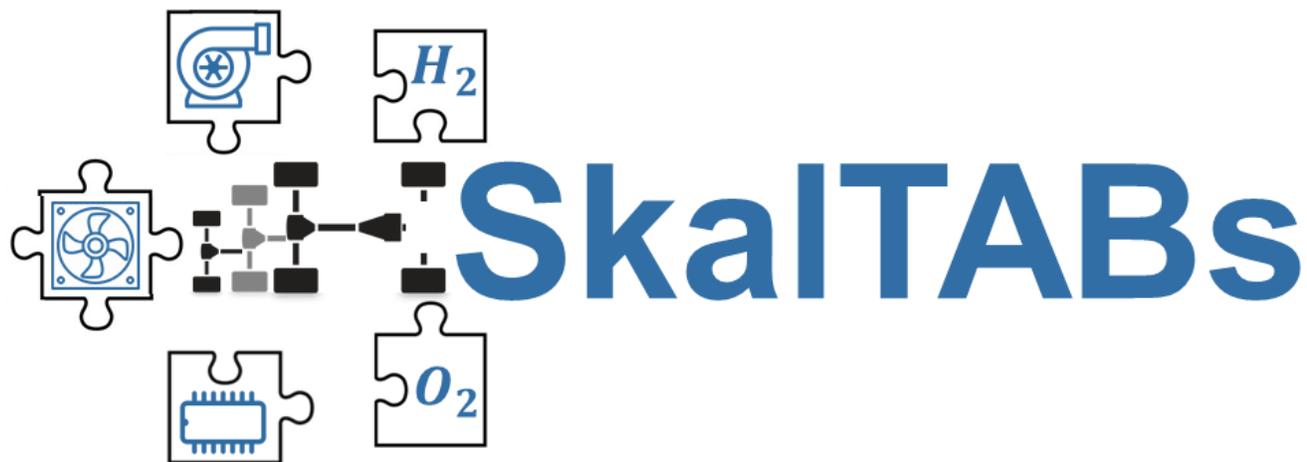




Deutschland GmbH



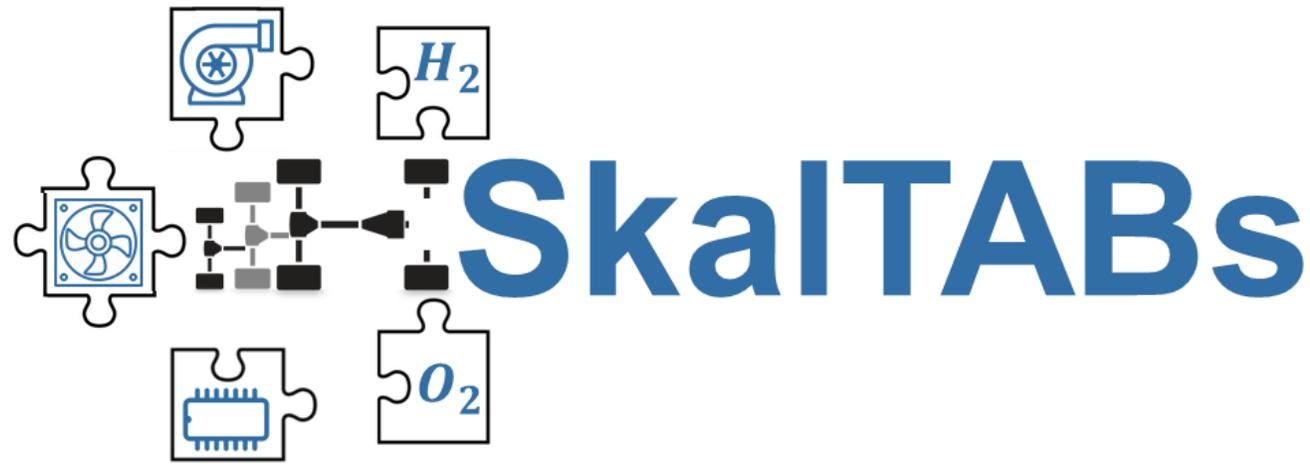
Software and Functions GmbH



Skalierbares Thermomanagement und Antriebsstrang für Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge

Projektlaufzeit: August 2021 – Juli 2024





Skalierbares Thermomanagement und Antriebsstrang für Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge

Themengebiete- GreenIng

- Koordination und Informationsaustausch mit dem Industrieberaterkreis
- Erarbeitung und Detaillierung des Skalierungskonzepts anhand der Anforderungen
- Erforschung skalierbares FC-System, Thermomanagement und Stützbatterie
- Entwicklung der Steuerung des FC-Systems
- Entwicklung, Aufbau, Inbetriebnahme und Demonstration eines Prüfstands für das skalierbare FC-System

Projektziele

Ziele aus dem Projekt und förderpolitische Ziele

Erforschung und Demonstration von skalierbaren Brennstoffzellen-Systemen für Nutz- und Sonderfahrzeuge

Shortfacts: 3 Jahre Laufzeit / Start am 01.08.2021 / 7,8 mio. € Projektvolumen / 4,8 mio. € Fördervolumen

- Erhöhung der Reichweite bzw. Nutzdauer von Brennstoffzellen-Nfz im Vergleich zu BEV
- Erhöhung der Effizienz des Brennstoffzellensystems und des Antriebs durch effiziente Komponenten und ein intelligentes Thermomanagement
- Senkung der TCO („Total Cost of Ownership“) durch den skalierbaren / modularen Ansatz
 - Erreichung einer höheren Marktdurchdringung durch die Reduzierung der Investitionskosten – auch gerade für mittelständische Nutzfahrzeughersteller
 - Verringerung der Lärm- und Schadstoffemission – gerade im Blick auf kommunale Nfz und Verteilerverkehr
 - Einbindung und übergreifende Vernetzung von führenden Wirtschaftsunternehmen, KMU und Forschungsinstituten
 - Stärkung des Wirtschaftsstandorts Deutschland

Projektstruktur

Arbeitspakete und Inhalte

AP1: Anforderungen an ein Skalierbares Thermomanagement und den Powertrain von Brennstoffzellen-Nfz

- Arbeitskreis Hersteller und Partner
- Use-Case und Fahrzeuganforderungen
- Thermomanagementanforderungen
- Skalierungskonzept
- Erste Komponentenspezifikation

AP2: Ganzheitliche Architekturen des Thermomanagements und Powertrains für Brennstoffzellen-Nfz

- Skalierbare Thermomanagement- und Powertrain Architektur
- Simulative Bewertung, Konzeptauswahl und Detaillierung Komponentenanforderungen

