

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ

*Untersuchung verschiedener Konzepte
für energieeffiziente Klimaanlage in
Elektrofahrzeugen*

Dipl.-Ing. Christoph Danzer

Dr.-Ing. Rico Baumgart

Prof. Dr.-Ing. Peter Tenberge

Tel: +49 (0) 371/531 - 38458

christoph.danzer@mb.tu-chemnitz.de



EINLEITUNG

Ziele

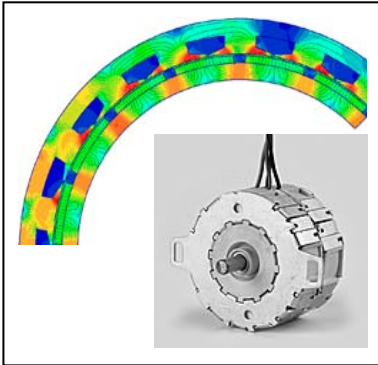
- **Entwicklung und Optimierung der Antriebsstränge von E-Fahrzeugen**
- **Einfluss verschiedener Optimierungsmaßnahmen auf die Reichweite**
 - ↳ **Untersuchung unterschiedlicher Getriebevarianten
z.B. 2 Gang / 3 Gang**
 - ↳ **Analyse verschiedener Schaltstrategien**
 - ↳ **Optimierung der Elektroantriebe**
 - ↳ **Optimierung der Klimaanlage**



MODELL E-FAHRZEUG

Geometrie- und prozessbasierte Simulationsmodelle

Elektromotor



Fahrzeug



Fahrer



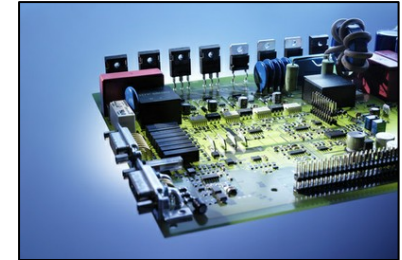
Batteriesystem



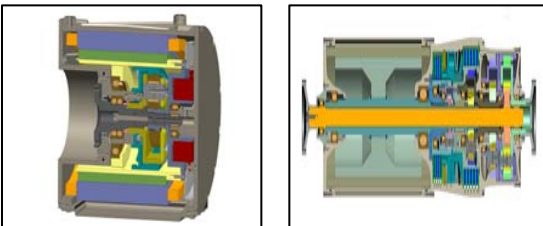
Antriebsstrang



Leistungselektronik



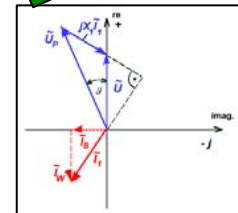
Getriebe: Ein- oder Mehrgang



Reifen



Regelung



Streckenprofil





MODELL E-FAHRZEUG

Geometrie- und prozessbasierte Simulationsmodelle

- **Modell zur Simulation des elektrischen Antriebszweiges**
 - ↳ **geometrie- und prozessbasierte Teilmodelle für**
 - **Permanenterregte Synchronmaschine mit Vektorstromregelung**
 - **Wechselrichter mit Konverter**
 - **Batterie**
 - **Getriebe**
 - **Reifen und Fahrzeug**
 - ↳ **Verbindung der Teilmodelle zu einem Gesamtmodell**
- **Abbildung der elektrischen Vorgänge und Kopplung mit dem Fahrzeugmodell über den simulierbaren Antriebsstrang**



MODELL E-FAHRZEUG

Modell permanenterregte Synchronmaschine

● Permanenterregte Synchronmaschine (PSM):

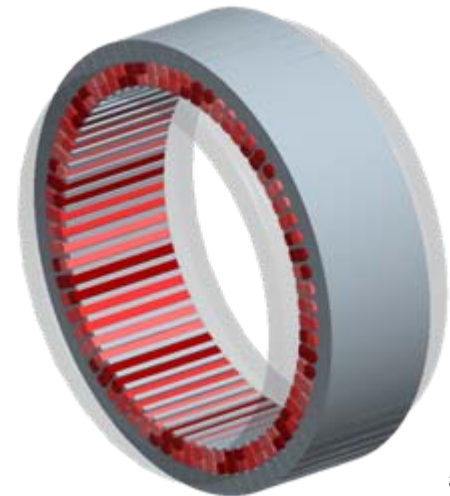
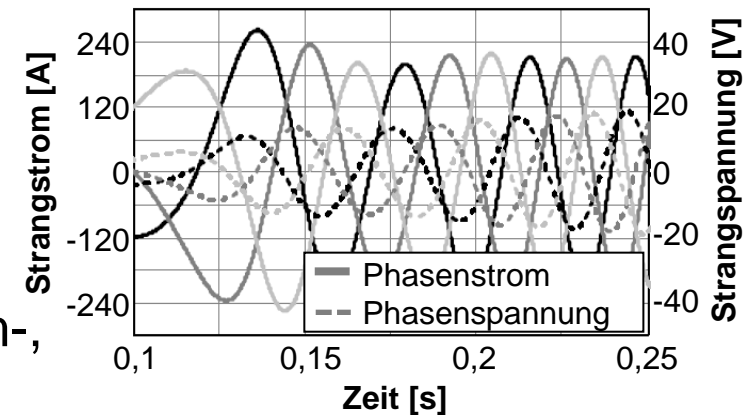
● Modellierung durch geometrie- und prozessbasierte Gleichungen

● Simulation:

- Längs- und Querspannungen
- Längs- und Querströmen
- Berücksichtigung von Ohmschen-, Hysterese-, Wirbelstrom-, Sättigungs-, und Reibungsverlusten
- Berechnung der dynamischen Phasenströme, -spannungen und -winkel

● Geometrieauslegung (Packaging)

● Ausführungsabhängige Maschinenverluste



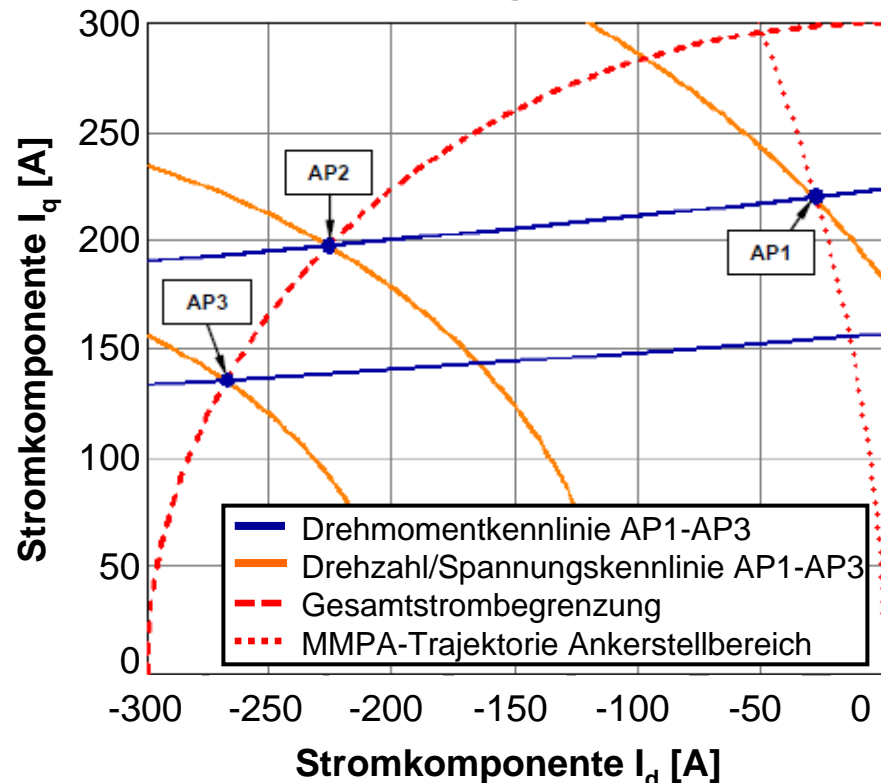


MODELL E-FAHRZEUG

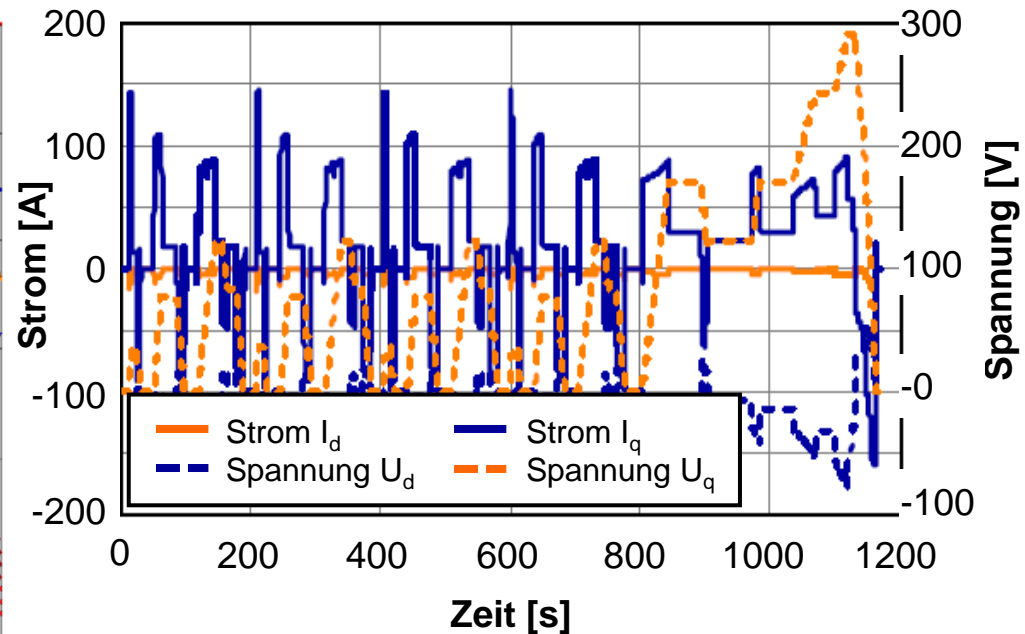
Modell permanenterregte Synchronmaschine

- **Vektorstromregelung:**
 - Wirkungsgradoptimaler Betrieb der Maschine
 - Arbeitspunktabhängige Stromregelung
 - Feldschwächbetrieb möglich

Stromregelebene



Simulation im Zeitbereich





MODELL E-FAHRZEUG

Modell Wechselrichter und Konverter

Leistungselektronik

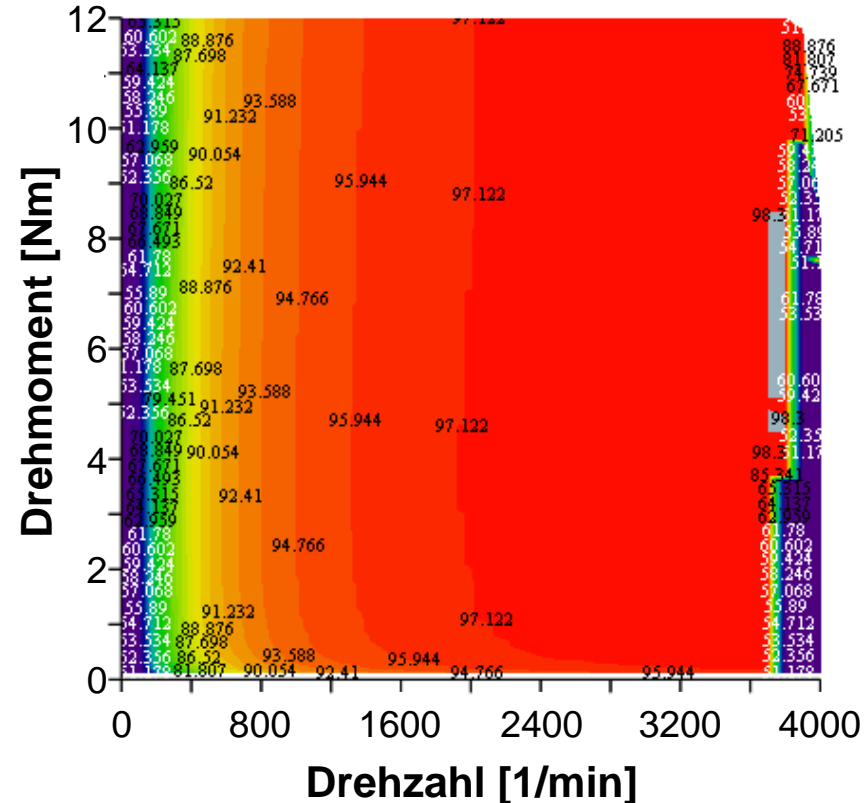
Modellierung durch prozessbasierte analytische Gleichungen

