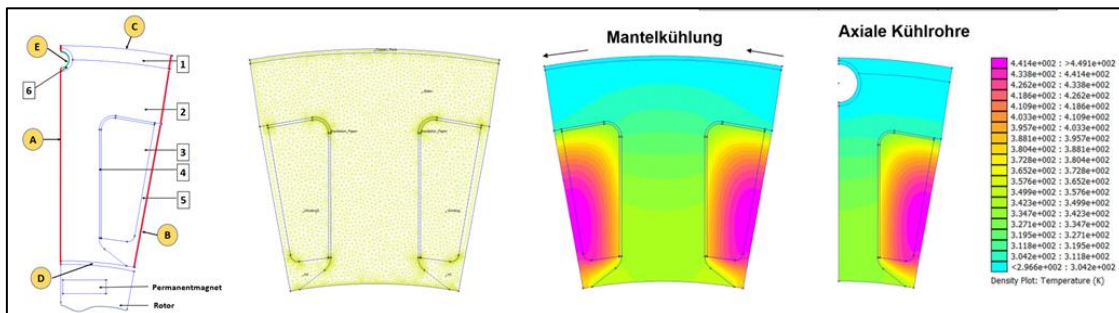


Abbildung 72: Wärmeersatzschaltung und Temperaturverläufe bei Mantel- bzw. Kühlrohrkühlung

Tabelle 9: Vergleich der vier Kältemittelkühl-Konzepte

| Drehzahl = $n = 7000 \left[\frac{1}{\text{min}} \right]$ | | | | | |
|---|---|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| | Einheit | K 1 | K 2 | K 3 | K 4 |
| Massenstrom | $\dot{m} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$ | 0,1035 | 0,04806 | 0,145 | 0,06 |
| Stromdichte | $j \left[\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right]$ | 5,95 | 5,95 | 5,95 | 5,95 |
| Spez. Wicklungsverluste | $q_{v,Cu} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right]$ | $1,794 \cdot 10^6$ | $1,42 \cdot 10^6$ | $1,76 \cdot 10^6$ | $1,351 \cdot 10^6$ |
| $q_{v,Cu}$-Abweich. zu K1 | % | 0 | -20,8 | -1,89 | -24,74 |
| Spez. Eisenverluste | $q_{v,Fe} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right]$ | $1,1 \cdot 10^6$ | $1,1 \cdot 10^6$ | $1,1 \cdot 10^6$ | $1,1 \cdot 10^6$ |
| Maximale Wicklungstemperatur | $\vartheta_{wickl} [^{\circ}\text{C}]$ | 180,11 | 88,72 | 170,17 | 76,08 |
| ϑ_{wickl}-Abweich. zu K1 | % | 0 | -49,25 | -5,55 | -57,77 |

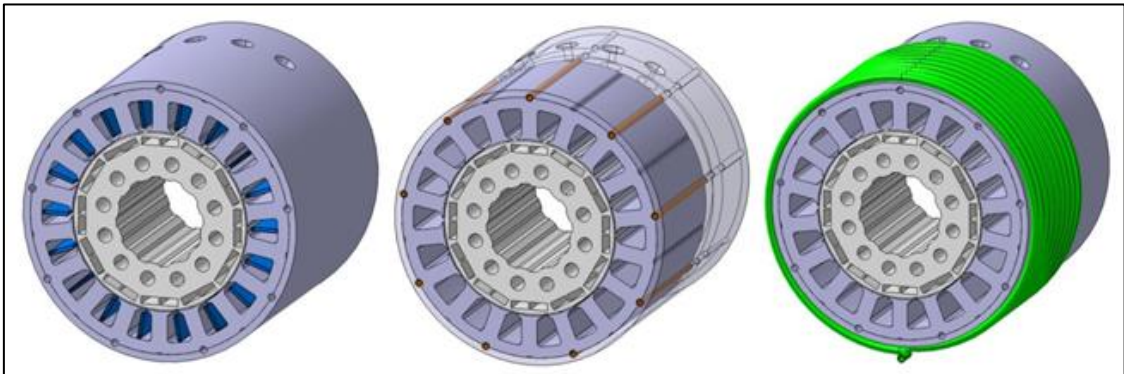


Abbildung 73: Stator ohne Kühlung, mit Kühlrohren und mit einer Mantelkühlung

Nach Abbildung 75 wurde ein Wärmeersatzschaltbild aufgestellt, abgeleitet aus Abbildung 74, um das Aufwärmverhalten berechnen zu können.

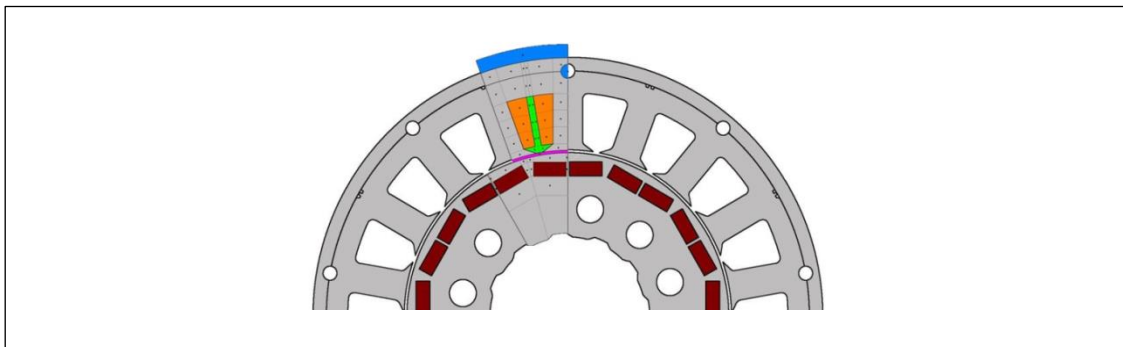


Abbildung 74: Ausschnitt für die Erstellung eines Wärmeersatzschaltbildes

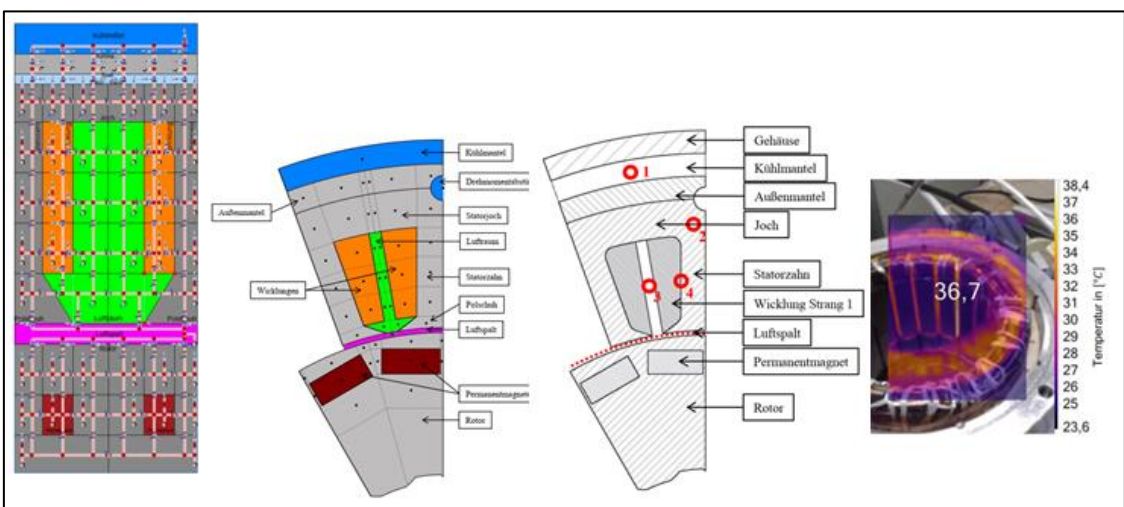


Abbildung 75: Ersatzschaltbild und Meßstellen zur Prüfung an dem Ausschnitt aus Abbildung 68

Außerdem wurden in den vorhandenen Motor des Vorgängerprojektes Thermolemente eingebracht, danach der Stator mit Gleichstrom bestromt und die Temperaturen gemessen. Mit diesem Ersatzmodell kann man die Erwärmung hinreichend genau bestimmen, Abbildung 76.

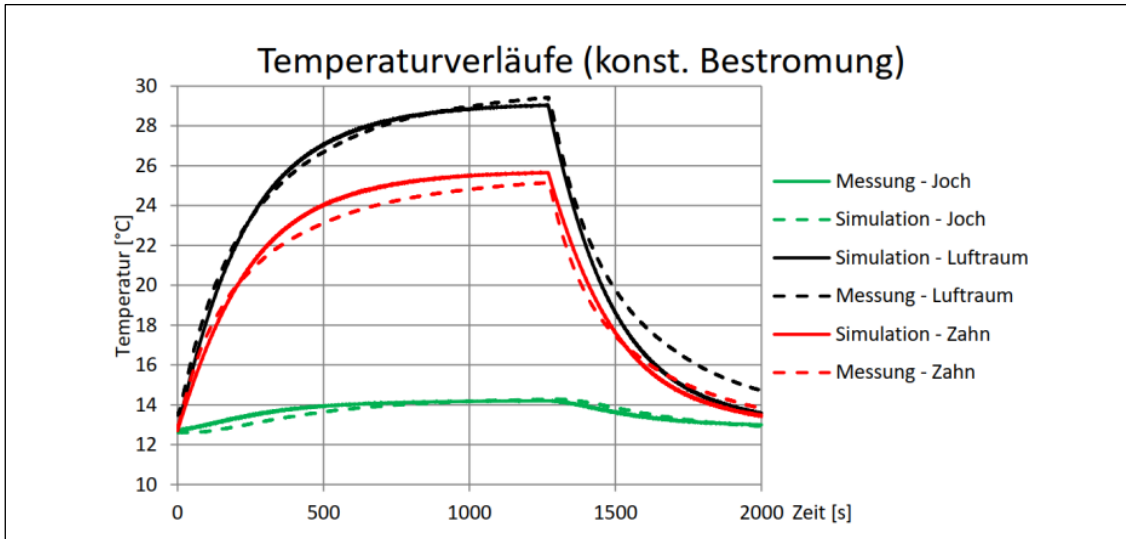


Abbildung 76: Vergleich Berechnung und Messung der Aufwärmung

II.1.5. AP 5 Kompressor

Es wurde ein Flügelzellenkompressor aus dem Smart Benzi-Serienmodell gewählt. In Abbildung 77 sieht man die Flügelzellenstruktur des Klimakompressors im auseinandergebauten Zustand.