AP3: Erforschung skalierbares Brennstoffzellenlayout, Peripherie und Steuerung

- Skalierbares Brennstoffzellenlayout
- Skalierbares Thermomanagement
- Skalierbarer Wasserstoff- und Luftpfad
- Brennstoffzellen Überwachung und Steuerung

AP4: Komponentenerforschung für den skalierbaren Powertrain

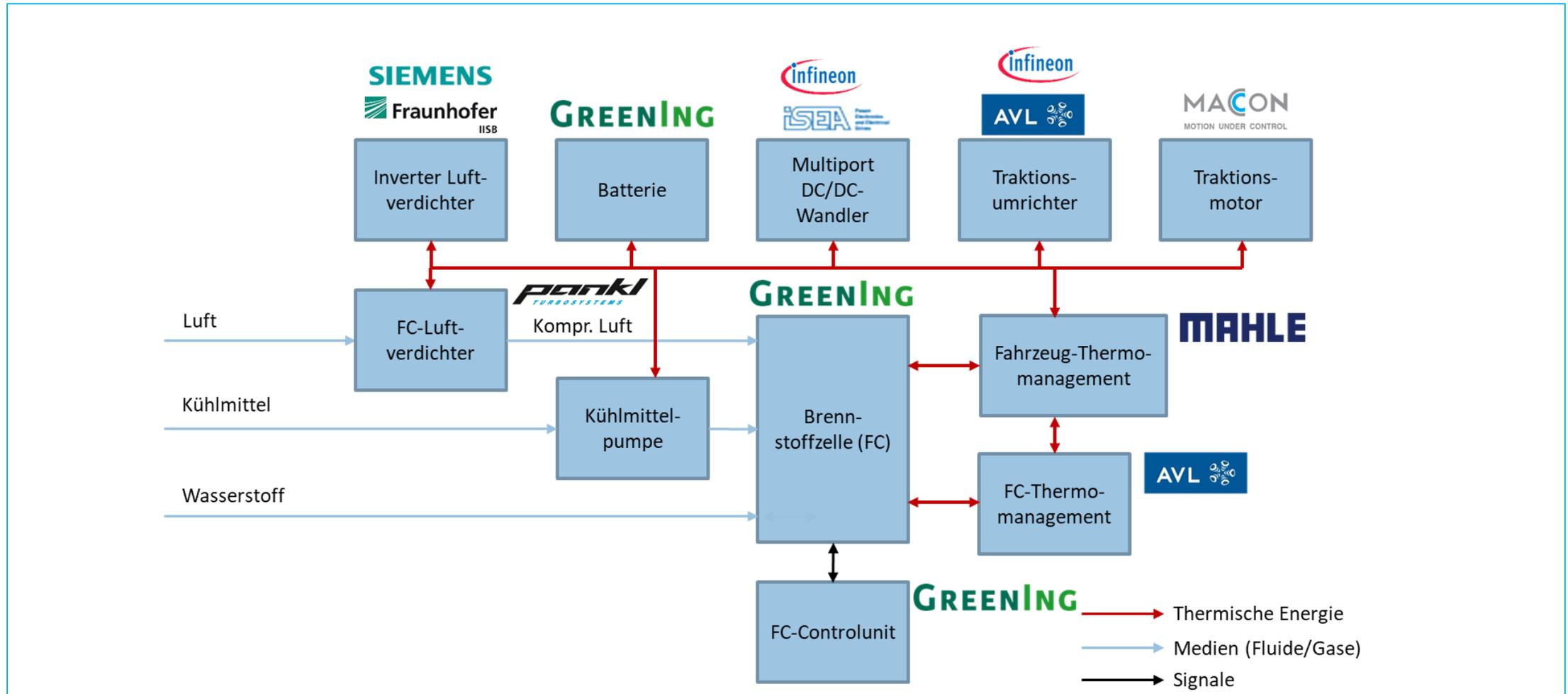
- Multiport-DC/DC-Wandler
- Traktionsmotor inkl. LE
- Stützbatterie
- Bipolarplatte
- Thermomanagement und Modulbildung

AP5: Demonstration und Validierung

- Konzipierung und Aufbau der Prüfstände für Charakterisierung und Demonstration
- Betrieb Prüfstände, Charakterisierung und Abgleich mit Simulationsmodellen

Projektstruktur

Zuordnung von Partnern und Komponenten oder Teilsystemen



Ermittlung der Ziel-Use-Case

Anforderungen an skalierbares Thermomanagement und Powertrain von Brennstoffzellen-Nfz

- Informationsaustausch mit Arbeits- und Beraterkreis aus Fahrzeugherstellern und Partnern
- Definition der Use-Case und Ableitung der Fahrzeuganforderungen
- Anforderungen an das Fahrzeugthermomanagement und den Powertrain
- Erstellung des Skalierungskonzepts
 - Leistungsanforderungen
 - Spannungslage HV-Systeme
 - Reichweite / Nutzdauer
- Erstellung erster Komponentenspezifikationen