Berücksichtigung:

- Schalt- und Durchlassverluste von IGBT's und Freilaufdioden
- Pauschale Oberwellenverluste
- Zusatzverluste von Steuerung und Peripherie

Verlustleistungsmodell Konverter

Wirkungsgradkennfeld Wechselrichter



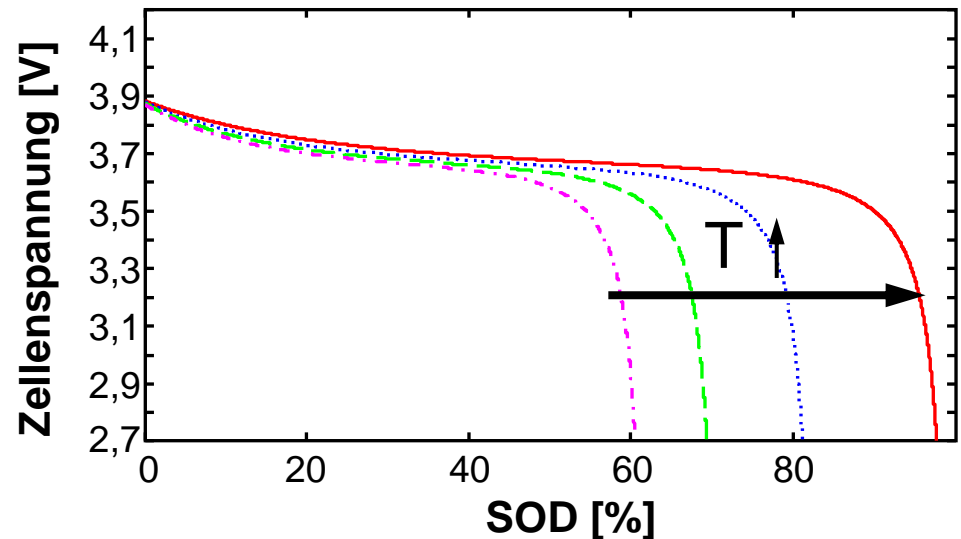


MODELL E-FAHRZEUG

Modell Batterie

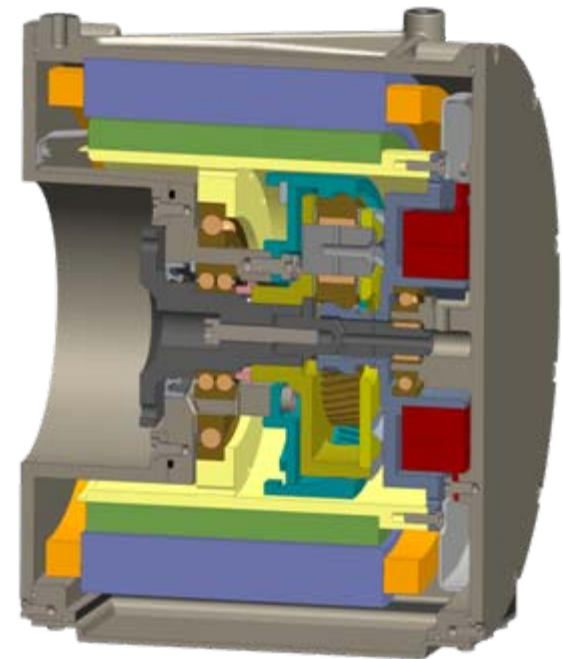
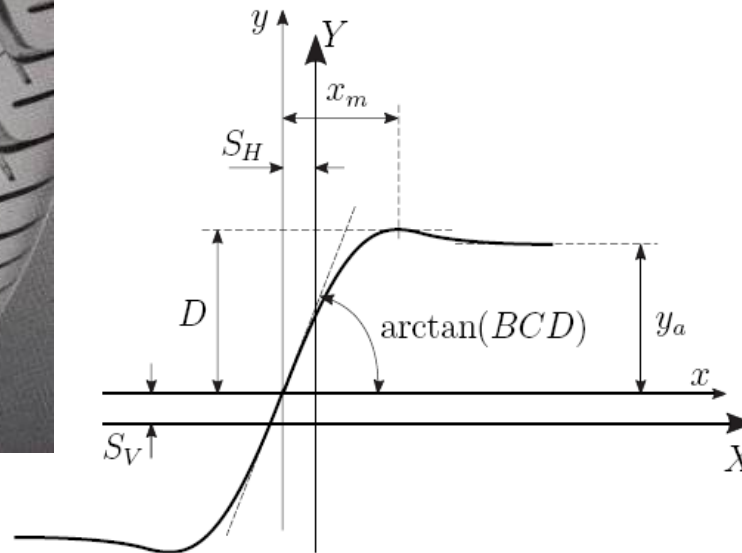
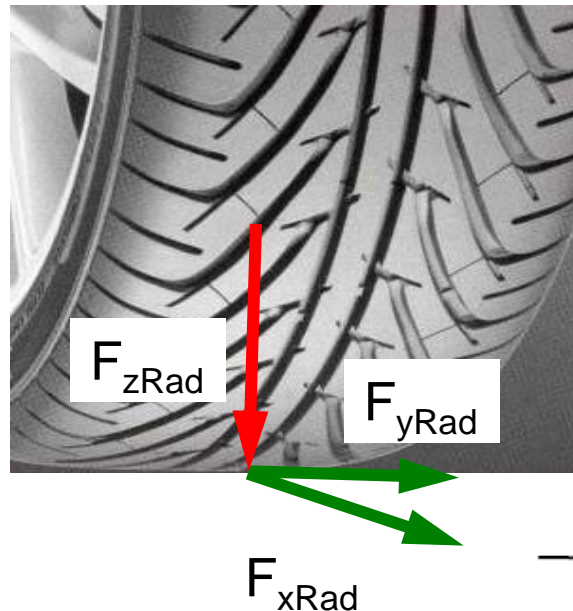
○ Batterie

- Modellierung mittels prozessbasierten analytischen Gleichungen
- Simulation von:
 - Klemmspannungsverlauf
 - aktuell verfügbare Kapazität (SOC/SOD)
 - nichtlineare Batterieverlustleistung
 - Temperatur
 - thermische Abhängigkeit aller Kenngrößen





- **Mehrgang-Getriebe- und Reifenmodell**
 - Variables Getriebemodul zur Simulation von Mehrgang-Getrieben
 - Berücksichtigung von Verzahnungs-, Reib- und Schleppverlusten
 - Nichtlineares Reifenmodell





MODELL KLIMAAANLAGE

Geometrie- und prozessbasierte Simulationsmodelle

○ Modell zur Simulation der Vorgänge in Pkw-Klimaanlagen

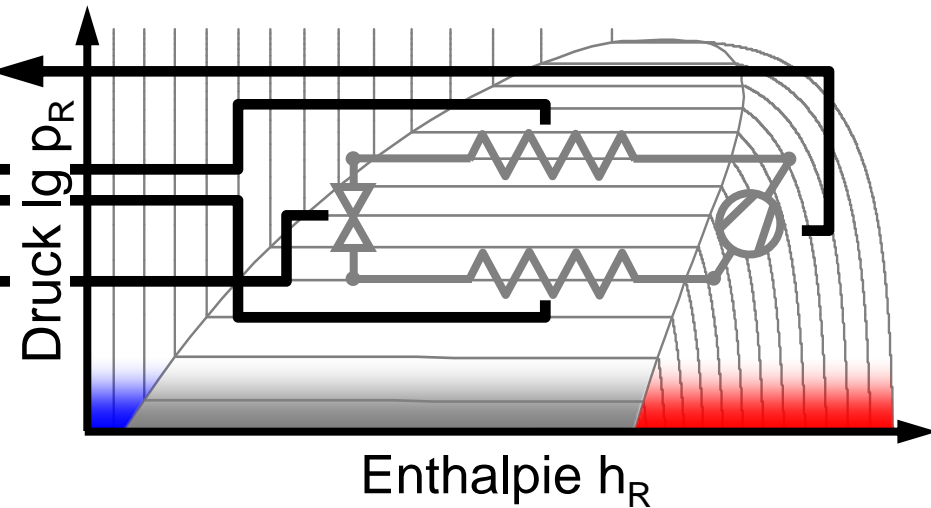
↳ geometrie- und prozessbasierte Teilmodelle für...

○ ...den Kältemittelverdichter

○ ...die Wärmeübertrager

○ ...das Expansionsventil

○ ...die Fahrgastzelle



↳ Verbindung der Teilmodelle zu einem Gesamtmodell

○ Untersuchung verschiedener Optimierungsansätze hinsichtlich der Reichweitenerhöhung

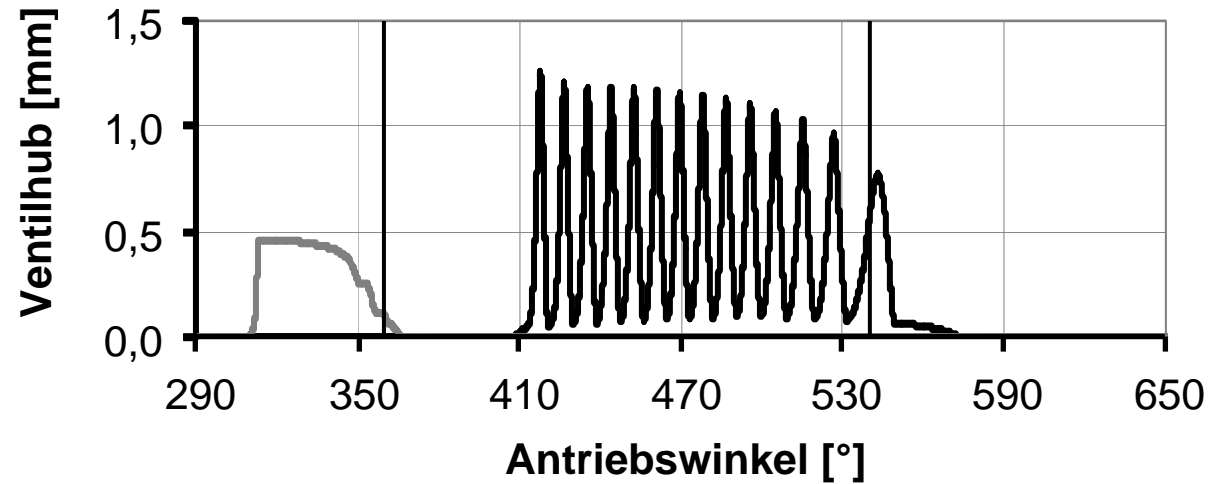


MODELL KLIMAAANLAGE

Teilmodelle

Kältemittelverdichter:

- Ventildynamik





● Kältemittelverdichter:

- Ventildynamik
- Rückströmungen an den Ventilen
- Sauggasaufheizung
- Differentialgleichungssystem

● Modell liefert u.a.:

- sämtliche Kräfte im Verdichter
- Antriebsleistung
- Massenstrom
- Auslasstemperatur

● Wärmeübertrager:

- Unterteilung in Zellen
- Energiebilanz für jede Zelle
- luft- und kältemittelseitige Austrittszustände für jede Zelle