Abbildung 77: Flügelzellen-Klimakompressor

II.1.6. AP 6 Getriebe

Für die Übersetzung der Motordrehzahl auf die Kompressordrehzahl wurde der Einfachheit halber ein Riementrieb gewählt.

II.1.7. AP 7 Kupplung

Mit der Kupplung C1 nach Abbildung 78 lassen sich die beiden Motoren M1 und M2 miteinander verbinden. Sie dient in dieser speziellen Konstruktion ebenfalls der Lagerung des Motors M1 (in dessen Welle dann wiederum der Motor M2 gelagert ist).

Die Kupplung wurde von der Fa. Kendrion entworfen, die in diesem Anwendungsbereich Erfahrung hat (elektromagnetische Kupplungen für Nutzfahrzeug-Klimakompressoren) und während des Projektverlaufs auch Interesse an gemeinsamer Arbeit zeigte (siehe auch Kap. 6.4 „wissenschaftliche/wirtschaftliche Anschlussfähigkeit“).

Ein feststehendes Teil (grün in Abbildung 78) trägt die Erregerwicklung (orange), der (gelbe) mit dem Rotor des Motors M1 verbundene Anker ist axial beweglich und mit dem (blauen) Magnetrückschluß verbunden. Zwischen ihm und dem Rotor des Motors 2 ist die Reibfläche (braun).

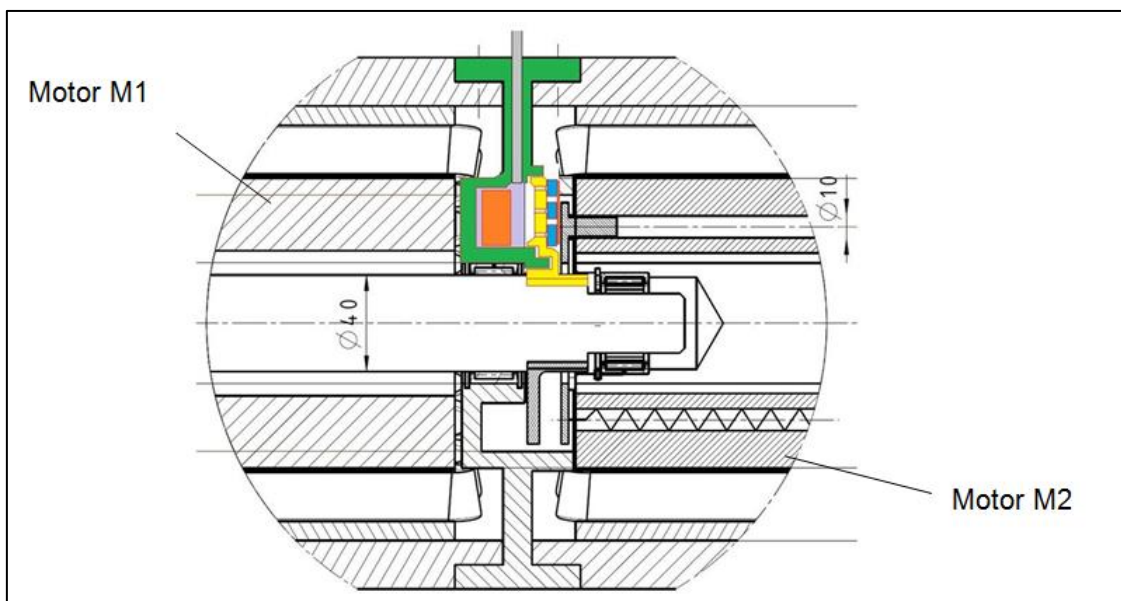


Abbildung 78: Kupplung C1 zwischen Motor M1 und Motor M2

Mitte des Jahres 2018 (3. Projektjahr) lagen alle Teile vor, die Abbildung 80 zeigt oben die Teile für die Motoren (Statorpakete, Rotorpakete, Magnete) und den zerlegten Kompressor.

Der Umrichter wurde von der Firma IBZ entwickelt und geliefert, Abbildung 81.



Abbildung 81: Wassergekühlter Umrichter der Fa. IBZ

Die Gehäuse mit der Mantelkühlung wurden aus zwei Einzelteilen zusammenschweißt geliefert, Abbildung 82.



Abbildung 82: Aus zwei Einzelteilen zusammenschweißtes Gehäuse des kleineren Motors M2

Weitere Einzelteile (Lagerschilde und Kupplungsanbauteile) siehe Abbildung 83.



Abbildung 83: Lagerschilde und Kupplungsanbauteile

Einige Fertigungs- und Bestellvorgänge nahmen mehrere Wochen Zeit in Anspruch, Lieferverzögerungen sind keine Seltenheit, zumal es sich um Einzelanfertigungen handelt, die bei den jeweiligen Lieferanten immer in ein Tagesgeschäft eingeplant werden müssen. So kam es bei der Beschaffung der Teile zu Verzögerungen, die auch Grund für die Verlängerung des Projektes waren.

II.1.8.2. AS 8.2 Teilebearbeitung

Es folgte zuerst das manuelle Wickeln der Statoren. Abbildung 84 zeigt den gewickelten Stator des Fahrmotors. Man erkennt die einfache Zusammenschaltung der Wicklung nach Abbildung 51, drei umlaufenden Schaltringe für die Zusammenschaltung der einzelnen Spulen, jeweils 6 parallele Spulen eines Stranges und die Zusammenschaltung der drei Stränge zum Dreieck.



Abbildung 84: gewickelter Fahrmotor M1

Abbildung 85 zeigt den kleineren Motor M2 mit eingelegtem Temperatursensor. Man erkennt ebenso die Zusammenschaltung der Einzelzahnspulen zur Wicklung.



Abbildung 85: gewickelter Motor M2

Der Rotor des Fahrmotors Motor 1 besteht aus 5 hintereinander auf die Welle aufgesteckten Einzelblechpaketen mit jeweils 60 mm Länge, in die zuvor die Magnete eingeklebt wurden, siehe Abbildung 86 links. Der kleinere Motor ist aus 2 solcher Einzelpakete aufgebaut, siehe Abbildung 86 rechts. Die Rotoren wurden dann von einem externen Dienstleistungsunternehmen gewuchtet. In den Abbildungen sieht man die Wuchtbohrungen in extra dafür vorgesehenen Wuchtringen.



Abbildung 86: Mit Magneten bestückte Rotoren (Motor 1 links, Motor 2 rechts)

II.1.8.3. AS 8.3 Montage

Ausgehend von den Konzeptüberlegungen nach Abbildung 87 und der Konstruktion nach Abbildung 88 erfolgte jetzt die Montage des TIOM-Systems. Abbildung 88 zeigt noch einmal den prinzipiellen Aufbau des TIOM-Systems, bestehend aus dem größeren Motor M1, der mit dem kleineren Motor M2 durch die Kupplung C1 kuppelbar ist, sowie den Klimakompressor, dieser durch eine Kupplung C2 an den Motor 2 ankuppelbar. Jeder Motor besitzt einen eigenen Umrichter PE1 und PE2.