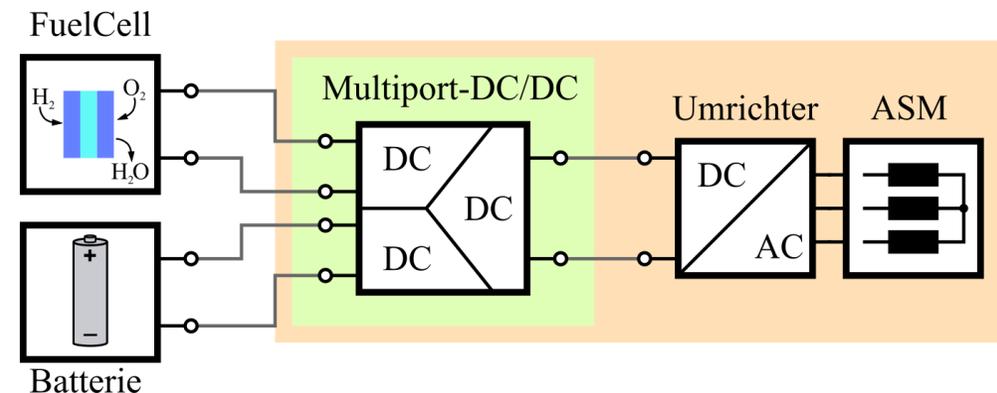


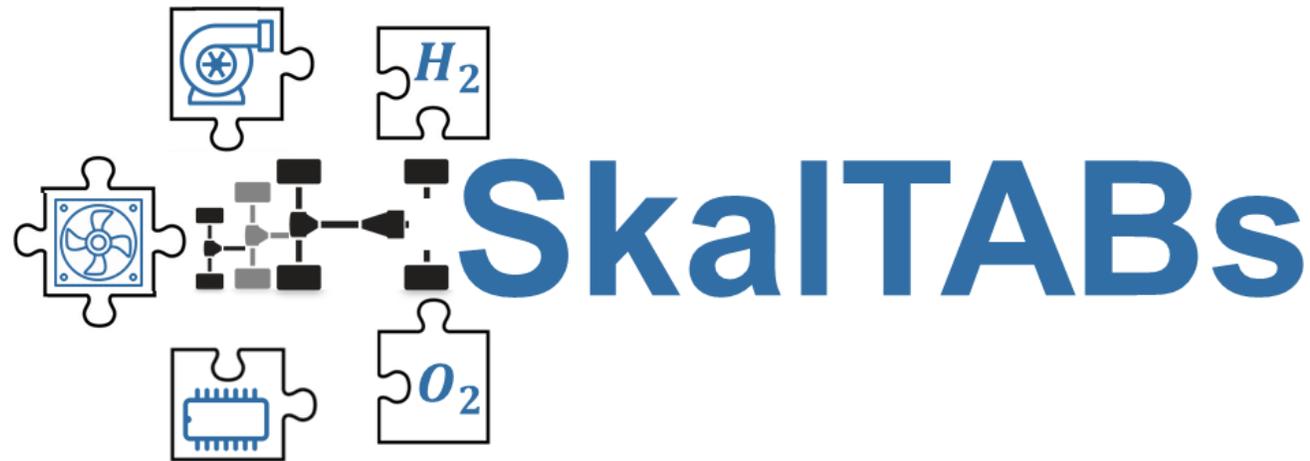
Multiport DC/DC-Wandler

Zentrale Komponente des Energiemanagements

- Multiport DC/DC-Wandler
 - Bindeglied zwischen Energiespeicher und Umrichter/Maschine
 - Aufteilung des Leistungsflusses auf Batterie und Brennstoffzelle
 - Berücksichtigung der jeweiligen Anforderungen (uni-/bidirektional, Trägheit, ...)

- Erforschung skalierbarer Wandlerkonzepte
 - Definition Anforderungen: Spannungslevel, max. Strom/Leistung, Skalierbarkeit, ...
 - Auswahl der jeweiligen Technologie (individuell für jeden Port)





Skalierbares Thermomanagement und Antriebsstrang
für Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge

Themengebiete – AVL Deutschland

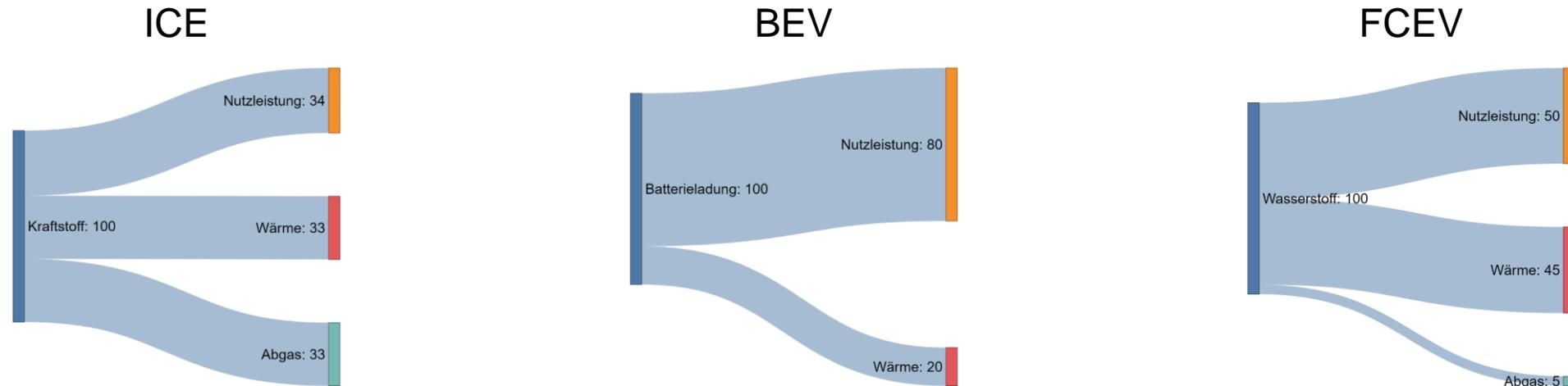
- Aufbau einer ganzheitlichen skalierbaren Thermomanagement-Architektur
- Erstellung von 3D CFD und 1D Simulationsmodellen
- Konzeptauswahl Thermomanagement
- Erarbeitung skalierbares Brennstoffzellenlayout und Thermomanagement
- Konzeption Komponenten- und Systemprüfstände
- Aufbau Komponenten- und Systemprüfstände

M. Eng. Andreas Raab, AVL Deutschland GmbH

Arbeitspaket AVL

Skalierbare Thermomanagement - Architektur

Grobe Aufteilung der Energieflüsse bei verschiedenen Fahrzeug-Architekturen



+ Hohes Temperaturniveau (100 – 120 °C) im Kühlmittel
+ Wärme wird über Kühlsystem und Abgas abgegeben

+ niedriger Anteil an Abwärme
- Niedriges Temperaturniveau (30 – 40 °C) im Kühlmittel
- Wärme wird nur über das Kühlsystem abgegeben

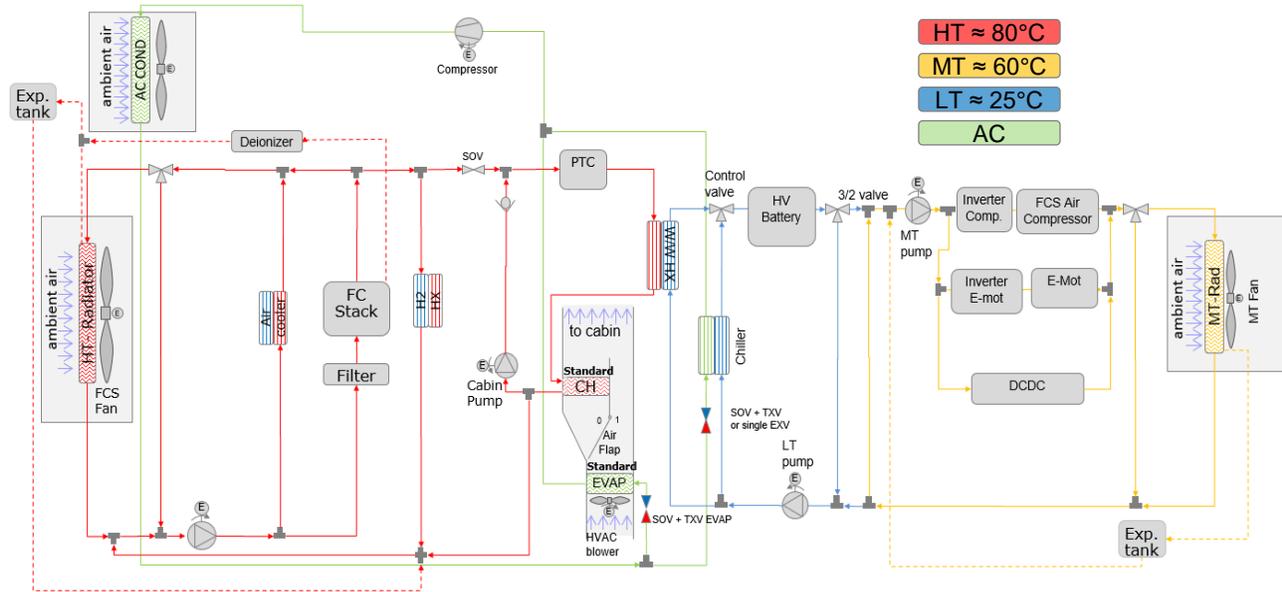
- mittleres Temperaturniveau (80 – 90 °C) im Kühlmittel
- Wärme wird nur über das Kühlsystem abgegeben