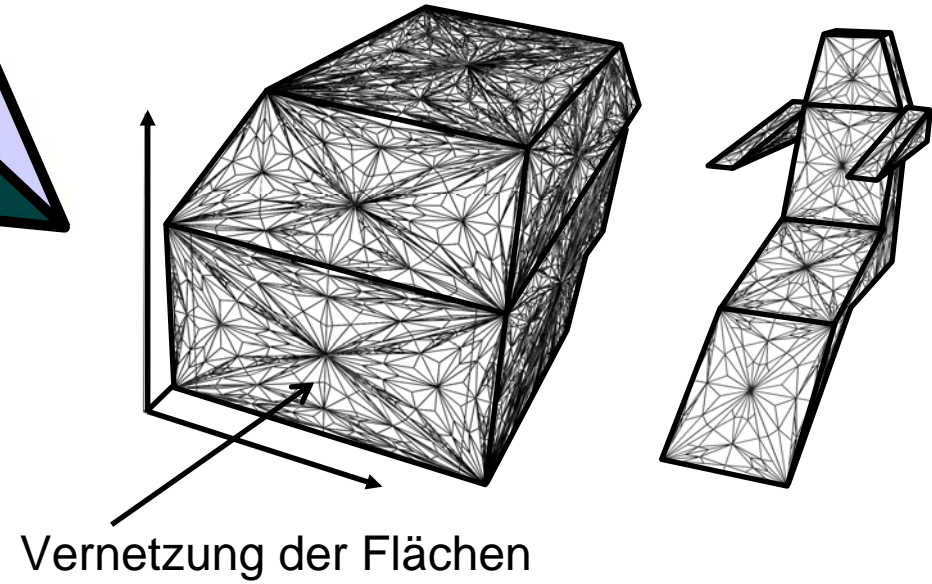
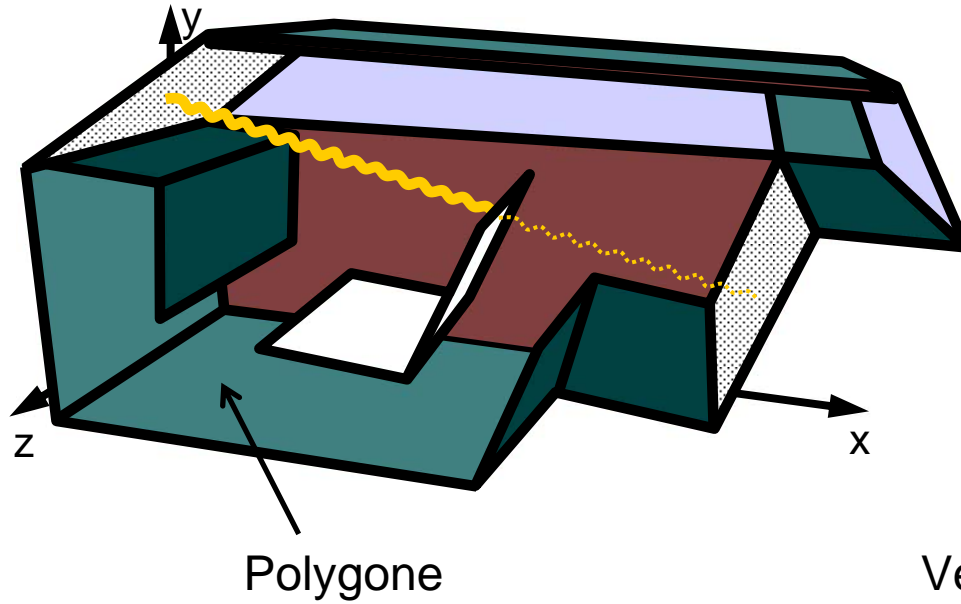
● Modell liefert u.a.:

- Austrittszustand des Kältemittels
- Austrittszustand der Luft



MODELL KLIMAAANLAGE

Fahrgastzelle

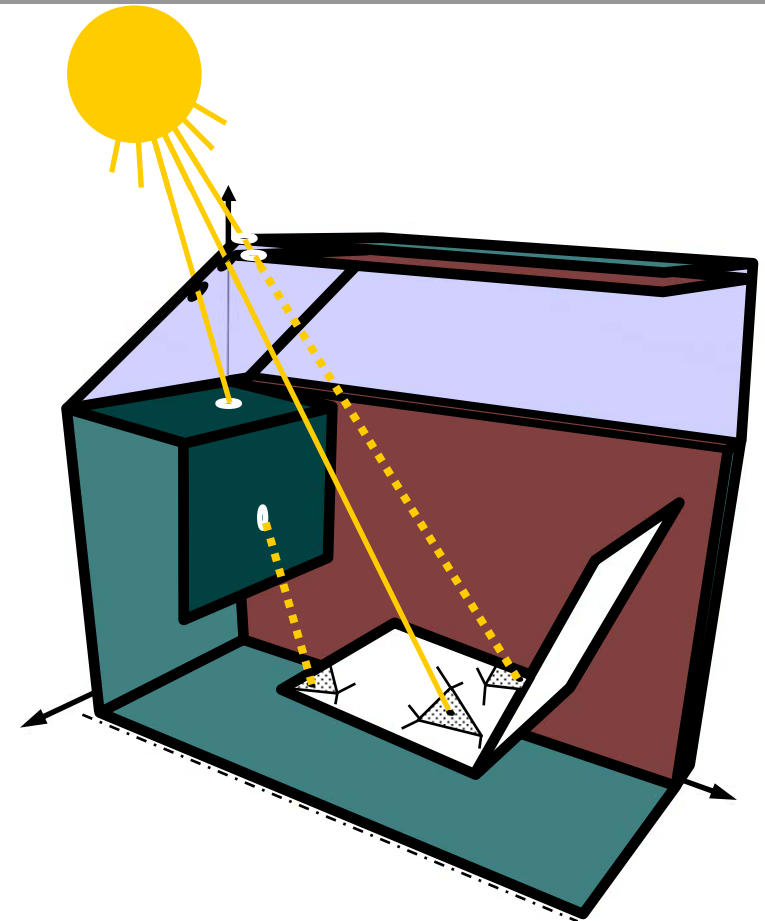
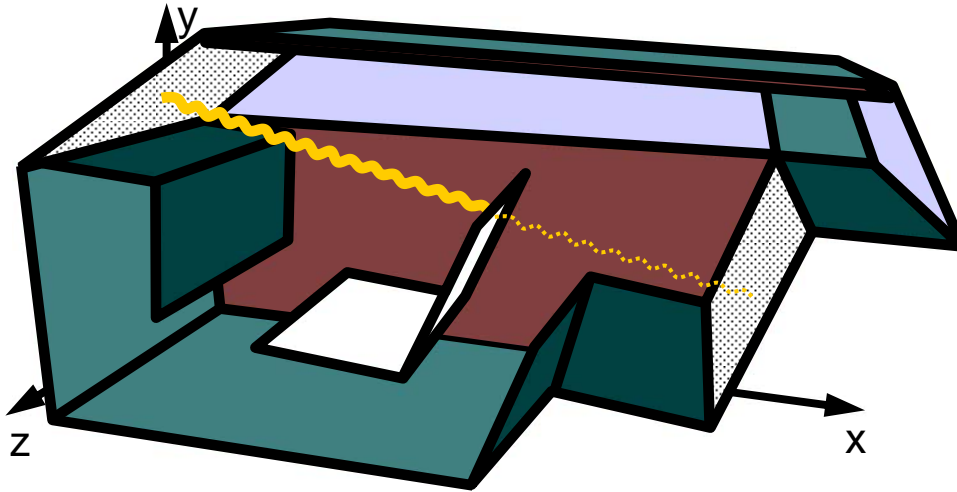


- **Fahrgastzelle:**
 - Konvektion
 - Wärmestrahlung (num. Berechnung der Einstrahlzahlen)



MODELL KLIMAAANLAGE

Fahrgastzelle



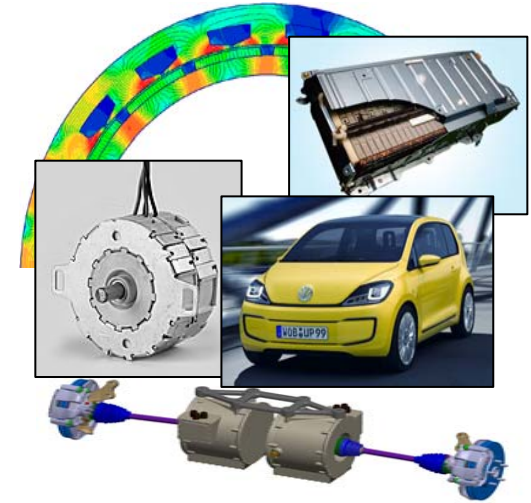
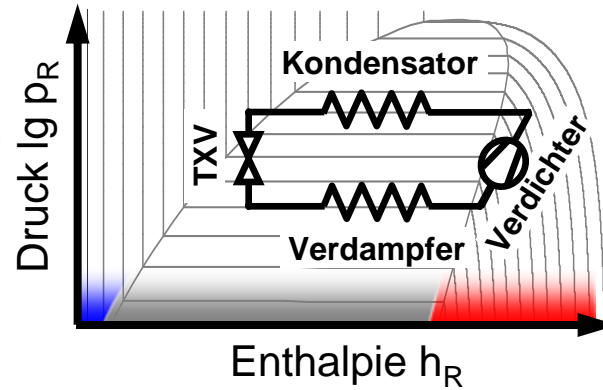
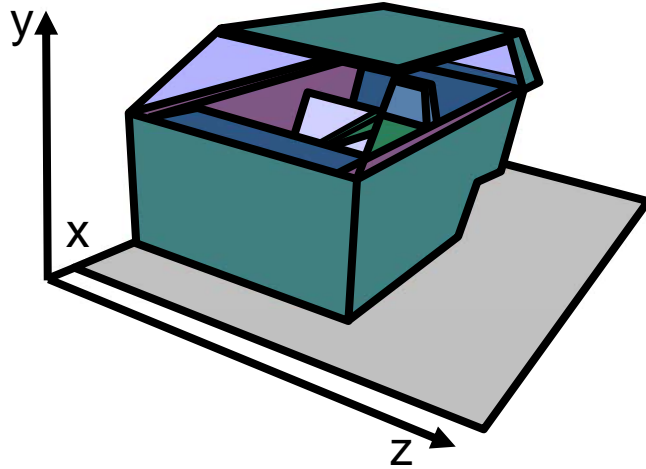
● Fahrgastzelle:

- Konvektion
- Wärmestrahlung (num. Berechnung der Einstrahlzahlen)
- Sonnenstrahlung im Innenraum, (Schattenbildung im Innenraum)
- Atmung und Transpiration des Fahrers