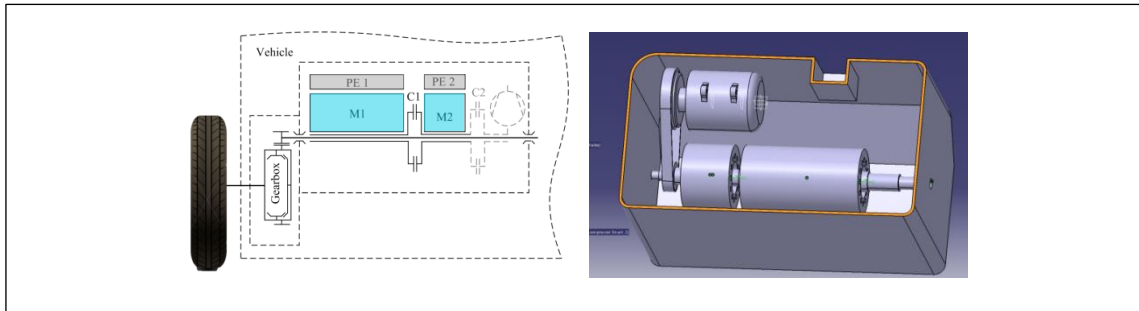


Abbildung 87: links: *prinzipieller Aufbau des TIOM-Systems*, rechts: *Konzeption des TIOM-Systems innerhalb der Hüll-Kontur (die Motoren sind nur mit ihren elektromagnetisch aktiven Teilen (Stator und Rotor) eingezeichnet)*

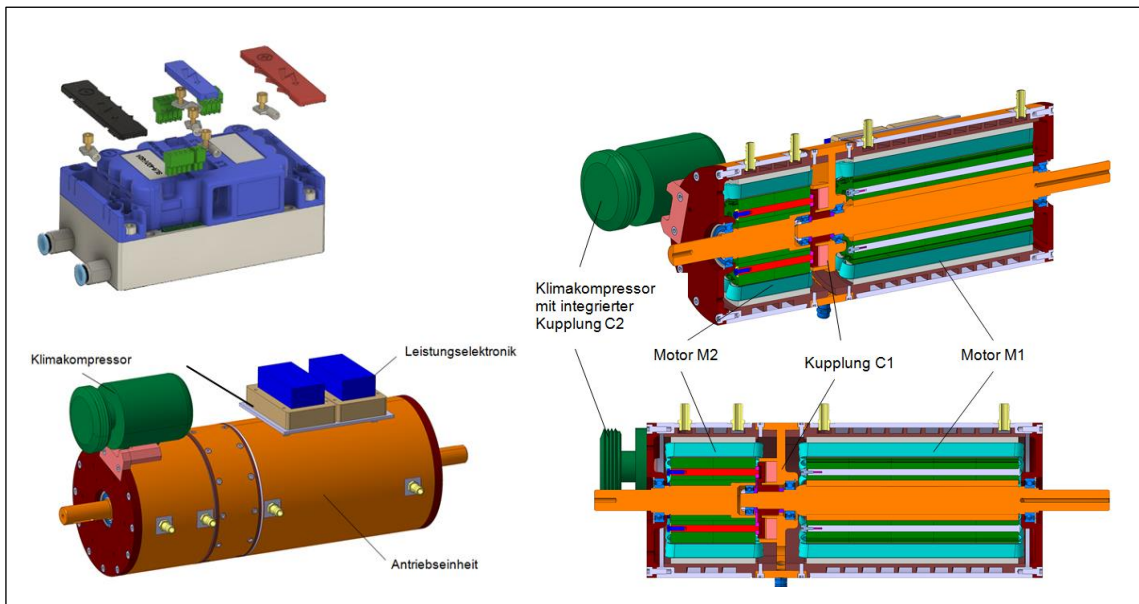


Abbildung 88: TIOM-System, bestehend aus der Antriebseinheit (braun, mit den beiden Elektroantrieben M1 und M2 sowie der Kupplung C1), einem Kompressor (grün, mit integrierter elektromagnetischer Kupplung C2) und zwei Umrichtern (blau, PE1 und PE2 für die beiden Motoren).

Abbildung 88 rechts zeigt auch den inneren Aufbau des Aggregats. Der große Motor M1 ist auf einer separaten Welle befestigt, die zwischen der elektromagnetischen Kupplung C1 und dem vorderen Lagerschild gelagert ist. Der kleine Motor M2 ist zum einen am anderen Lagerschild und zum anderen auf der Welle des großen Motors gelagert. Beide Motoren haben einen eigenen Kühlmantel, wobei die Kühlkanalgeometrie eine spiralförmige Kontur aufweist. Die Leistungselektroniken (Umrichter) sind ebenfalls flüssigkeitsgekühlt.

Die Statorpakete müssen dafür in die Gehäuse, die den Kühlmantel beinhalten, eingeschrumpft werden. Beim Einschrumpfen wurde das Statorgehäuse auf 160 Grad erwärmt und der Stator auf minus 20 Grad abgekühlt. Das Zusammenstecken erfolgte dann manuell, siehe Abbildung 89 für den kleineren Motor M2.

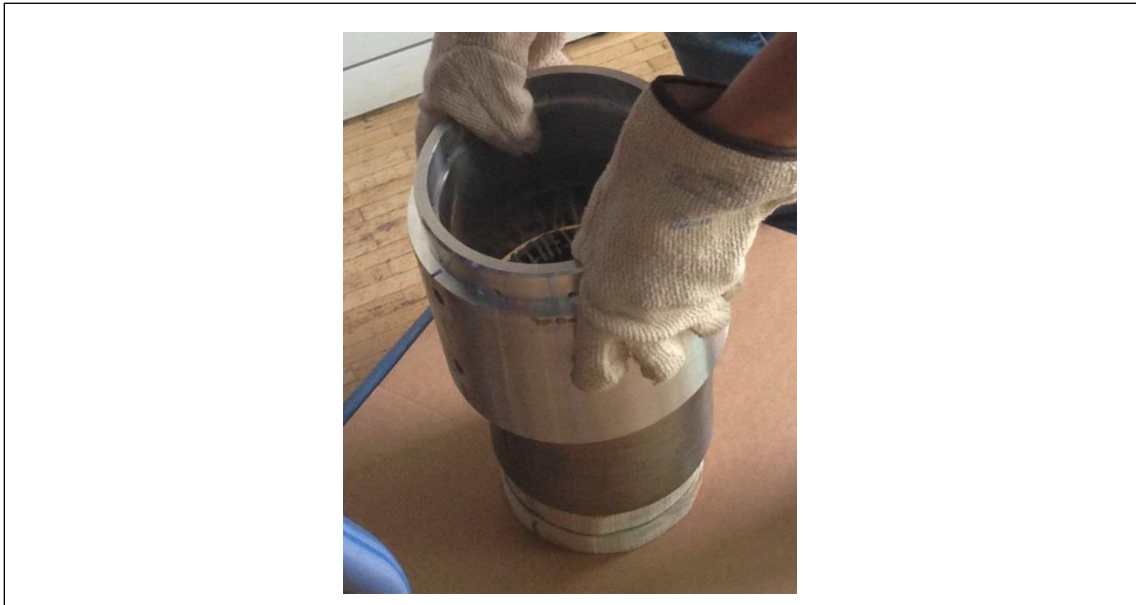


Abbildung 89: Einschrumpfen des auf 160 Grad erwärmten Stators in das auf -20 Grad abgekühlte Gehäuse

Die Rotoren sind mit den Lagerschilden verbunden, Abbildung 90.



Abbildung 90: Rotor des Fahrmotors (Motor 1) mit Lagerschild

Die Kupplung wird zuerst auf das Fahrmotor-Statorgehäuse montiert, danach erfolgt die Montage des Kompressormotors, Abbildung 91.



Abbildung 91: Kupplung zwischen Fahrmotor (Motor 1) und Kompressormotor (Motor 2), Rotorseite Motor 2 links oben

Beim Zusammenbau muß man beachten, daß die magnetisierten Rotoren sehr große Zugkräfte beim Einschieben in die Statoren erzeugen. Um die Rotoren fluchtend montieren zu können, werden sie mithilfe eines Montagegestells langsam eingefügt. Das Gestell kann auch die hohen axialen Zugkräfte aufnehmen. Siehe dazu auch die Abbildung 92 und Abbildung 93.



Abbildung 92: Montagegestell für die Montage der Rotoren in die Statorgehäuse

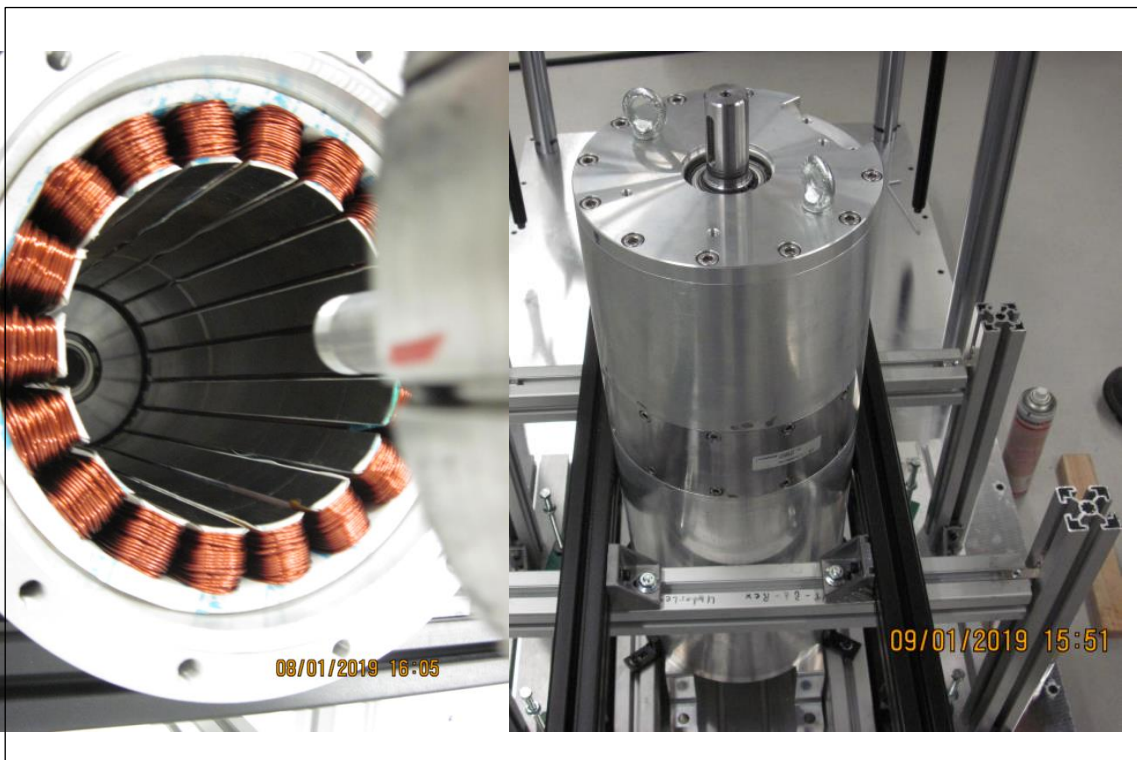


Abbildung 93: Zusammenbau, Einfügen des Rotors Motor 1 zusammen mit dem Motor 2 und der Kupplung in das Gehäuse des Motors 1

2.8.4. AS 8.4 Prüfstandanpassung

2.8.4.1. Motoren- Prüfstand

Das TIOM-System wurde auf einem Motorenprüfstand aufgebaut und angeschlossen, s. Abbildung 94 und Abbildung 95.