=> Herausforderung FCEV - Hohe Abwärme bei niedrigen Temperaturniveau

Arbeitspaket AVL

Skalierbare Thermomanagement - Architektur

Systemschaubild Kühl- u. Kältekreisläufe



Komponenten haben verschiedene Anforderungen an die Kühlmitteltemperatur

Hochtemperaturkreislauf:

- Kabinen Wärmeübertrager
- Brennstoffzelle

Mitteltemperaturkreislauf:

- Elektrische Antriebskomponenten
- Leistungselektronik

Niedrigtemperaturkreislauf:

- HV-Batterie

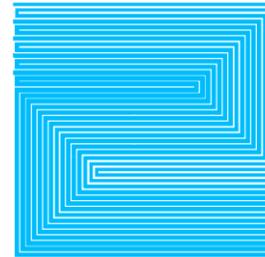
Arbeitspaket AVL

Skalierbare Thermomanagement - Architektur

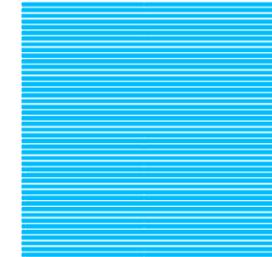
Anforderungen PEMFCs:

- Wärmeabfuhr
- Vermeidung von lokalen Hotspots
- Bauteilschutz
- homogene elektrochemische Reaktionen

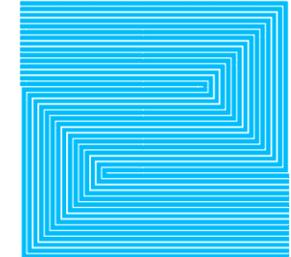
Geometrie 1



Geometrie 2

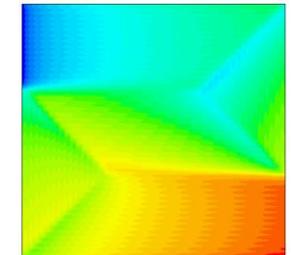
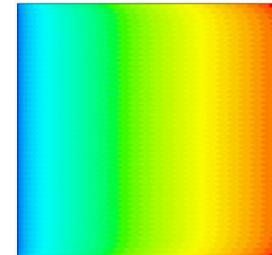
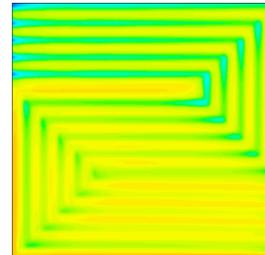


Geometrie 3



Anforderungen Flowfield

- Gleichverteilung Temperatur
- Druckverluste
- Wärmeübergang
- Herstellungskosten



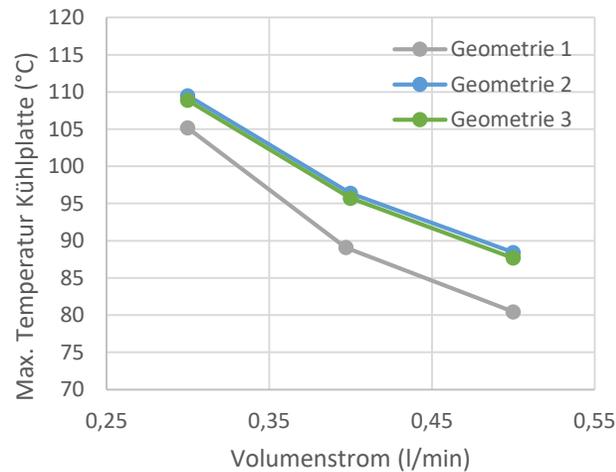
Quelle Geometrie Untersuchung:

„A numerical study on uniform cooling of large-scale PEMFCs with different coolant flow field designs“, S.M. Baek et al. Appl. Therm. Eng., 31 (8) (2011), pp. 1427-1434

Arbeitspaket AVL

Skalierbare Thermomanagement - Architektur

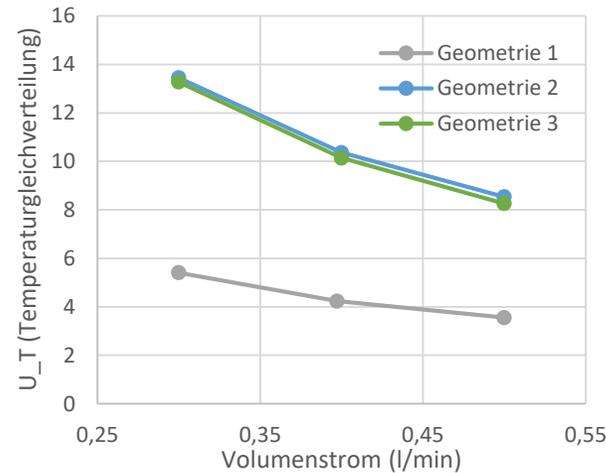
Maximale Temperatur der Kühlplatte



lokale Hotspots

> niedrigste lokale Temperaturen bei Geometrie 1

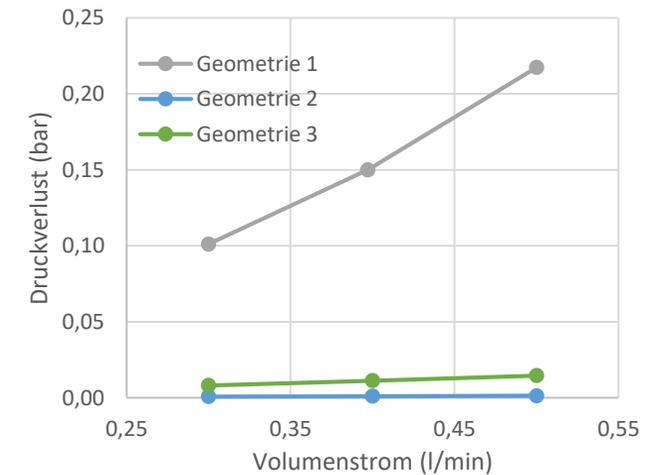
Temperaturgleichverteilung der Kühlplatte