GESAMTMODELL

Verknüpfung der Modelle



Fahrgastzelle

Kältekreisprozess

Antriebsstrang
E-Fahrzeug

Gesamtmodell

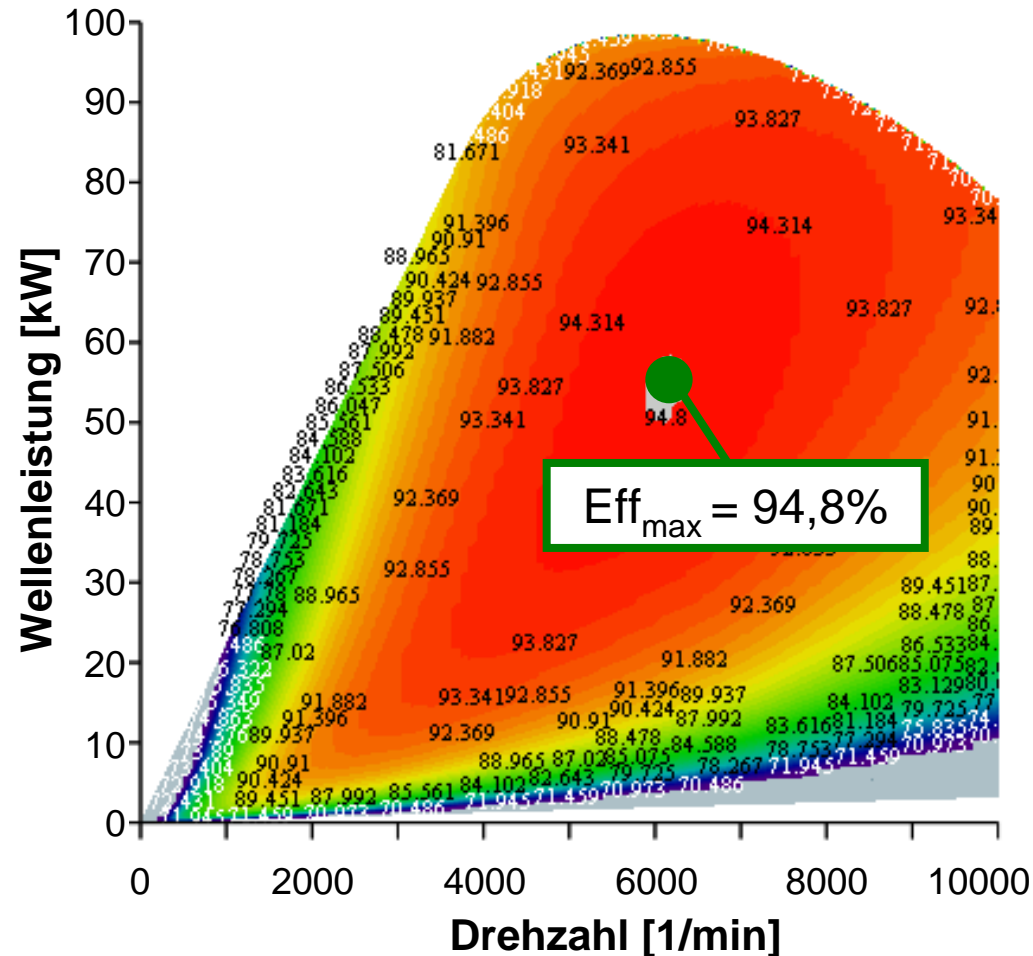


SIMULATIONSRECHNUNG

Randbedingungen E-Fahrzeug

Eigenschaften PSM	Wert
Max. Drehmoment	210 Nm (Dauer)
Max. Drehzahl	10000 1/min
Max. Leistung	80 kW (Dauer)
Max. Wirkungsgrad	96,1 % (5850 1/min, 59 kW)
Außendurchmesser	280 mm
Luftspaltlänge	1,3 mm
Wechselrichter	Wert
Max. Wirkungsgrad	98,6 % (6900 1/min, 20 kW)
Batterie (Li-Ion)	Wert
Energiekapazität	10,00 kWh
Nennspannung	300 V
Max. Dauerleistung	60 kW (kurzzeitig 100 kW)

Wirkungsgrad PSM und Wechselrichter





SIMULATIONSRECHNUNG

Randbedingungen E-Fahrzeug

Fahrzeugdaten	Wert
Fahrzeugsegment	Kompakt Klasse
Fahrzeugmasse	1500 kg
Stirnfläche	2,00 m ²
Luftwiderstandsbeiwert	0,30
Luftdichte	1,210 kg/m ³
Reifendurchmesser	0,625 m
Rollwiderstandbeiwert	0,009

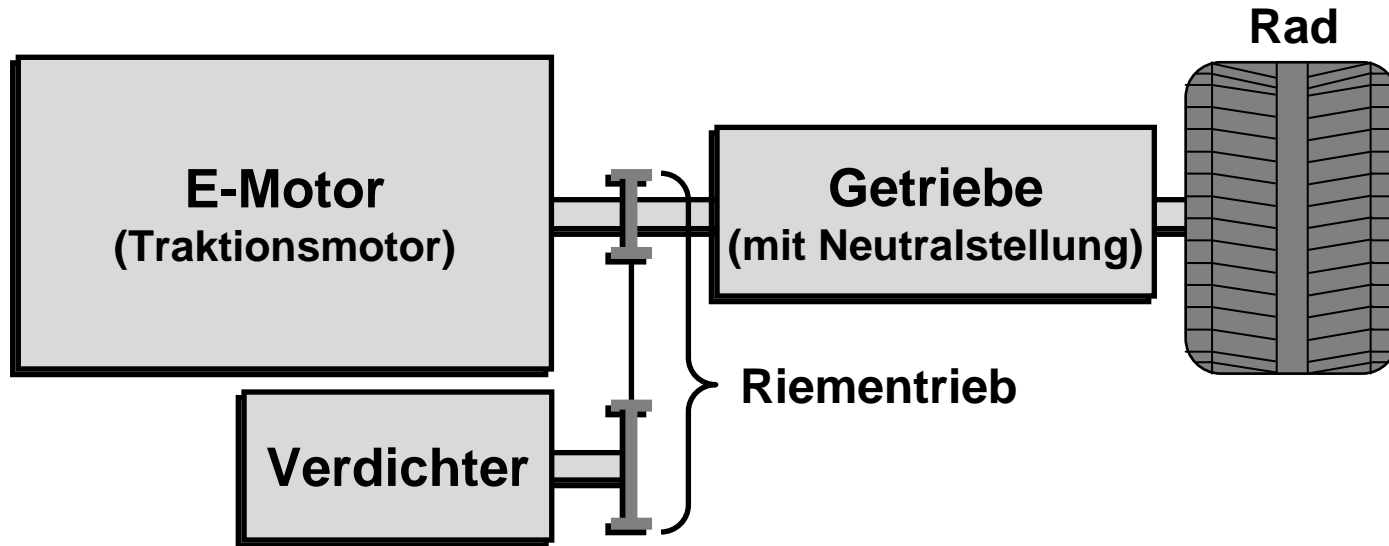
Getriebe	Wert
Getriebetyp	Stufengetriebe
Anzahl Fahrgänge	2
Synchronisation	Aktiv über PSM
Schaltstrategie	Wirkungsgradoptimal
Übersetzung Gang 1	15,6
Übersetzung Gang 2	6,5
Achsübersetzung	4,5

- **Simulationsrandbedingungen E-Antrieb:**
 - **Unbegrenzter Rekuperationsleistungsfluss**
 - **Wirkungsgradoptimale Schaltstrategie**
 - **Berücksichtigung eines elektrischen Grundleistungsbedarfes im Fahrzeug von 250 W**



SIMULATIONSRECHNUNG

geregelter 7-Zyl. Axialkolbenverdichter direkt an Traktionsmotor angebunden



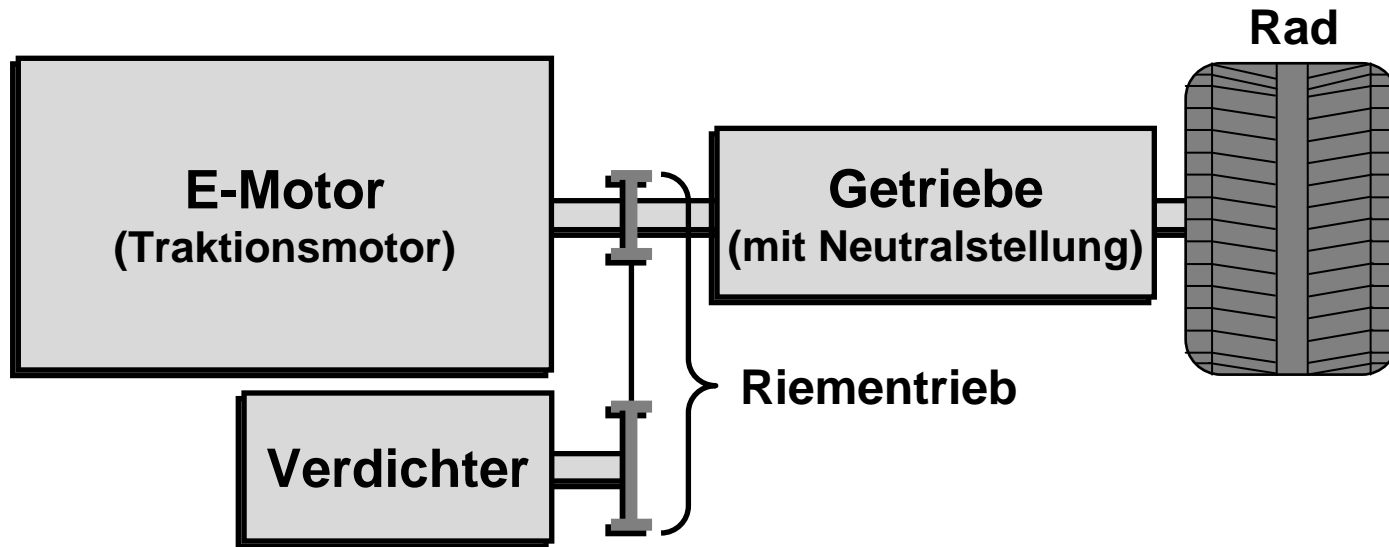
Vorteile:

- bei Fahrzeugstillstand schaltet das Getriebe in die Neutralstellung
⇒ Verdichter wird von E-Motor weiter angetrieben (hier mit 1500 1/min)
- kein separater E-Motor + Elektronik für Verdichter
⇒ Bauraum und Kosten ↓
- durch Betriebspunktverschiebung ist Auslastung des E-Motors im Zugbetrieb höher und im Rekuperationsbetrieb geringer
⇒ Zugbetrieb tritt häufiger auf ⇒ geringere Verluste



SIMULATIONSRECHNUNG

geregelter 7-Zyl. Axialkolbenverdichter direkt an Traktionsmotor angebunden



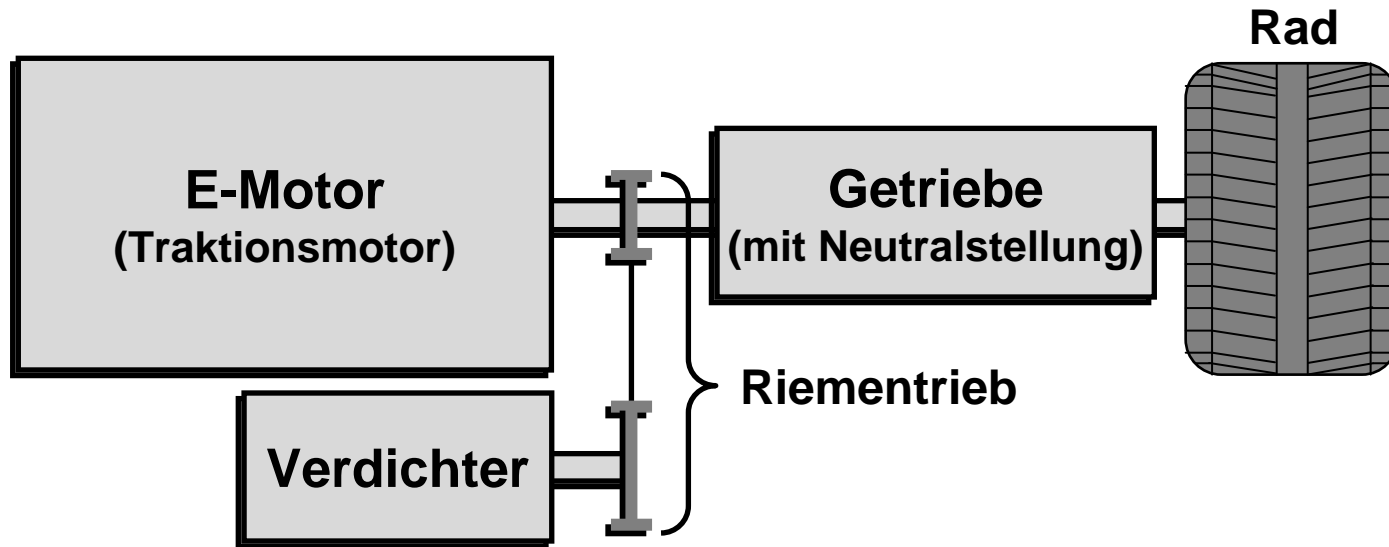
Nachteile:

- hubvolumengeregelter Kältemittelverdichter notwendig
⇒ bei geringem Hubvolumen ⇒ Verdichtereffizienzgrad ↓
- in Stillstandszeiten wird großer E-Motor zum Antrieb des Verdichters weiterbetrieben ⇒ el. Wirkungsgrad ↓



SIMULATIONSRECHNUNG

geregelter 7-Zyl. Axialkolbenverdichter direkt an Traktionsmotor angebunden



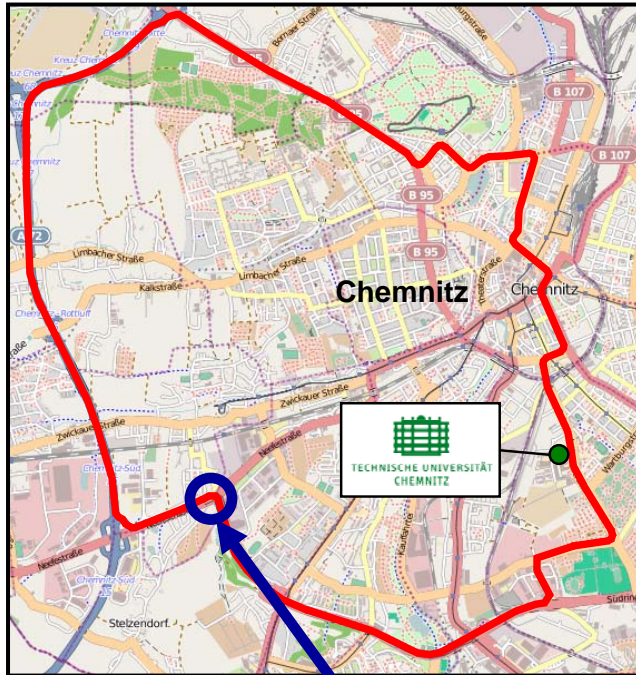
1. Schritt: Untersuchungen für...

- ... hubvolumengeregelten Axialkolbenverdichter mit 7 Zylindern und maximalem Hubvolumen von 155 cm^3
- ... Umgebungsbedingungen aus dem Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes (Region 13) (23. Mai und 5. Juli)
- ... Fahrzyklus

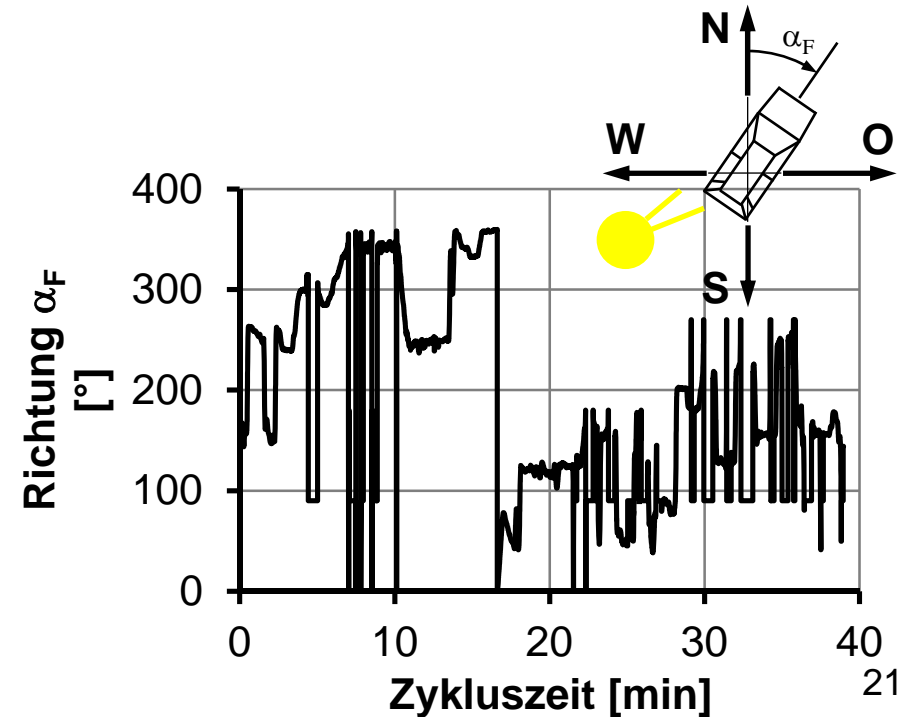
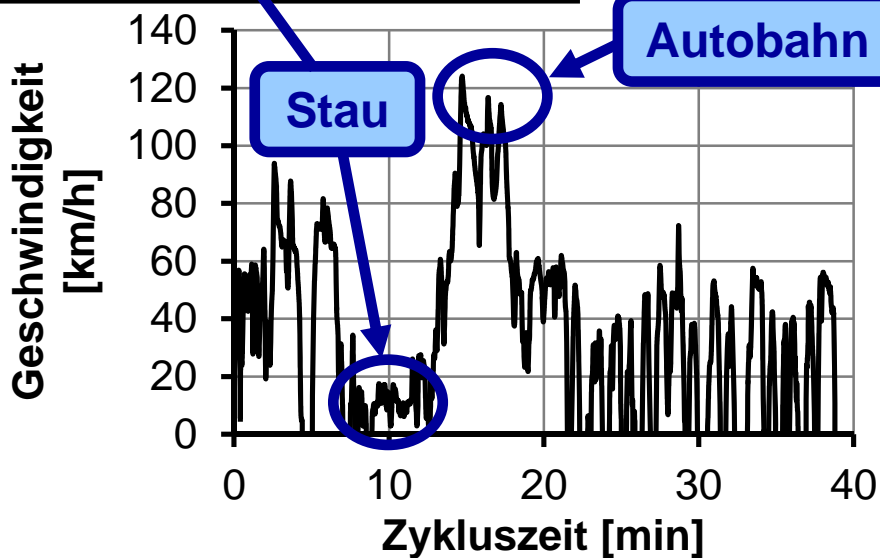


SIMULATIONSRECHNUNG

Fahrzyklus



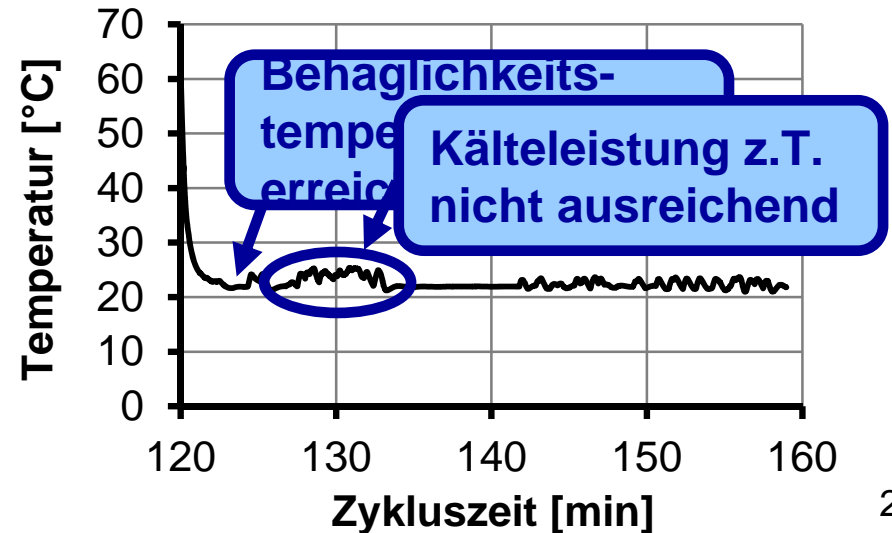
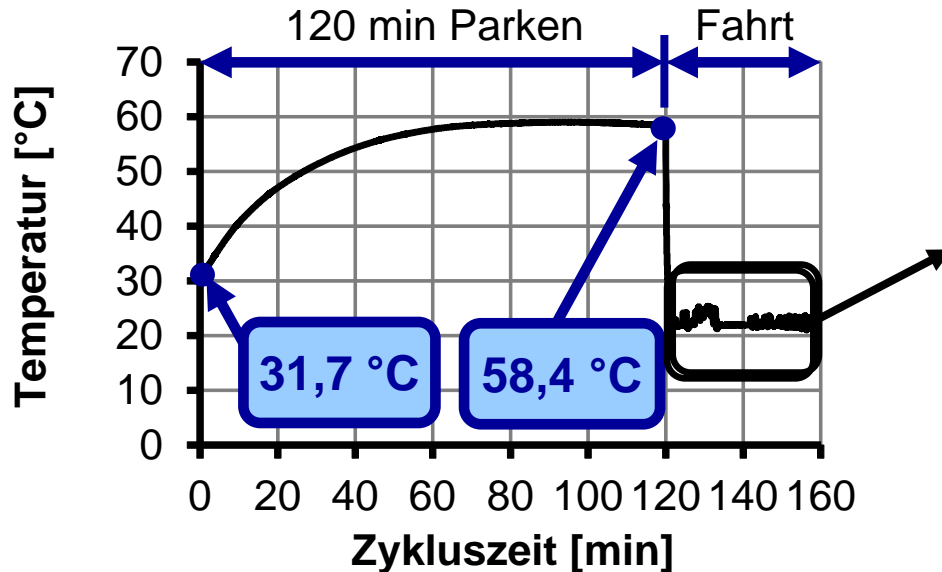
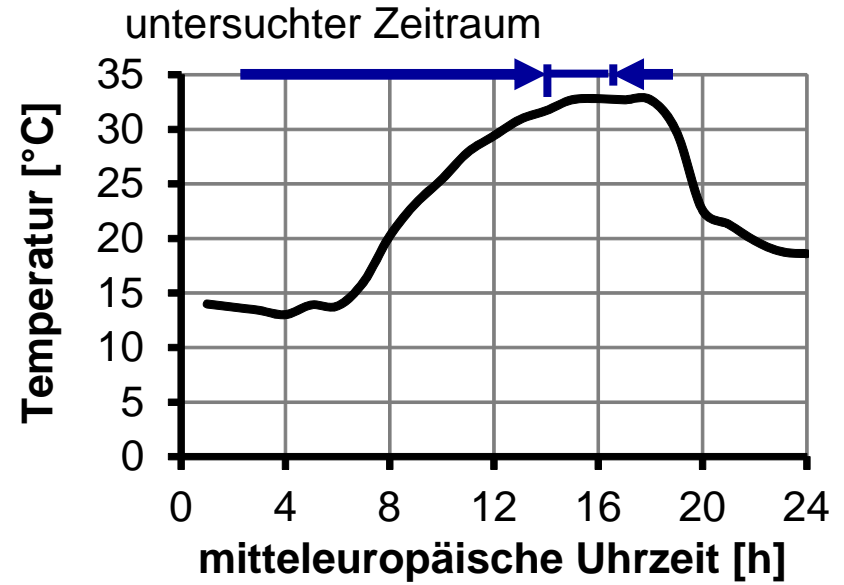
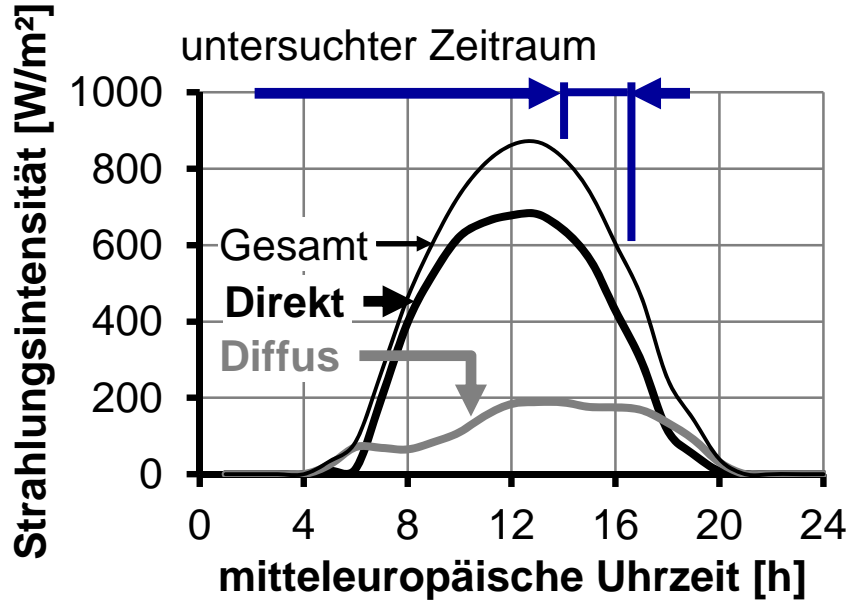
Chemnitz-Zyklus	Wert
Wegstrecke [km]	22,880
Zyklusdauer [min]	39,00
Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h]	44,54
mittlere Zugleistung [kW]	5,79
mittlere Schubleistung [kW]	2,38
Verhältnis Zug/Schubenergie	2,13