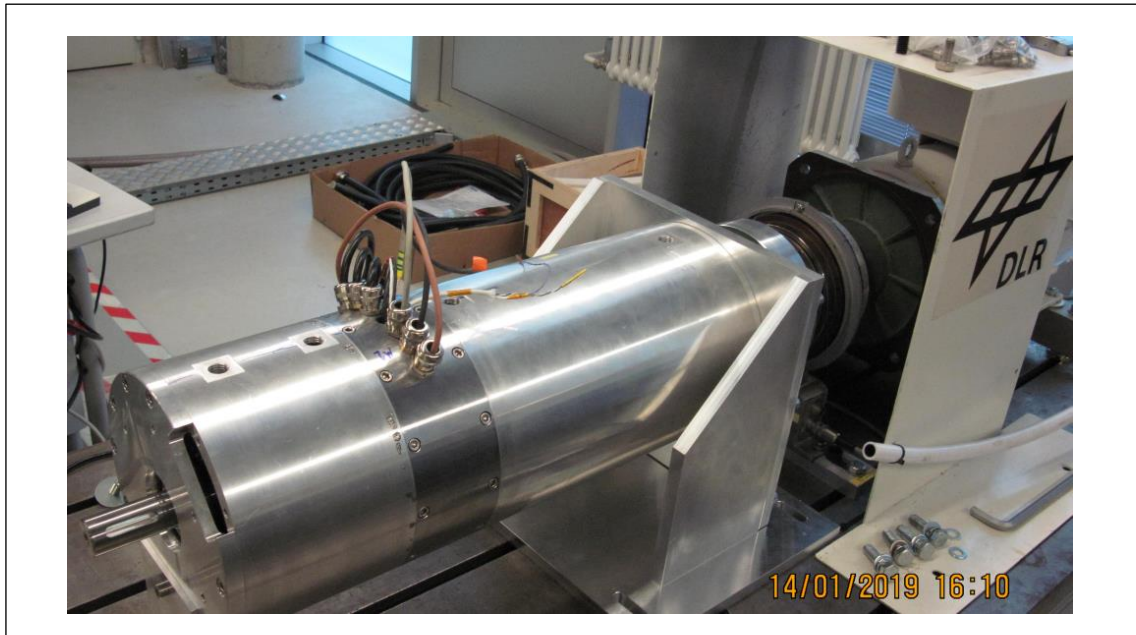


Abbildung 94: TIOM-Motoren auf dem Motorenprüfstand

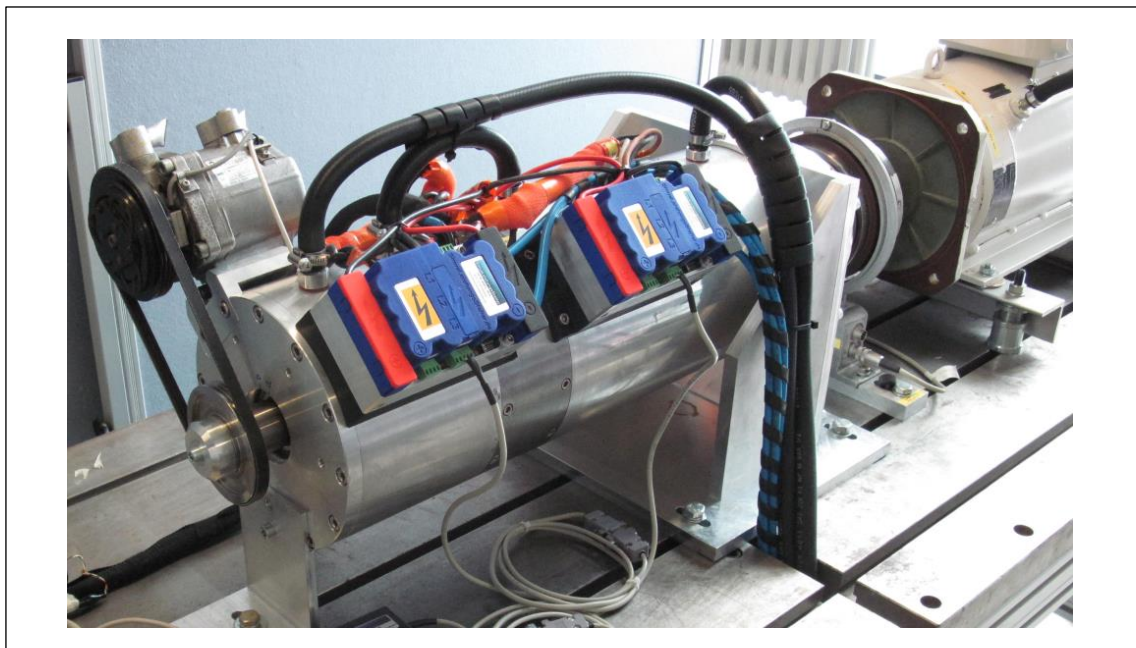


Abbildung 95: TIOM-System auf dem Motorenprüfstand

Er erlaubt das Fremdantreiben mit Messung des Drehmomentes und damit die Leerlauf- und Kurzschlußmessungen, aus denen die Motorparameter, Einzelverluste und Wirkungsgrade ermittelt werden. Er kann ebenso das Gegenmoment beim Betrieb des TIOM-Systems aufnehmen. Am Prüfstand ist Wasserkühlung vorhanden. Die Messungen werden nach dem Erprobungsplan (aus dem ersten Berichtszeitraum) gemessen.

Am Kompressormotor, siehe vorderer linker Bildausschnitt in Abbildung 94, befindet sich eine Aufnahmeöffnung für den Flansch des Klimakompressors.

2.8.4.2. Kältekreislauf-Prüfstand

Abbildung 96 zeigt den Prüfstand für den Kältekreislauf während des Aufbaus. Er besteht aus zwei Wärmeübertragern, die die Kälte des Verdampfers und die Wärme des Kondensators an externe Temperiergeräte abgeben, dem Expansionsventil und zwei Schnell-Anschlussleitungen für den Kompressor, der dann am TIOM-System auf dem Motorenprüfstand angebracht ist. In der Abbildung 96 sieht man oben den Klimakompressor, der hier aber nur angeheftet ist, um die Anschlußleitungen befestigen zu können. Er wurde in diesem Projekt nicht in Betrieb genommen.



Abbildung 96: Kältekreislauf-Prüfstand

Dynamik berücksichtigende induzierte Spannung. Letztere stimmt mit der Messung unten rechts hinreichend genau überein.