Temperatur Gleichverteilung

> geringste Abweichung der Gleichverteilung bei Geometrie 1

Druckverluste der Kühlplatte



Relevant für Gesamtdruckverlust

> höchster Druckverlust bei Geometrie 1

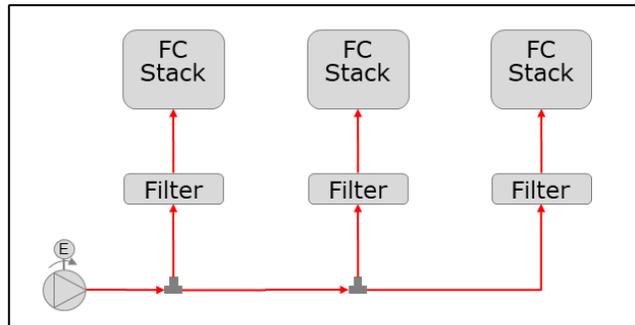
Arbeitspaket AVL

Skalierbare Thermomanagement - Architektur

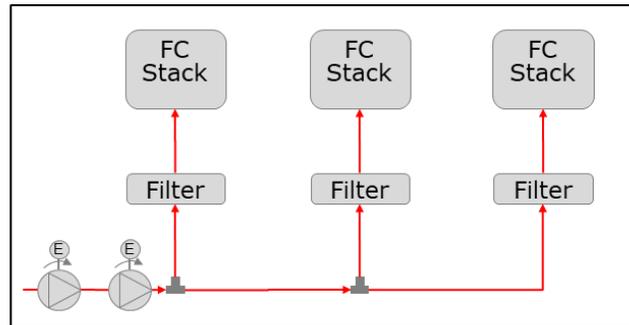
Skalierbarkeit: Beispiel Pumpe

- Thermalsystem soll für verschiedene Leistungsklassen skalierbar sein.
- Zur Darstellung der Skalierung sind verschiedene Ansätze mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen möglich.

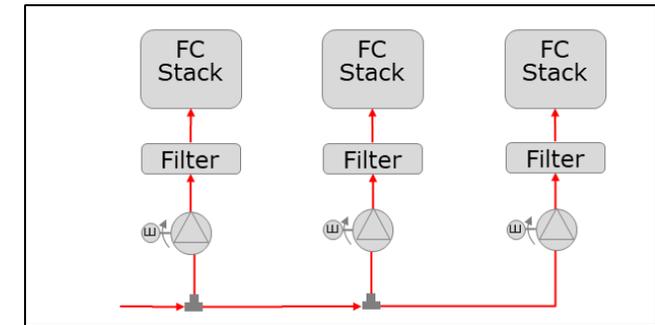
Auslegung Pumpe nach Bedarf



Skalierung durch Reihenschaltung



Auslegung Pumpe je Stack



Die Auswahl einer Skalierungsstrategie hat Einfluss auf folgende Größen:

- Bauraum
- Kosten
- Funktion (Regelung)

Arbeitspaket AVL

Skalierbare Thermomanagement - Architektur

Skalierungsprinzip muss auf weitere Komponenten erweitert werden:

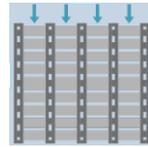
- Brennstoffzelle



- Lüfter



- Wärmeübertrager



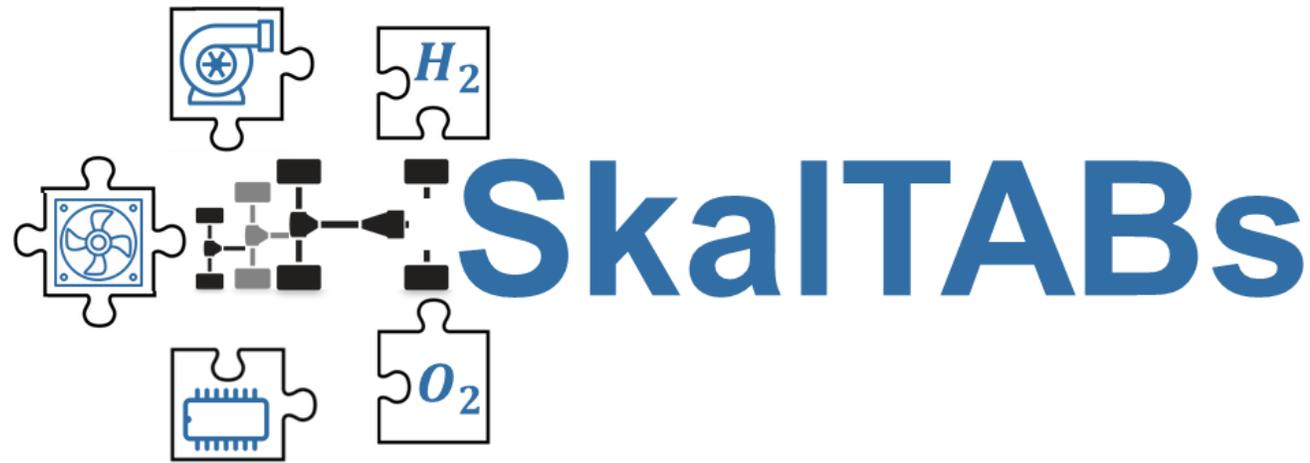
- Batterie



- Leistungselektronik



- ...