ERGEBNISSE

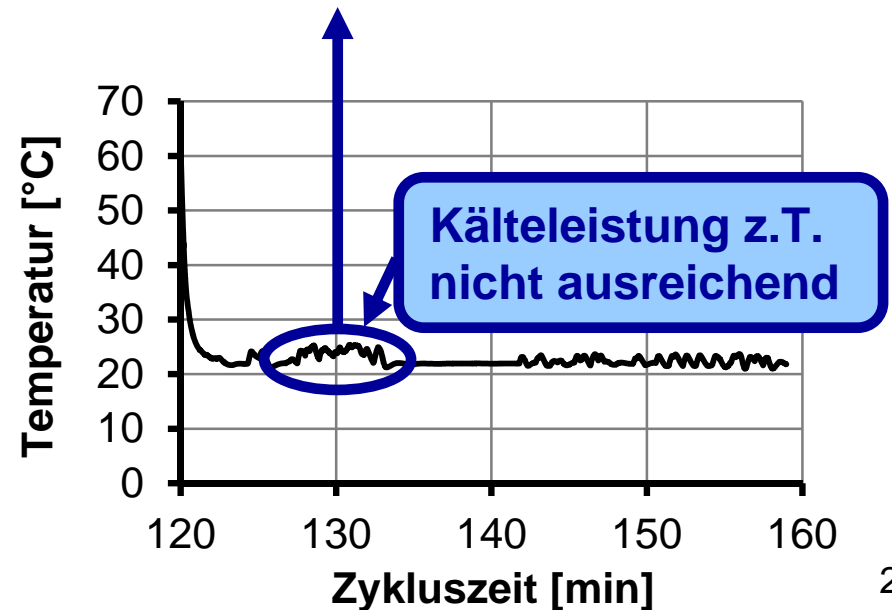
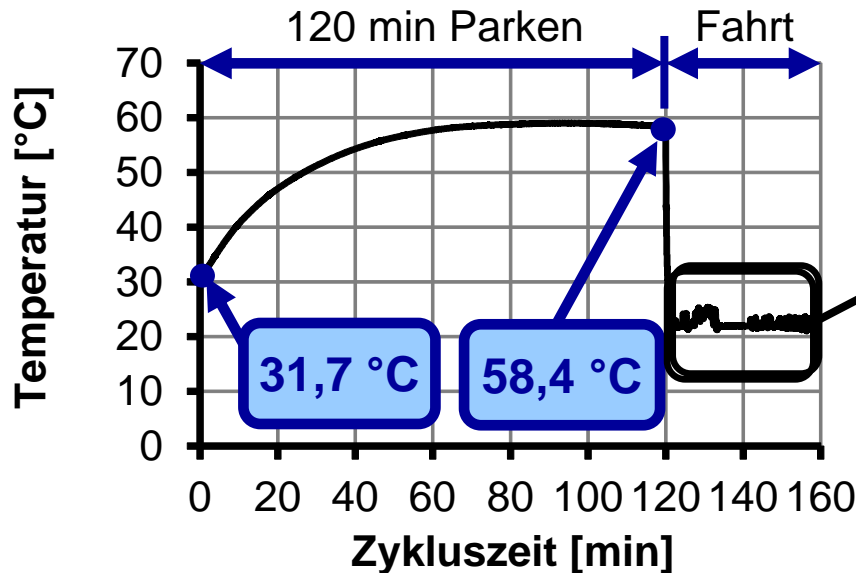
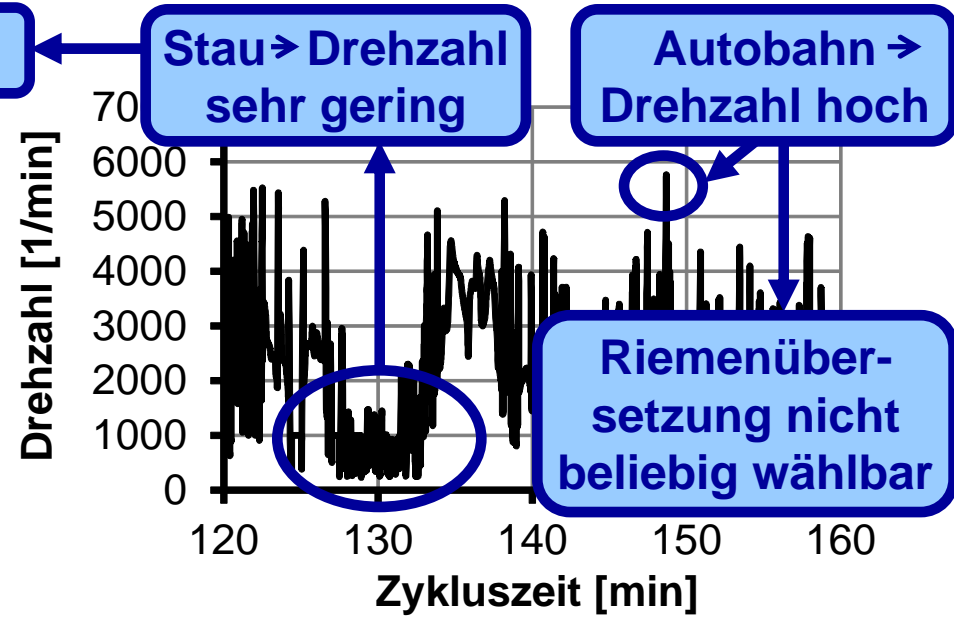
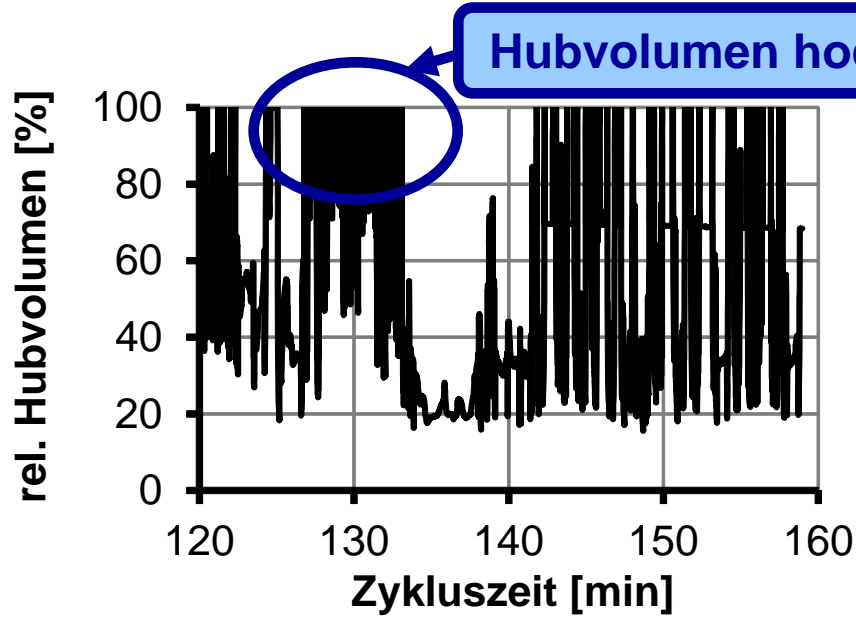
geregelter 7-Zyl. Axialkolbenverdichter direkt an E-Motor angebunden (5.Juli)