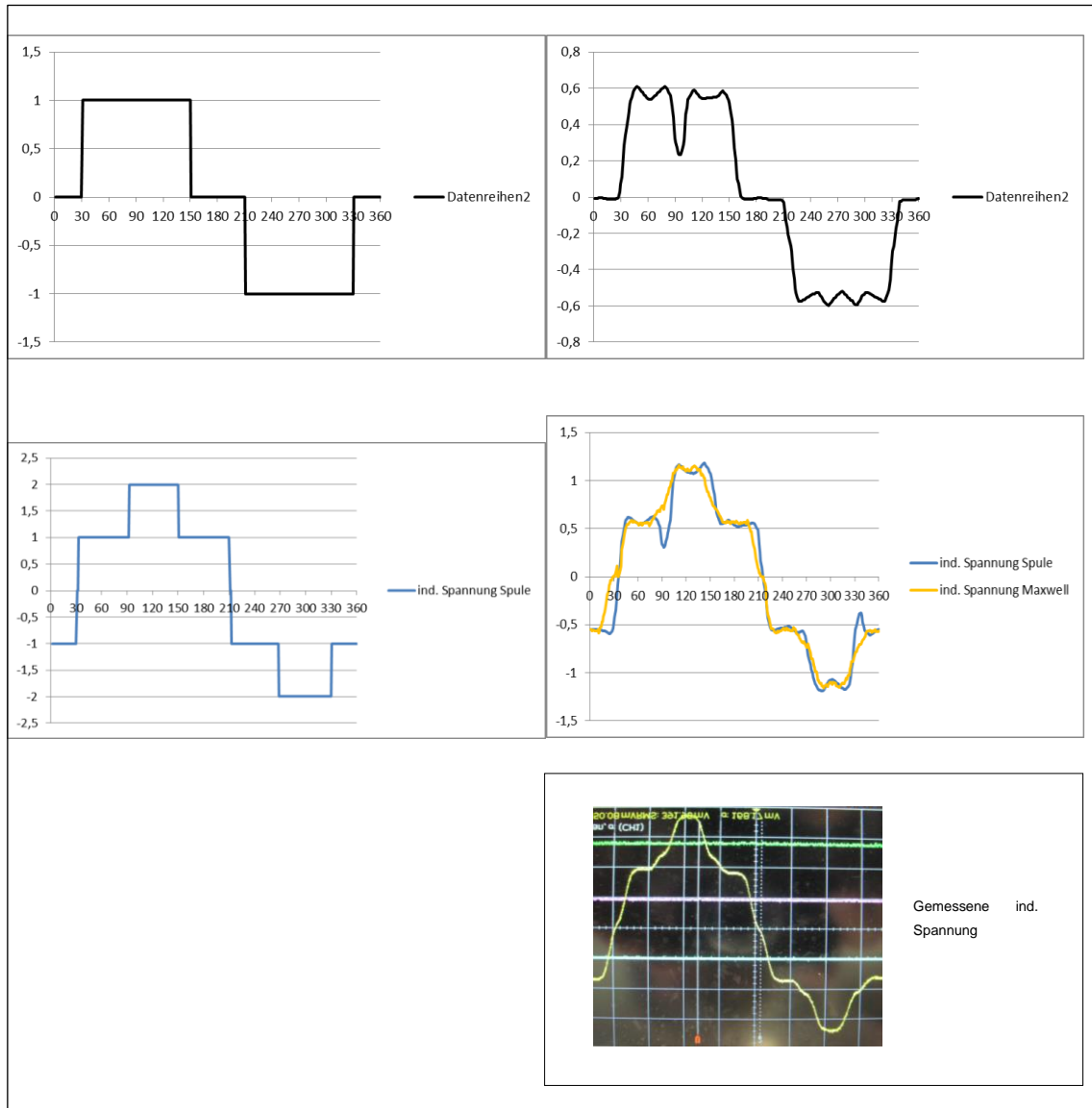


Abbildung 98: Theoretische Herleitung (links) der induzierten Spannung aus dem Luftspaltinduktionsverlauf und numerische Simulation (rechts), (Luftspaltinduktion oben, induzierte Spulenspannung mitte, Messung induzierte Spulenspannung unten

Festzuhalten ist aber auch, daß die theoretische Vorüberlegung (links) nicht weit von der Realität entfernt ist und man den Aufwand der numerischen Simulation nicht unterschätzen darf. Die theoretische Herleitung benötigt einen Tag Zeitaufwand, die numerische Simulation mit Einarbeitung und Untersuchung von Varianten laut AP4 hingegen 3 Monate.

Der Leerlaufversuch ergibt die induzierte Strangspannung in Abhängigkeit der Drehzahl, wie in Abbildung 99 gezeigt.

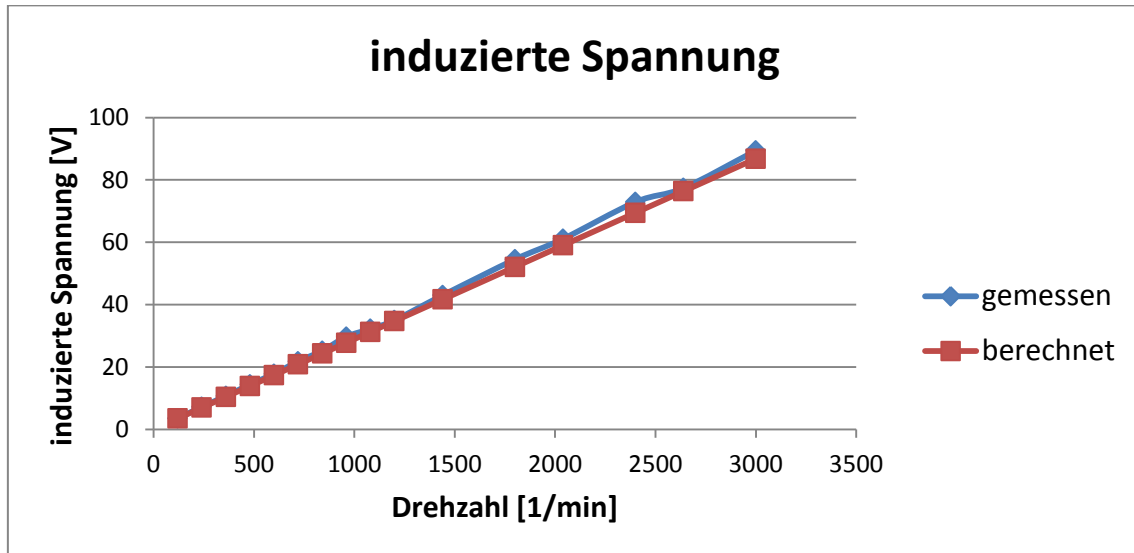


Abbildung 99: Induzierte Strangspannung des Motors M1

Die Auslegung war 250 V bei 9600 1/min bei einer Eisenlänge von 270 mm nach AP 4. Gemessen wurden 90 V bei 3000 1/min und einer Eisenlänge von 300 mm. Das sind $90 \times 9600/3000 = 288$ V bei 30 mm (etwas längerem) Eisenpaket. Rückgerechnet auf 270 mm Eisenlänge dann $288 \times 270/300 = 260$ V, was für eine analytische Auslegung als hinreichend genau anzusehen ist.

Kurzschlußversuch

Abbildung 100 zeigt den Kurzschlußstrom in Abhängigkeit der Drehzahl. Die Berechnung des Kurzschlußstromes aus der induzierter Spannung, dem Strangwiderstand und der Stranginduktivität ist in der blauen Kurve dargestellt. Dabei ist berücksichtigt, daß gegenüber der idealen Berechnung der Induktivität mit idealer Polüberdeckung der Anteil der durch die Statornut ausgesparten Überdeckung abgezogen ist. Der Strangwiderstand liegt dann bei 16 mOhm und die Stranginduktivität bei 180 uH. Auch hier zeigt die analytische Auslegung im Vergleich mit der Messung (rote Kurve) hinreichend genaue Ergebnisse.

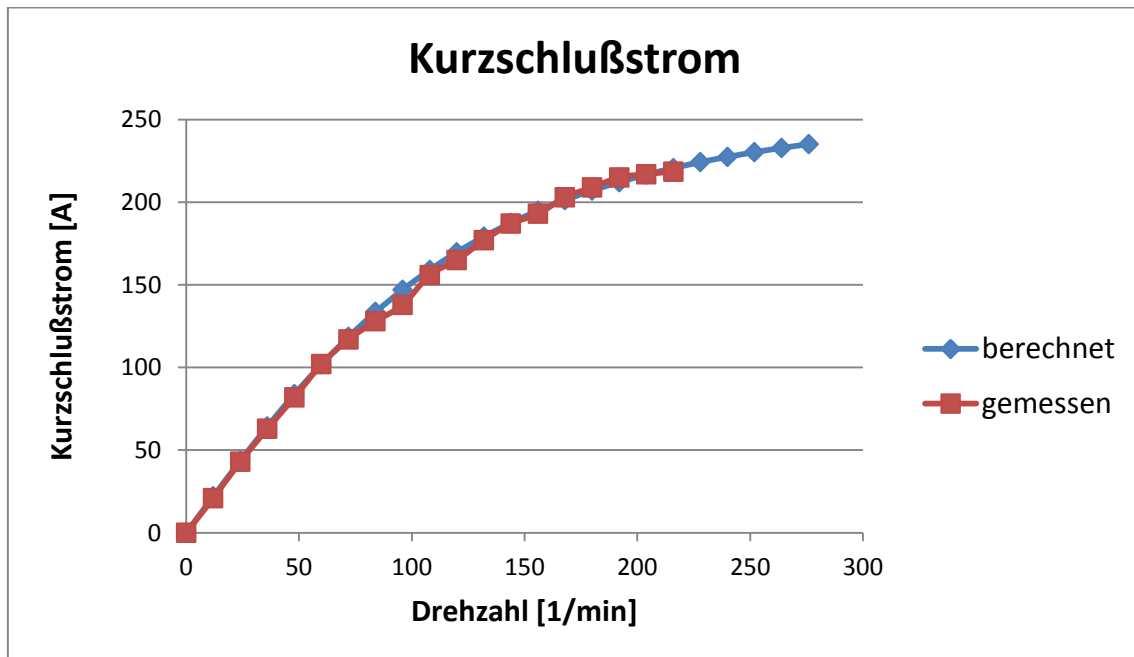


Abbildung 100: Kurzschlußstrom des Motors M1

Erwärmung

In der Abbildung 101 sieht man die Erwärmung des Motors ohne und mit Wasserkühlung bei unterschiedlichen Belastungen. Die Temperatur wurde in der Nut in einer Wicklung gemessen, wo die höchste Temperaturbelastung auftritt.

Durch die Wasserkühlung wird die Temperatur in der Wicklung bei hohen Strömen um teilweise mehr als 20 K reduziert. Die Zeitkonstanten liegen dabei zwischen 20 min bei Luftkühlung und 40 min bei Wasserkühlung. Die Wicklungstemperatur darf maximal 120 Grad C erreichen, damit ist genügend Reserve vorhanden.