Skalierbares Thermomanagement und Antriebsstrang für Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge

Themengebiete- MACCON

- Entwicklung eines Elektromotor-Konzepts für Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzelle
 - Elektromagnetische Auslegung des Elektromotors nach definierten Requirements
 - Thermische Auslegung des Elektromotors nach definierten Requirements
 - Optimierung der Leistungsdichte
 - Optimierung Wicklung und Verschaltung bezüglich Teilentladungen
 - Optimierung Isolation bezüglich Teilentladungen
- Aufbau eines Testmotors für TE Messungen

Traktionsmotoren: Entwicklungshistorie bei MACCON



Automotive

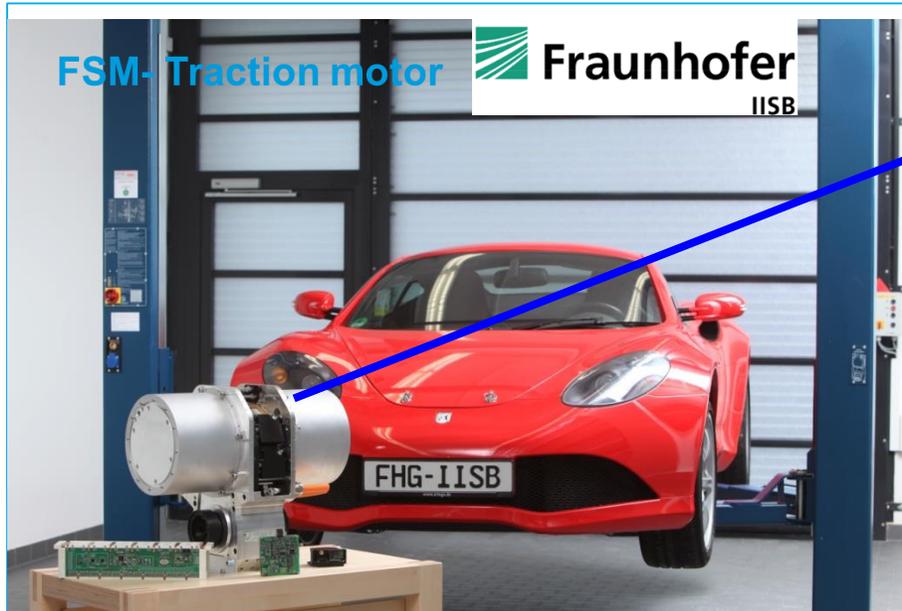


Projektziele

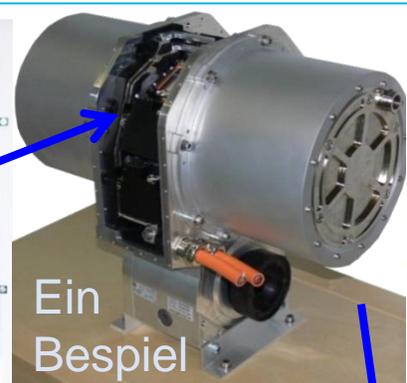
Besondere Herausforderungen des Traktionsmotoren- Design

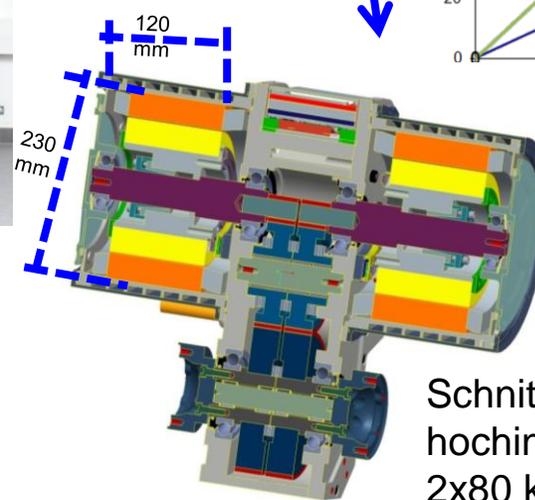
FSM- Traction motor



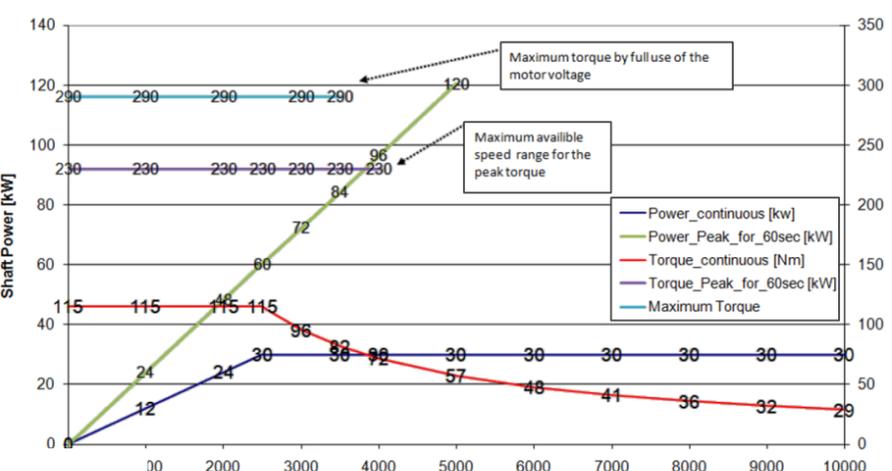


Ein Beispiel

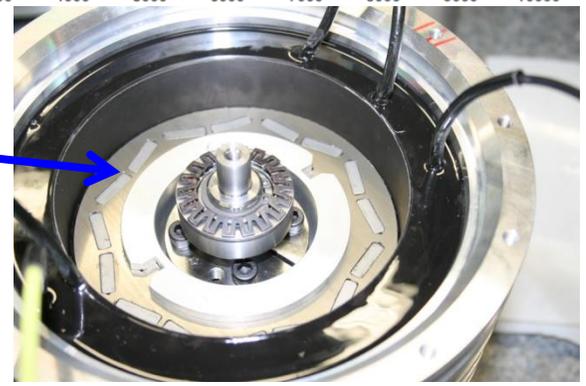




Schnitt der hochintegrierten 2x80 kW Antriebsaggregat



RPM	Power_continuous [kW]	Power_Peak_for_60sec [kW]	Torque_continuous [Nm]	Torque_Peak_for_60sec [Nm]	Maximum Torque [Nm]
0	0	0	0	0	0
1000	12	24	115	115	290
2000	24	48	115	115	290
3000	30	72	96	115	290
4000	30	96	84	96	290
5000	30	120	57	96	290
6000	30	-	48	96	290
7000	30	-	41	96	290
8000	30	-	36	96	290
9000	30	-	32	96	290
10000	30	-	29	96	290



- Design muss extrem robust sein
- Leistungsdichte maximal
- Kennfeld / Wirkungsgrad optimieren
- Hohe Zuverlässigkeit
- Kosten- Effizienz
- Hohe Umgebungstemperatur

Traktionsmotoren:

Skalierungsbereiche der Traktionsmotoren im SkaITABS- Projekt

30kW → kleine Kommunalfahrzeuge



90kW → mittlere Kommunalfahrzeuge



180kW → Löschaufbauten und große Kommunalfahrzeuge



270kW → Pistenbulli, Hafen-/Flughafenschlepper



Traktionsmotoren:

Design- Ansätze zur Optimierung des Skalierungskonzepts (global)

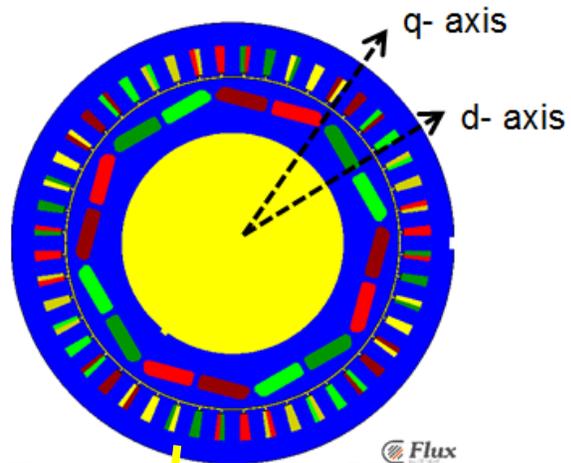
Globale Optimierungsziele:

- Möglichst lineares skalierbares Motorkonzept für den gesamten Leistungsbereich (~ 30 - 270kW)
- Möglichst viel Gleichteile und ein sehr ressourcen- schonendes Konzept
- Wirkungsgrad für Kennfeldbereich zwischen: Getriebe + Motor + Leistungselektronik → optimieren
- Mechanische + Thermische Belastung durch Umgebungsbedingungen sehr hoch
- Belastung des Isoliersystems hoch: 800VDC am DC-DC- MPW / SiC Umrichter: hohe Schaltflanken



Traktionsmotoren:

Design- Ansätze zur Optimierung des Skalierungskonzepts (insbesondere Rotor)

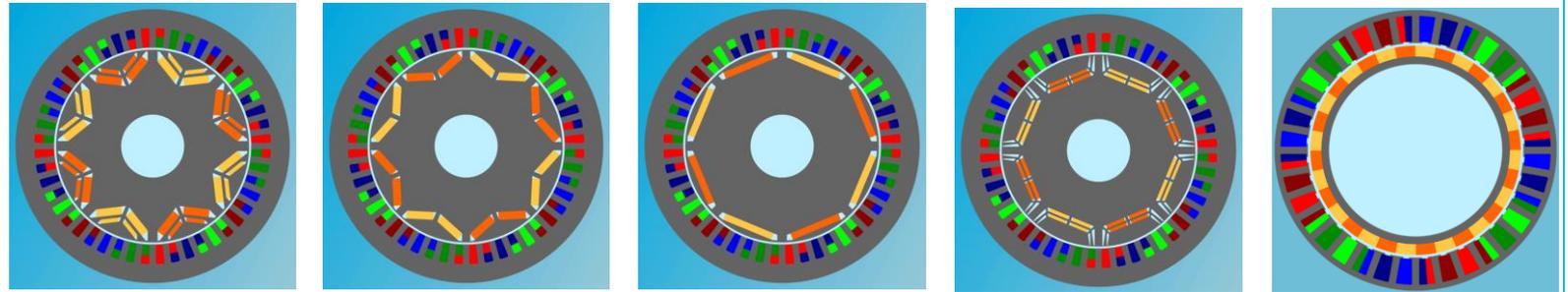
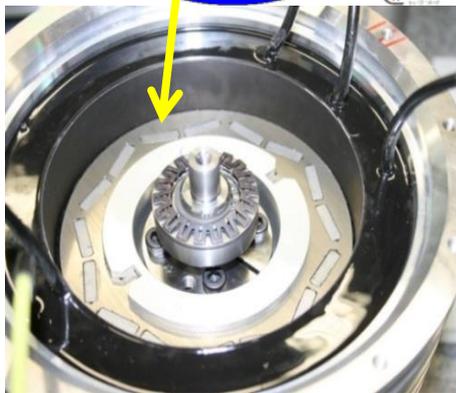
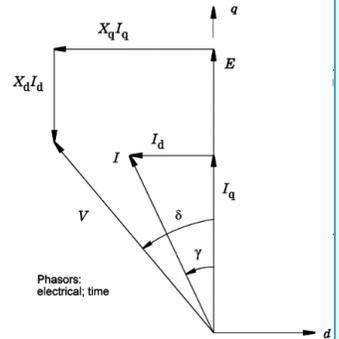


$$T_{mag} = m \cdot p \cdot (\Psi_d \cdot I_q - \Psi_q \cdot I_d) = m \cdot p \cdot [\Psi_{1Md} \cdot I_q + I_d \cdot I_q \cdot (L_d - L_q)]$$

Induktivitäten sind abhängig vom I_d, I_q - Strom:
 $\rightarrow L_d, L_q = f(I_d, I_q, \Psi_{1Md})$ $L_q > L_d,$

Optimierungsziele- bezogen auf die Traktionskennlinie durch besondere Ansätze im Rotordesign:

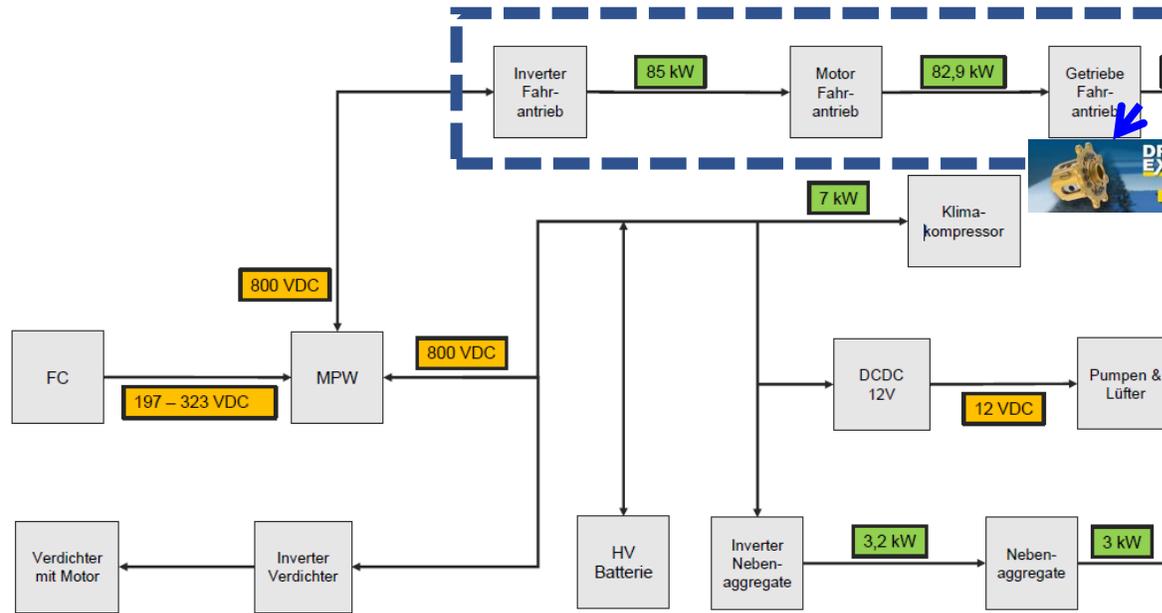
- Magnetkonfiguration : Feldschwächung optimal
- Hohe Drehzahlfestigkeit
- Möglichst geringe Magnetmasse
- Hohe mechanische Festigkeit