ERGEBNISSE

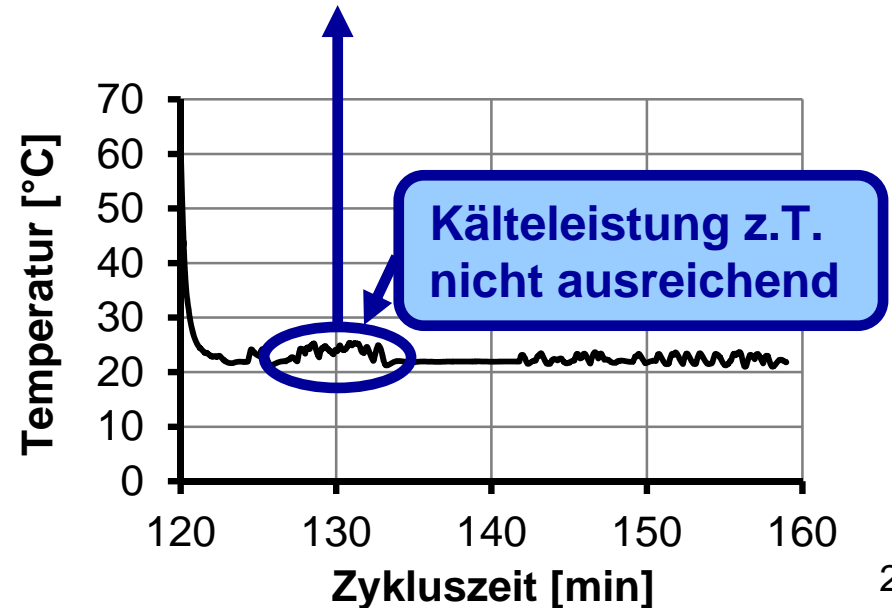
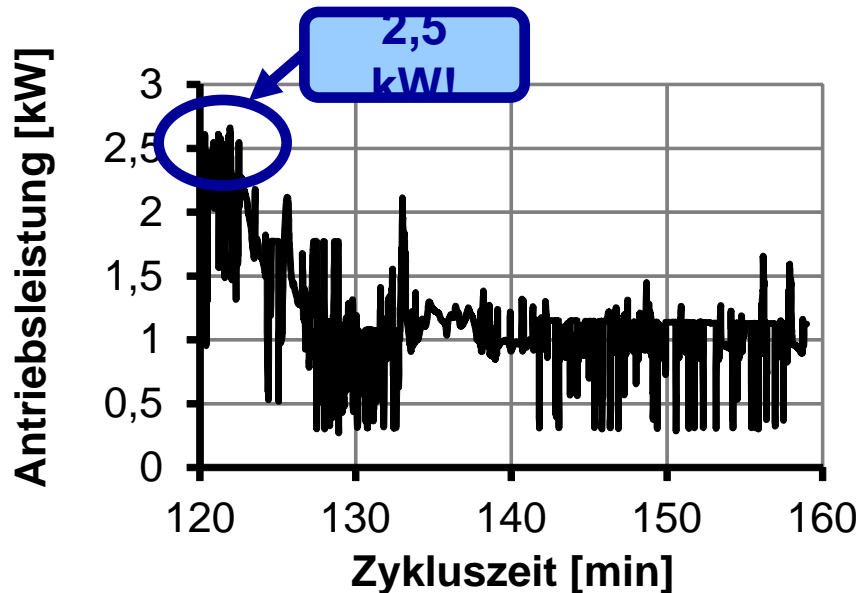
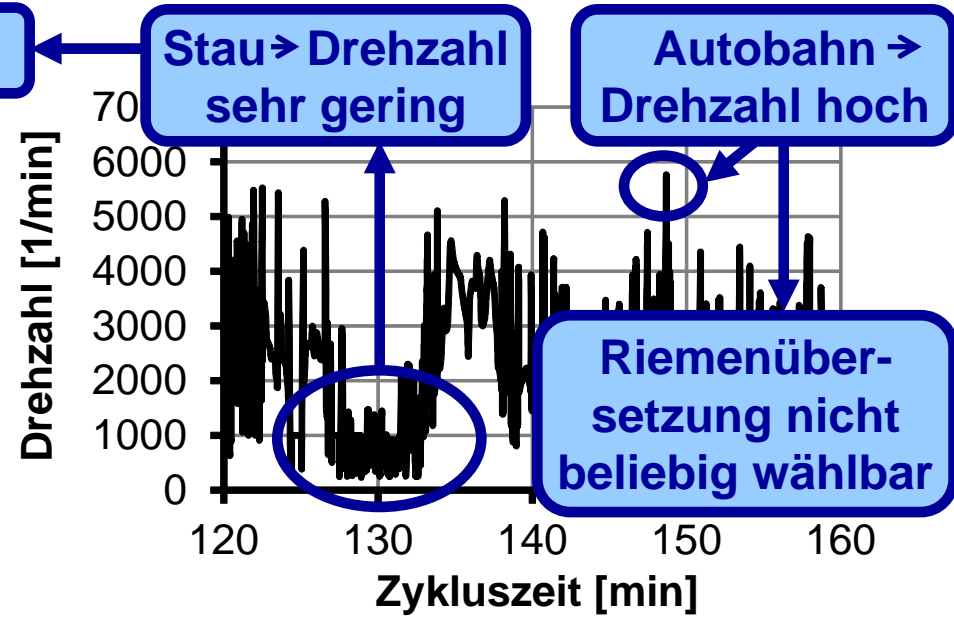
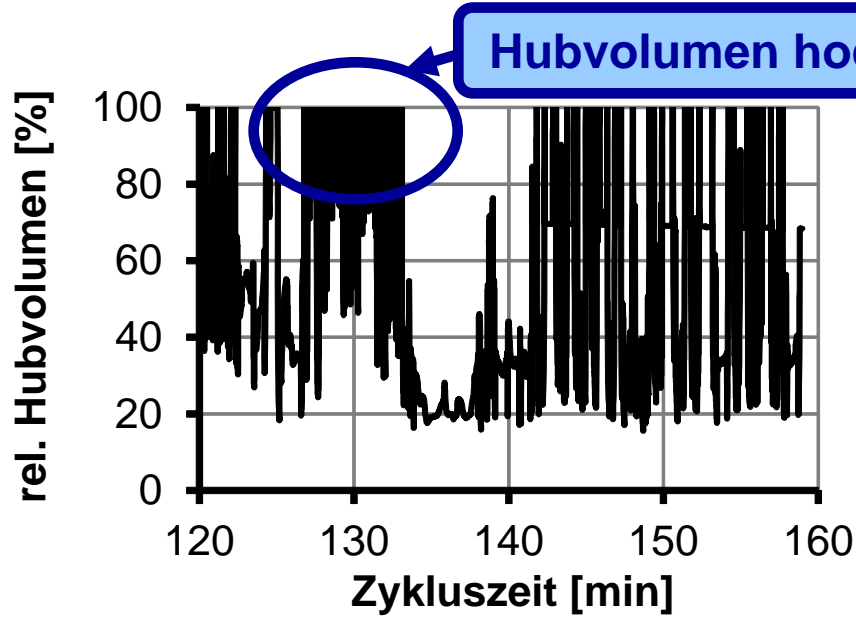
geregelter 7-Zyl. Axialkolbenverdichter direkt an E-Motor angebunden (5.Juli)





ERGEBNISSE

geregelter 7-Zyl. Axialkolbenverdichter direkt an E-Motor angebunden (5.Juli)



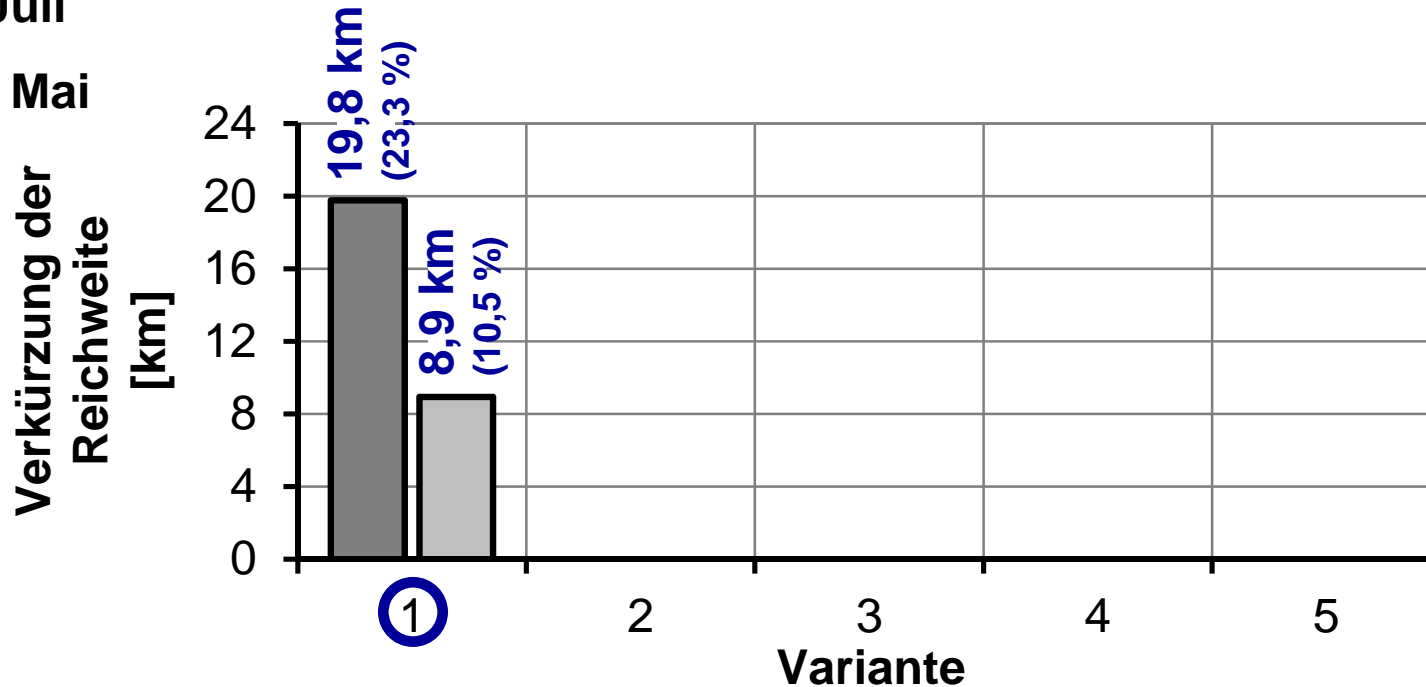


ERGEBNISSE

Verkürzung der Reichweite

Reichweite ohne Klimaanlage: 84,9 km

■ 5. Juli
■ 23. Mai

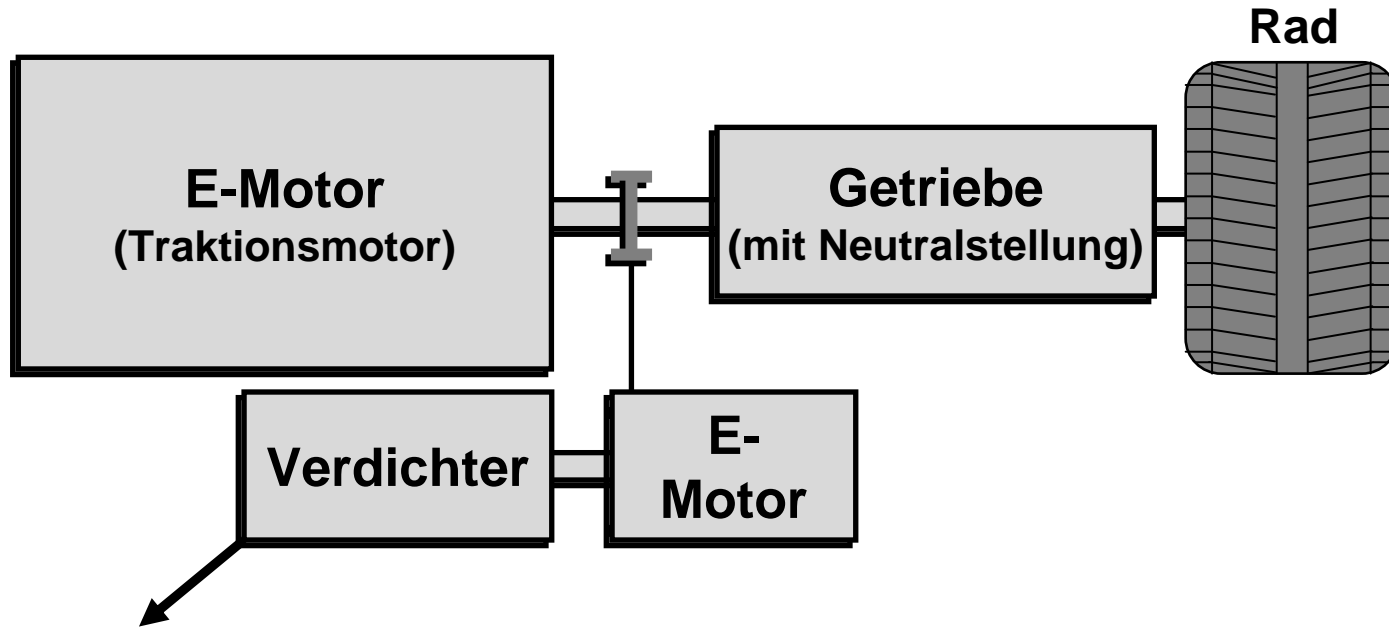


1 = geregelter 7-Zylinder-Verdichter direkt mit Traktionsmotor verbunden



ERGEBNISSE

ungeregelter Verdichter mit separatem E-Motor

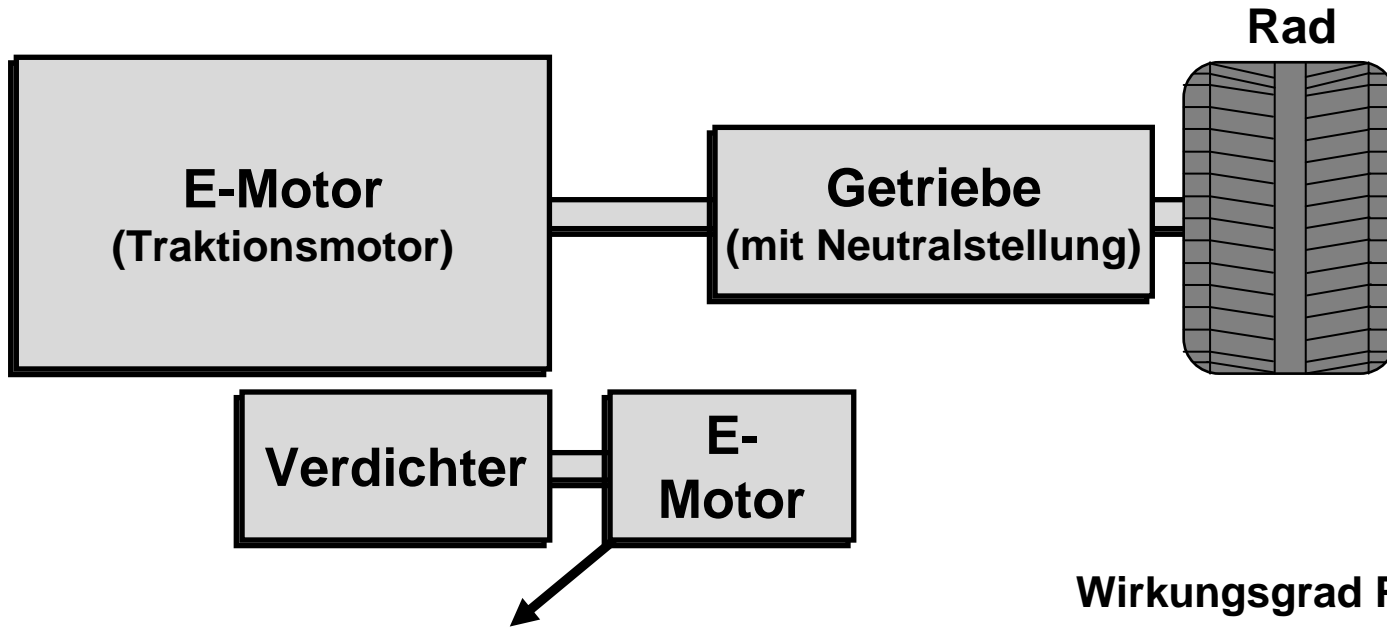


- Verdichterdrehzahl mit E-Motor geregelt
- 7-Zylinder-Verdichter mit festem Hubvolumen (155 cm^3)
- Mindestdrehzahl des Verdichters hier beispielhaft auf 500 1/min festgelegt (Vermeidung von Geräuschbildung)