Da die kurzzeitigen Überholvorgänge, in denen die maximale Antriebsleistung von 60 kW benötigt wird (3% der kumulierten Antriebsleistungsverteilung nach Abbildung 20), deutlich unterhalb von 40 min liegen, kann der Motor hier auch kurzzeitig im Überlastbereich betrieben werden. Die Leistung zum Überholen sowie für den Klimatisierungsbedarf kann somit ausreichend gedeckt werden.

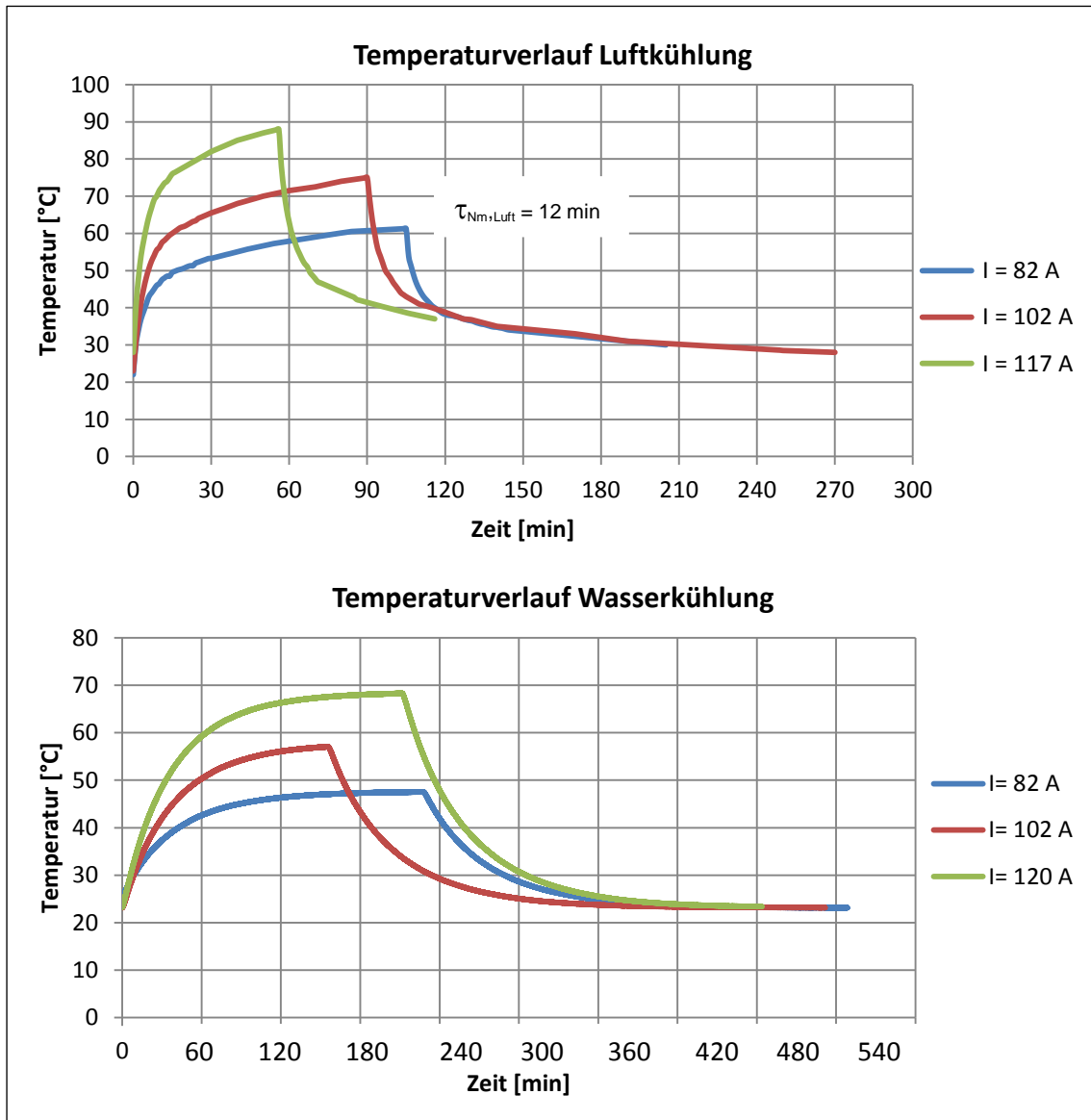


Abbildung 101: Erwärmung der Wicklung und Zeitkonstanten des luftgekühlten und des wassergekühlten Motors M1

Wirkungsgrad

Mit der Software des Umrichters lässt sich aus den Faktoren für die induzierte Spannung und für das Drehmoment der Wirkungsgrad errechnen. Die Kennfelder der beiden Motoren sind in der Abbildung 102 dargestellt. Sie sind bereits in Abbildung 67 bis Abbildung 69 verglichen. Der kleinere Motor M2 erreicht (hier ohne Feldschwächung) höhere Drehzahlen, da er bei gleichem Blechschnitt und nach dem gleichen Wickelschema wie M1 gewickelt ist, also geringere aktive Eisenlänge und

damit geringere induzierte Spannung aufweist. Er hat ab etwa 6000 1/min, was 60 km/h entspricht, höhere Wirkungsgrade als Motor M1. Der Einfluß ist bei dieser Motorkonfiguration relativ gering.

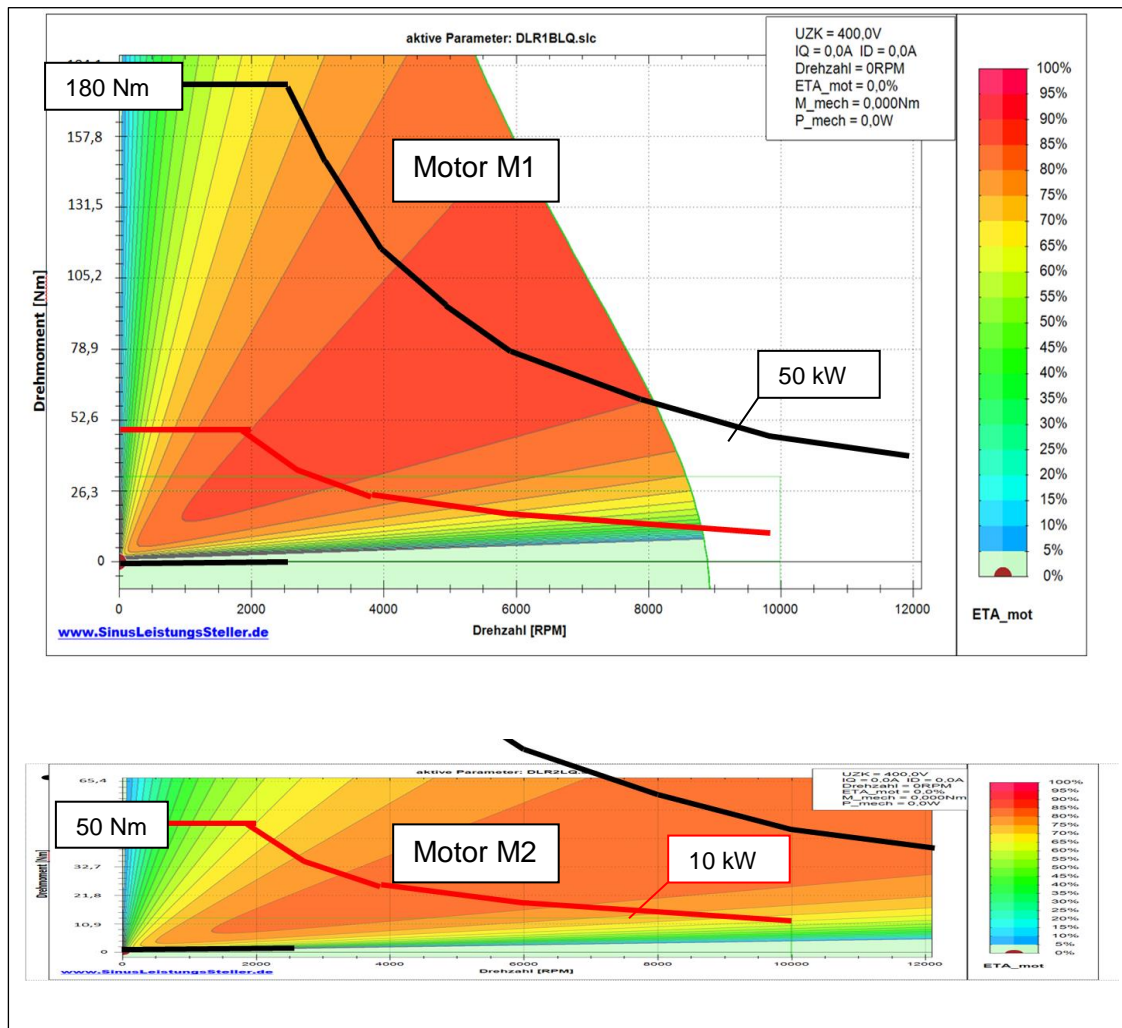


Abbildung 102: Wirkungsgradkennfelder der beiden Motoren M1 (oben) und M2 (unten) aus Umrichter (Auslegung M1: schwarz, M2: rot)

Energieeinsparung

Für die Energieeinsparung gegenüber einem konventionellen Elektroantrieb wurden die in Kap II.1.2.1.2. beschriebenen vier Fahrzyklen herangezogen, der NEFZ, WLTC, S-La (regional) und La-Stuttgart (highway). Es zeigt sich, daß der Einspareffekt auf der Autobahn erwartungsgemäß relativ gering ist, wohingegen im realen Fahrzyklus, entsprechend dem WLTC oder auch dem individuellen S-La-Zyklus, Einsparungen von

1 (ohne Klimakreislauf) bis 2 Prozent (mit Klimakreislauf) mit den vorhandenen Elektromotoren erreichbar sind, siehe Abbildung 103. Es hängt naturgemäß stark vom Einsatzfall und der Motorauslegung ab, bei der weiteres Optimierungspotential besteht. Die Prüfstandumgebung erlaubt in der Zukunft die Untersuchung weiterer Motorauslegungen.