Traktionsmotoren:

Optimierung des Skalierungskonzepts im Gesamtkennfeld

Energiefluss Transportfahrt: 43 km/h, 9% Steigung GREENING



90kW → mittleres Kommunalfahrzeug

Optimierung- mit Bezug auf Kennfeld:

- Auswahl Getriebeübersetzung
- Motorstrom minimieren (\cos_{ϕ} ↑)
- Betriebsauswahl: möglichst hohe Leistungsbereiche
- Effizienz- Optimiert

SkalTABs- Modellierungsansatz : Getriebe + Motor + Umrichter

Parameter Anzeige/Ausgaben Kommentar

Statorwiderstand [Ohm] Anzeigen

Polpaarzahl [f]

Trägheitsmoment [kg m²]

Projekt- Pfad

Anfangswerte

Statorstrom Phase 1 [A]

Statorstrom Phase 2 [A]

Drehzahl [1/min]

Rotorwinkel [rad]

[Main]
 $Formula_Psid = 0.000020058862 * Id - 0.0000019232512 * Iq + 6.1723587e-11 * Id * Iq^2 - 6.5787805e-11 * Id^2 * Iq - 6.9097753e-13 * Id * Iq^3 - 1.3672217e-13 * Id^3 * Iq + 1.2657636e-15 * Id * Iq^4 - 6.4997574e-17 * Id^4 * Iq - 3.2331781e-19 * Id * Iq^5 + 6.6150623e-20 * Id^5 * Iq + 6.7945076e-9 * Id^2 - 4.9406279e-11 * Id^3 - 2.5680122e-13 * Id^4 - 4.6533128e-16 * Id^5 - 2.9339436e-19 * Id^6 + 0.00000050514107 * Iq^2 - 1.1927221e-10 * Iq^3 - 3.687927e-13 * Iq^4 + 1.4478739e-15 * Iq^5 - 1.2188546e-18 * Iq^6 - 1.0150562e-13 * Id^2 * Iq^2 - 1.7765066e-16 * Id^2 * Iq^3 - 8.5030348e-17 * Id^3 * Iq^2 + 1.1099442e-18 * Id^2 * Iq^4 + 7.2762837e-19 * Id^3 * Iq^3 + 2.4649214e-19 * Id^4 * Iq^2 - 0.000000011587398 * Id * Iq + 0.0076835472$
 $Formula_Psiq = 0.000064338035 * Iq - 0.0000010691092 * Id + 2.1852478e-10 * Id * Iq^2 - 4.1715288e-11 * Id^2 * Iq - 3.5987537e-12 * Id * Iq^3 + 2.2726952e-14 * Id^3 * Iq + 9.8331121e-15 * Id * Iq^4 + 3.3007075e-16 * Id^4 * Iq - 7.7762398e-18 * Id * Iq^5 + 3.3499302e-19 * Id^5 * Iq - 0.000000016453757 * Id^2 - 2.0070695e-10 * Id^3 - 8.341848e-13 * Id^4 - 1.4642294e-15 * Id^5 - 9.2343002e-19 * Id^6 + 0.000000063036705 * Iq^2 - 1.2433772e-9 * Iq^3 + 3.4257366e-12 * Iq^4 - 3.5510981e-15 * Iq^5 + 1.1027433e-18 * Iq^6 + 1.067843e-13 * Id^2 * Iq^2 - 1.2281604e-15 * Id^2 * Iq^3 - 2.2236689e-17 * Id^3 * Iq^2 + 2.6011214e-18 * Id^2 * Iq^4 + 4.4801947e-19 * Id^3 * Iq^3 + 3.2307989e-20 * Id^4 * Iq^2 + 0.000000050554762 * Id * Iq + 0.00039048783$
 NumberOfCoefficients=0

Ableitung eines Ersatz- Motormodells : via Flussverkettungen im d/q- System

Make predictions

Label	Value	Min	Max
1 Mach Height	1.31171%		
2 Cap Height	0.330977%		
3 Hub Height	1.62405%		

Label	Sample	Min	Value	Sample	Max
1 Frequency_HK	3.7686739	112.16074	187.26392		
2 WkVfH_HK	3.0587851	911.12903	2287.2702		
3 Fatigue_HK	1.25e-05	0.0022824	0.0028752		

Stator-Flussverkettungen im rotorfesten Koordinatensystem

$$\Psi_{1d} = I_{1d} * L_{1d} + \Psi_{PM}$$

$$\Psi_{1q} = I_{1q} * L_{1q}$$

Spannungsgleichungen des Stators

$$V_{1d} = I_{1d} * R_1 + \frac{d(\Psi_{1d})}{dt} - Pole * \omega * \Psi_{1q}$$

$$V_{1q} = I_{1q} * R_1 + \frac{d(\Psi_{1q})}{dt} + Pole * \omega * \Psi_{1d}$$

Inneres Drehmoment

$$T_i = 1.5 * Pole * (\Psi_{1d} * I_{1q} - \Psi_{1q} * I_{1d})$$

Abgeleiteter / kompakter Regressionsterm
z.B. siebte Polynomordnung
zur Beschreibung des motorischen Verhaltens

Fit

- PSIQ_MEAN_LSR
- PSID_MEAN_LSR

Fit

0.013295202619652042+(-0.010697467277629857*var_1^1)+(-8.950545774792234e-06*var_1^2)+(1.3862731390705827e-06*var_1^3)+(9.699311592161421e-10*var_1^4)+(-7.550827489080651e-11*var_1^5)+(-2.5554708449463794e-14*var_1^6)+(1.3508958465608452e-15*var_1^7)

-0.004889274102251369+(-2.6804174143316975e-04*var_1^1)+(4.395358756482029e-06*var_1^2)+(8.575694393092441e-08*var_1^3)+(-5.872199071918761e-10*var_1^4)+(-6.56221783062804e-12*var_1^5)+(1.779321029106209e-14*var_1^6)+(1.394610857341266e-16*var_1^7)