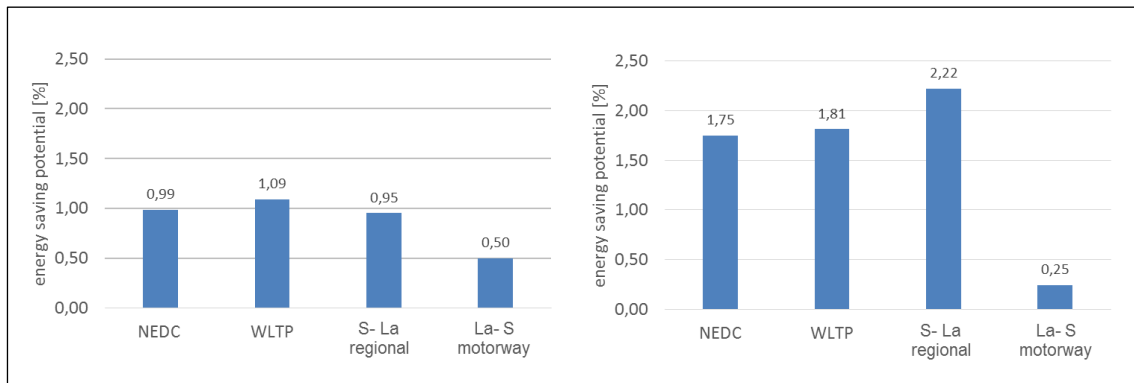


Abbildung 103: Energieeinsparpotential

Zusammenfassung

Ziel dieses Projektes war die Entwicklung einer integrierten Antriebseinheit aus zwei Elektromotoren und einem Klimakompressor für Elektrofahrzeuge, die es zum einen erlaubt, den Klimakompressor auch direkt von der Antriebsachse aus antreiben zu können und zum anderen die beiden Elektromotoren jeweils in ihrem besten Wirkungsgradbereich zum Antrieb des Fahrzeuges betreiben zu können. Mit diesem Antriebskonzept soll eine Gesamteffizienzsteigerung des elektrischen Fahrzeugantriebes gegenüber einem konventionellen Elektrofahrzeug-Antrieb um ca. 5 Prozent erreicht werden. Das Antriebssystem besteht aus zwei unterschiedlich groß dimensionierten elektrischen Maschinen auf einer Achse, die mit einer elektromagnetischen Kupplung verbunden werden können, einen am kleineren Motor ankuppelbaren Klimakompressor und zwei Umrichter zur Versorgung der beiden Maschinen.

Das Projekt startete am 01.01.2016 und endete nach einer bewilligten Projektverlängerung um 6 Monate am 30.06.2019. Es wurde im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt am Institut für Fahrzeugkonzepte in Stuttgart durchgeführt. Während der Projektlaufzeit zeigten die Firmen Ingenieurbüro Zimmermann aus



Waldbüttelbrunn sowie Kendrion aus Markdorf wirtschaftliches Interesse an der Zusammenarbeit für Komponentenentwicklungsarbeiten der Leistungselektronik und der elektromagnetischen Kupplung. Um die Ergebnisse in der Industrie bekannt zu machen, wurde das Projekt vom Projektausschuß Mobile Elektrifizierte Antriebssysteme (MEA) der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) begleitet.

Der Two in One Motor wurde für ein kleines modulares Stadtfahrzeug ausgelegt und kann (mit der dort festgelegten Baugröße) auch in einen Smart Electric Drive eingebaut werden. Die **Antriebsleistung liegt bei maximal 60 kW**, aufgeteilt in 50 kW für den größeren und 10 kW für den kleineren der beiden Motoren. Mit **50 kW können 97%** der zum Fahren benötigten Leistungsanforderungen abgedeckt werden, 60 kW sind für die restlichen 3% nötig. Die elektrischen Maschinen sind wassergekühlte einzelzahnbewickelte permanentmagnetisch erregte Synchronmaschinen, der Klimakompressor ist ein Flügelzellenverdichter. Die Leistungselektronik ist in SiC-Technologie aufgebaut.

Die Energieeinsparung beim Nutzen des TIOM-Systems ohne Klimatisierungsanforderung liegt bei wenigen Prozent (1% im WLTC). Das **Einsparpotential mit Klimatisierung liegt bei ca. 3%** bei Überlandfahrt. Es hängt stark vom Einsatzfall und der Motorauslegung ab, ist eher gering bei konstanter Autobahnfahrt und höher bei Stadt- und Überlandfahrt. Es besteht weiteres Optimierungspotential.

Für die Untersuchung weiterer Anwendungsfälle stehen ein **Simulationmodell und eine Prüfstandumgebung** bereit.

Das Two-In-One-Motor-Konzept bietet **Optionen für Antriebsaufgaben im Nutzfahrzeugbereich**, wo Hilfsaggregate (z.B. Kehrgeräte, Hydraulikpumpen o.ä.) während der Arbeitsphase bei kleiner Fahr-Antriebsleistung angetrieben werden, beim Fahren außerhalb der Arbeitsphase aber größere Antriebsleistungen benötigt werden. Man kann beide Motoren gemeinsam zum Fahren und getrennt während der Arbeitsphasen nutzen.

II.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Gegenüber der ursprüngliche Kosten- und Zeitplanung gab es innerhalb des Projektverlaufs geringe Abweichungen bzw. Verschiebungen, was die Anfertigung der Bauteile und die entsprechenden Abrechnungen betrifft. Die Abweichungen wurden in den jährlichen Zwischenberichten erläutert und führten zu einer kostenneutralen Verlängerung des Projektes um ein halbes Jahr. Das Projektbudget wurde eingehalten.

II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Ausgehend von der Grundfragestellung, wie man einen Fahrzeugantrieb in seiner Effizienz optimieren kann, d.h., seine spezifischen Nachteile vermeiden und durch vorteilhafte andere Technologien oder Betriebsstrategien verbessern kann, war der Gedanke zielführend, zwei unterschiedlich ausgelegte Elektromotoren zu einer Einheit zusammensetzen. Dies entspricht der Technologie des Hybridantriebs, bei dem die Eigenschaften des Verbrennungsmotors (hohe Energiedichte des Energieträgers, aber schlechter Wirkungsgrad im Teillastbetrieb) durch die Eigenschaften des Elektroantriebs (hoher Gesamtwirkungsgrad, Rekuperationsfähigkeit bei allerdings geringer Energiedichte des elektrischen Speichers) vorteilhaft kombiniert wurden. Dementsprechende Vorgehensweisen gibt es ebenso bei der Kombination von Brennstoffzellen und Batterien oder auch bei der Kombination (oder Hybridisierung) unterschiedlicher Energiespeicher wie Batterien und Kondensatoren. Die Untersuchung der Kombinationen mehrerer Elektroantriebe im Sinne dieses Projektes war daher angemessen und mit einer gewissen Erfolgsaussicht verbunden. Da die großflächige Elektromobilität noch am Anfang steht, erscheint es hier notwendig, noch weitere Ausbaustufen und im Besonderen weitere Anwendungsfelder zu erforschen. Das ist auch dadurch begründet, daß sich durch den hohen Wirkungsgrad elektrischer Antriebe die individuelle des Einsatzzweckes entsprechende Leistungsanforderung direkt auf den Energieverbrauch auswirkt (beim Verbrennungsmotor ist der Unterschied im Energieverbrauch zwischen Teillast und Vollast nicht so deutlich) und jedes Fahrzeug (Straßenfahrzeuge, auch Nutzfahrzeuge) hier individuell optimiert werden kann. Die Arbeiten in diesem Projekt stellen auch eine Berechnungs- sowie eine Validierungsplattform für weitere Untersuchungen bereit.

II.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Fortschreibung des Verwertungsplans ist in der folgenden **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgelistet.

| Lfd. Nr. | Bezeichnung des Ergebnisses | Zeithorizont |
|----------|--|--|
| 1 | Spezifikation, Absprache mit Arbeitskreis FAT | Lastenheft und Pflichtenheft (Spezifikation) liegen seit 30.06.16 vor, ebenso FMEA und Erprobungsplan. Am 24.10.2016 zusammen mit FAT besprochen |
| 2 | Designdokumente | Zeichnungen liegen vor |
| 3 | Prüfbericht | In Arbeit |
| 4 | Abschlussbericht | Mitte 2019 |
| 5 | Systemauslegung/Auslegungs-Konzept für TIOM, | - Am 24.10.2016 zusammen mit FAT besprochen. - Veröffentlicht auf Konferenz EVER 17 in Monaco vom 11.-13.04.17. |
| 6 | Integrations-Konzept für LE in TIOM, nutzbar für alle Mitglieder des Arbeitskreises | - Am 26.10.2016 zusammen mit IBZ Ingenieurbüro Zimmermann besprochen. - Leistungselektronik in 2017 entwickelt. Zeichnungen und Hardware liegt vor. |
| 7 | Betriebsstrategie für TIOM, nutzbar für alle Mitglieder des Arbeitskreises | - Vortrag auf FAT – Arbeitsgruppentreffen über aktuellen Arbeitsstand am 08.03.17 und am 14.11.17. - Weitere Masterarbeit ab 01.03.18. - Vortrag auf FAT – Arbeitsgruppentreffen über aktuellen Arbeitsstand am 20.06.18 und am 21.01.19. |
| 8 | Modularitäts-Konzept für TIOM unters. Leistungsklassen (Skalierungs-konzept), nutzbar für alle Mitglieder des Arbeitskreises | - Vortrag auf FAT – Arbeitsgruppentreffen über aktuellen Arbeitsstand am 08.03.17 und am 14.11.17. - TIOM-Ausstellung zusammen mit Kupplungshersteller Fa. Kendrion auf Messe Control in Stuttgart Ende Februar 2018. Weiterer Anwendungsbereich: Nfz, Busse. - Vortrag auf FAT – Arbeitsgruppentreffen über aktuellen Arbeitsstand am 20.06.18 und am 21.01.19. - TIOM-Ausstellung zusammen mit Kupplungshersteller Fa. Kendrion auf Messe IAA Nutzfahrzeuge 2018 in Hannover September 2018. Weiterer Anwendungsbereich: Nfz, Busse |

| Lfd. Nr. | Bezeichnung des Ergebnisses | Zeithorizont |
|----------|---|--|
| 9 | Leistungselektronik mit hoher Leistungsdichte | In Produktportfolio des Herstellers übernommen |
| 10 | Berechnungstool | Nutzbar für weitere Anwendungen |
| 11 | Testumgebung | Nutzbar für weitere Untersuchungen |

Tabelle 10: Verwertungsplan

II.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Gegenüber den Ausführungen zu Beginn der Arbeiten gibt es keine neuen wettbewerblichen Aktivitäten. Bekannt waren und sind noch (Abbildung 104):

- Doppel e-Antrieb der TU Darmstadt:
- Speed2E-Konzept der Universität Darmstadt:
- ZEOS-Doppelmotor-Antrieb der Universität Chemnitz:

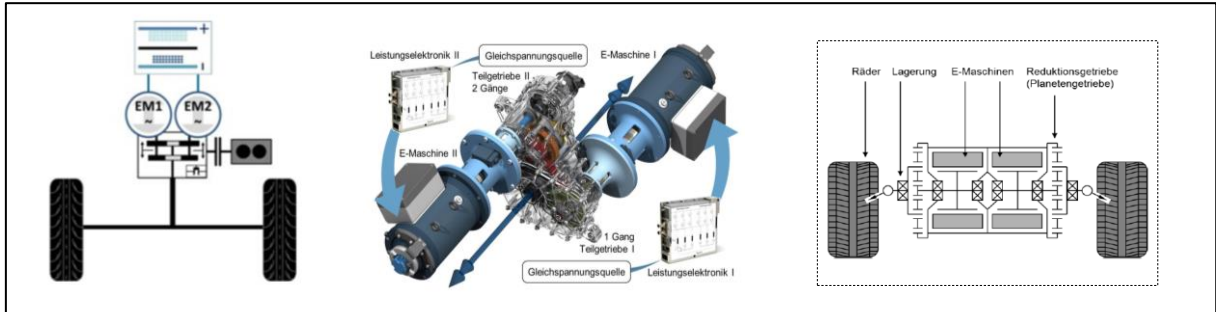


Abbildung 104: Ähnliche Arbeiten an anderer Stelle, von links nach rechts: Doppel-e-Antrieb; Speed2E-Konzept; ZEOS

Das TIOM-Konzept unterscheidet sich davon durch die Verwendung zweier unterschiedlich großer Elektromaschinen, von denen eine auch zum Antrieb des Klimakompressors genutzt werden kann.

II.6. Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.

II.6.1. Erfolgte Veröffentlichungen

[6] Hubner, Markus und Schier, Michael und Kevlishvili, Nina und Dietz, Armin und Hörlin, Sebastian (2017) Methodical approach for designing electric propulsion systems containing two motors. International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies EVER 17, 11.-13. Apr. 2017, Monte Carlo, Monaco

[7] Sigle, Sebastian und Schier, Michael (2019): Potential of a Two Motor Concept for Electric Vehicles with Respect to its Integration with the Air Conditioning Unit, Electric Vehicles International Conference & Show EV2019, 02.-03.Oct. 2019, Bukarest, Romania, 2019

II.6.2. Geplante Veröffentlichungen

[8] Schier, Michael (2019): Two In One Motor (TIOM) to increase the Efficiency of Electric Vehicles, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Projektausschuß Mobile Elektrifizierte Antriebssysteme, Informationstagung 05.12.2019, Würzburg

[9] Schier, Michael und Fabius, Epple und Maaoui, Aicha und Weber, Michael und Dietz, Armin und Zimmermann, Rolf (2020): Development of a double motor system as a new vehicle energy concept for Next Generation Car, Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies EVER 20, 28.-29. May. 2020, Monte Carlo, Monaco

[10] Schier, Michael und Fabius, Epple und Maaoui, Aicha und Weber, Michael und Dietz, Armin und Zimmermann, Rolf (2020): Energy Saving Potential of Two Motor Concepts with integrated Air Conditioning Unit, speedam 2020 symposia, 24.-25. Jun. 2020, Sorrento, Italy

Berichtsblatt

| | |
|---|--|
| 1. ISBN oder ISSN geplant | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlußbericht |
| 3. Titel TIOM Two-In-One-Motor | |
| 4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Schier, Michael Eppe, Fabius | 5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.19 |
| | 6. Veröffentlichungsdatum 31.12.19 |
| | 7. Form der Publikation |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Fahrzeugkonzepte Pfaffenwaldring 38-40 70569 Stuttgart | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution |
| | 10. Förderkennzeichen 01MY15005 |
| | 11. Seitenzahl 105 |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn | 13. Literaturangaben 10 |
| | 14. Tabellen 10 |
| | 15. Abbildungen 104 |
| 16. Zusätzliche Angaben | |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Schier, Michael (2019): Two In One Motor (TIOM) to increase the Efficiency of Electric Vehicles, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Projektausschuß Mobile Elektrifizierte Antriebssysteme, Informationstagung 05.12.2019, Würzburg | |
| 18. Kurzfassung Basierend auf früheren Arbeiten hat ein Two-in-One-Motor-Konzept (TIOM) inklusive eines Klimakompressors das Potenzial, die Effizienz elektrisch angetriebener Fahrzeuge zu erhöhen, indem gleichzeitig die Gesamtanzahl der Teile reduziert wird. Die Gesamtenergieeinsparung von ca. 2 % resultiert aus zwei Effekten, zum einen durch das Wechseln zwischen den beiden Motoren und dem Betrieb in ihren jeweils besten Arbeitspunkten zum Fahren und zum anderen durch die Nutzung und Weiterleitung eines Teils der kinetischen Energie des Fahrzeugs während des Bremsens direkt an den Klimakompressor. Der Bericht beschreibt die Entwicklung eines solchen Doppelmotorsystems, beginnend beim Antriebskonzept-Design, das von einem gewählten Fahrzeugkonzept abhängt und über die Simulation des Systems zum Design und schließlich zum Test des Gesamtsystems. | |
| 19. Schlagwörter Doppelmotorsystem, Effizienzsteigerung, | |
| 20. Verlag | 21. Preis |

Document Control Sheet

| | | |
|--|--|--|
| 1. ISBN or ISSN planed | 2. type of document (e.g. report, publication) Final Report | |
| 3. title TIOM Twi-In-One-Motor | | |
| 4. author(s) (family name, first name(s)) Schier, Michael Eppler, Fabian | 5. end of project 30.06.19 | |
| | 6. publication date 31.12.19 | |
| | 7. form of publication | |
| 8. performing organization(s) (name, address) German Aerospace Center Institute of Vehicle Concepts Pfaffenwaldring 38-40 70569 Stuttgart | 9. originator's report no. | |
| | 10. reference no. 01MY15005 | |
| | 11. no. of pages 105 | |
| 12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn | 13. no. of references 10 | |
| | 14. no. of tables 10 | |
| | 15. no. of figures 104 | |
| 16. supplementary notes | | |
| 17. presented at (title, place, date) Schier, Michael (2019): Two In One Motor (TIOM) to increase the Efficiency of Electric Vehicles, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Projektausschuß Mobile Elektrifizierte Antriebssysteme, Informationstagung 05.12.2019, Würzburg | | |
| 18. abstract Based on previous work a two-in-one-motor concept (TIOM) including an air conditioning compressor has the potential to increase the efficiency of electric driven vehicles by simultaneously reducing the total number of parts. The total energy saving results from two effects, switching between the two motors and operating them in their each best working points in addition of leading a part of the kinetic energy of the vehicle directly to the air conditioning compressor during recuperation events. The report describes the development of such a double motor system including the air conditioning compressor coming from the drive concept design which depends on a chosen vehicle concept and leading over simulation of the system to the design and finally to the test of the total system. | | |
| 19. keywords Double motor systems, increasing of efficiency | | |
| 20. publisher | 21. price | |