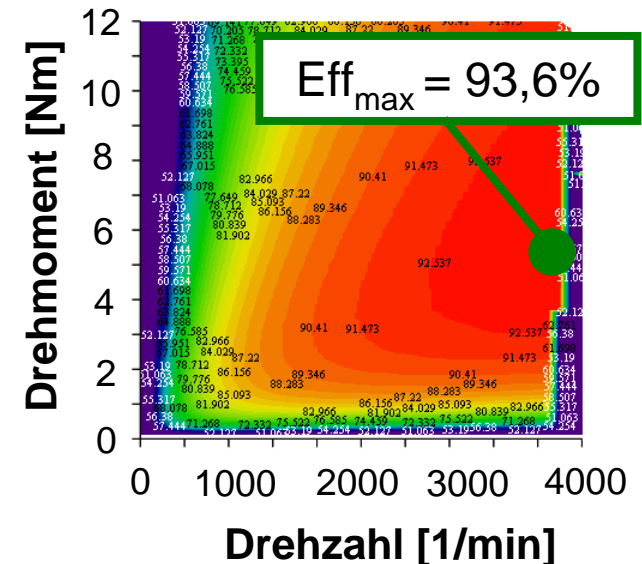
ERGEBNISSE

ungeregelter Verdichter mit separatem E-Motor



- 3-Phasige PM Synchronmaschine
- $P_{\max} = 5 \text{ kW}$, $n_{\max} = 4000 \text{ 1/min}$ (begrenzt)
- Max. Wirkungsgrad (PSM+WR) = 93,6%
- DC/DC Konverter mit konstant angenommenen Wirkungsgrad von 95%

Wirkungsgrad PSM+WR



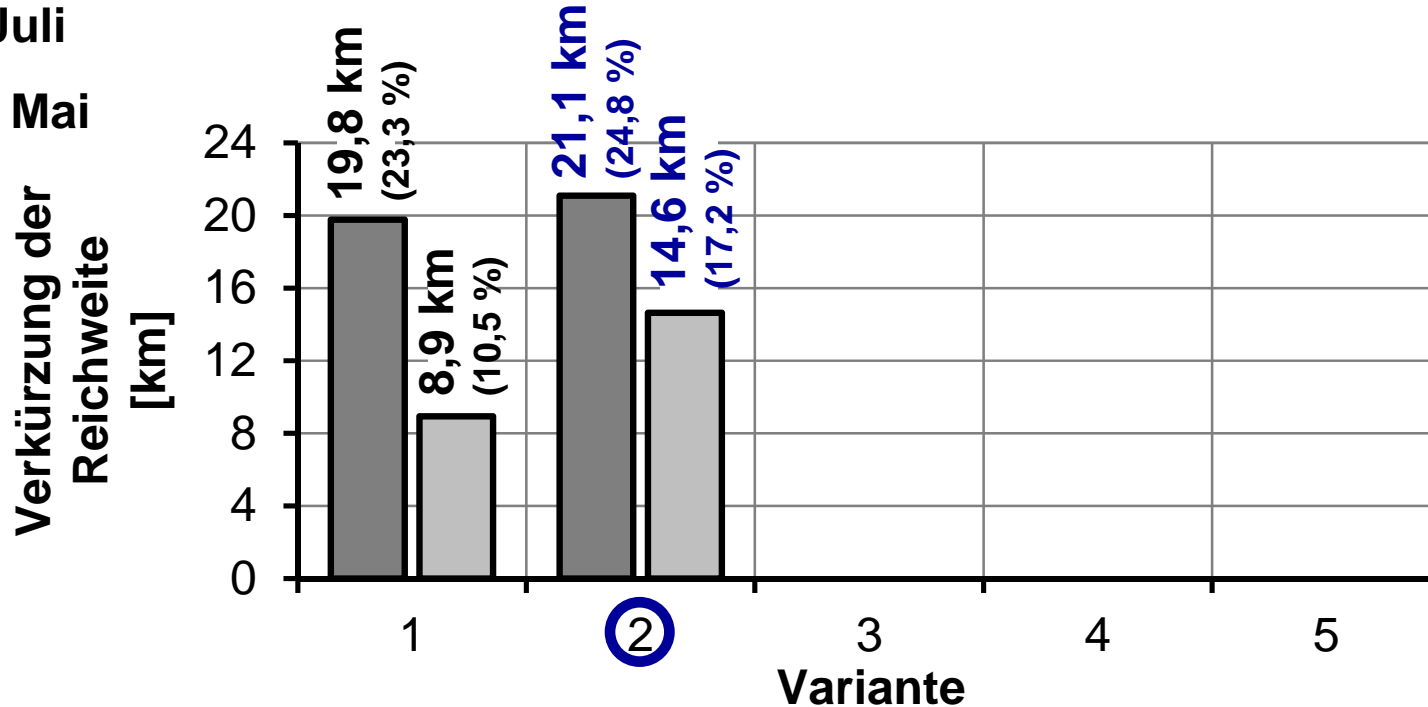


ERGEBNISSE

Verkürzung der Reichweite

Reichweite ohne Klimaanlage: 84,9 km

■ 5. Juli
■ 23. Mai



1 = geregelter 7-Zylinder-Verdichter direkt mit Traktionsmotor verbunden

2 = 7-Zylinder-Verdichter (155 cm³) mit separatem E-Motor

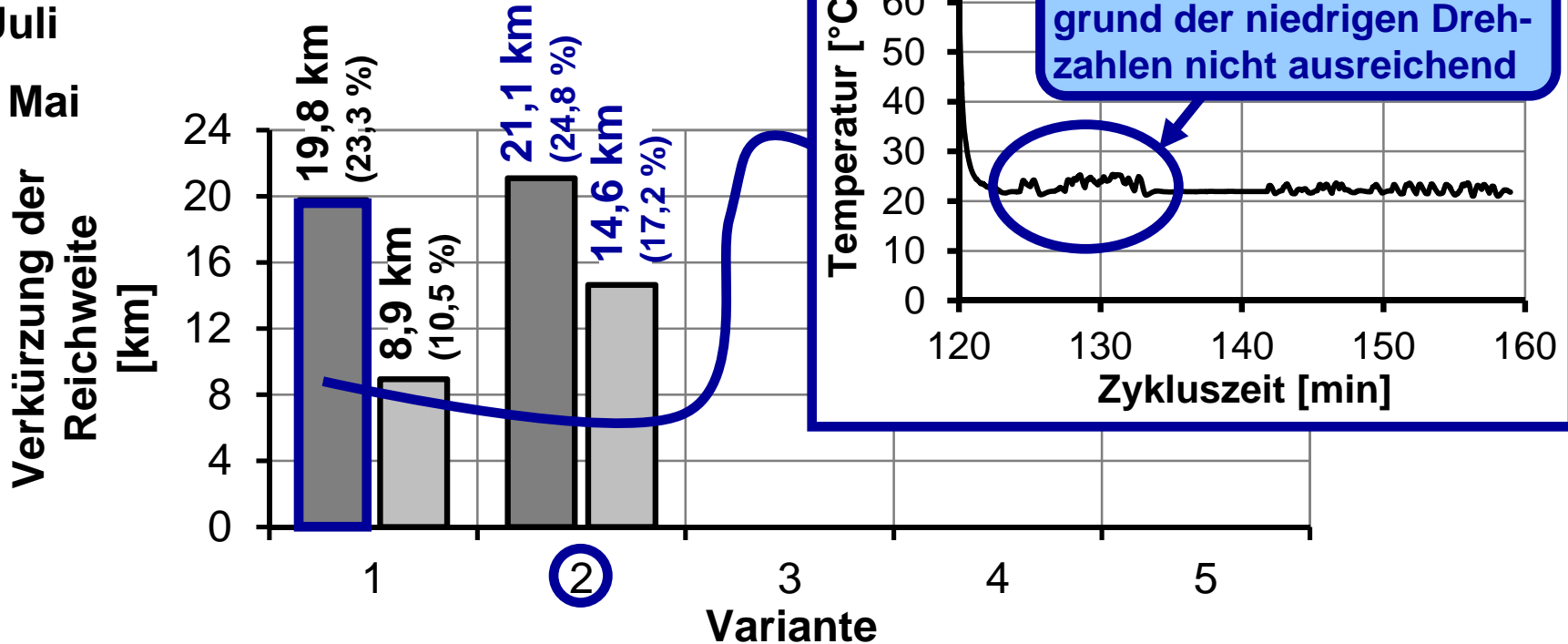


ERGEBNISSE

Verkürzung der Reichweite

Reichweite ohne Klimaanlage: 84,9 km

■ 5. Juli
■ 23. Mai



1 = geregelter 7-Zylinder-Verdichter direkt mit Traktionsmotor verbunden

2 = 7-Zylinder-Verdichter (155 cm³) mit separatem E-Motor



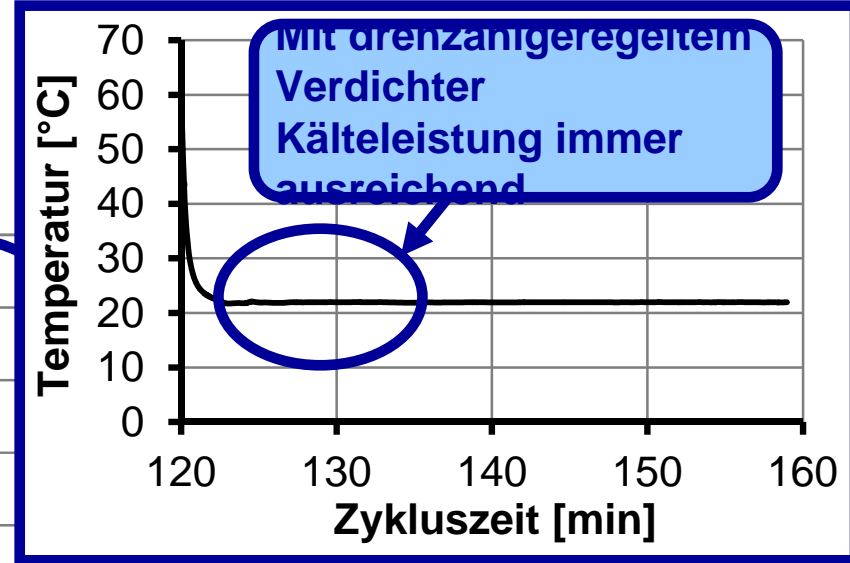
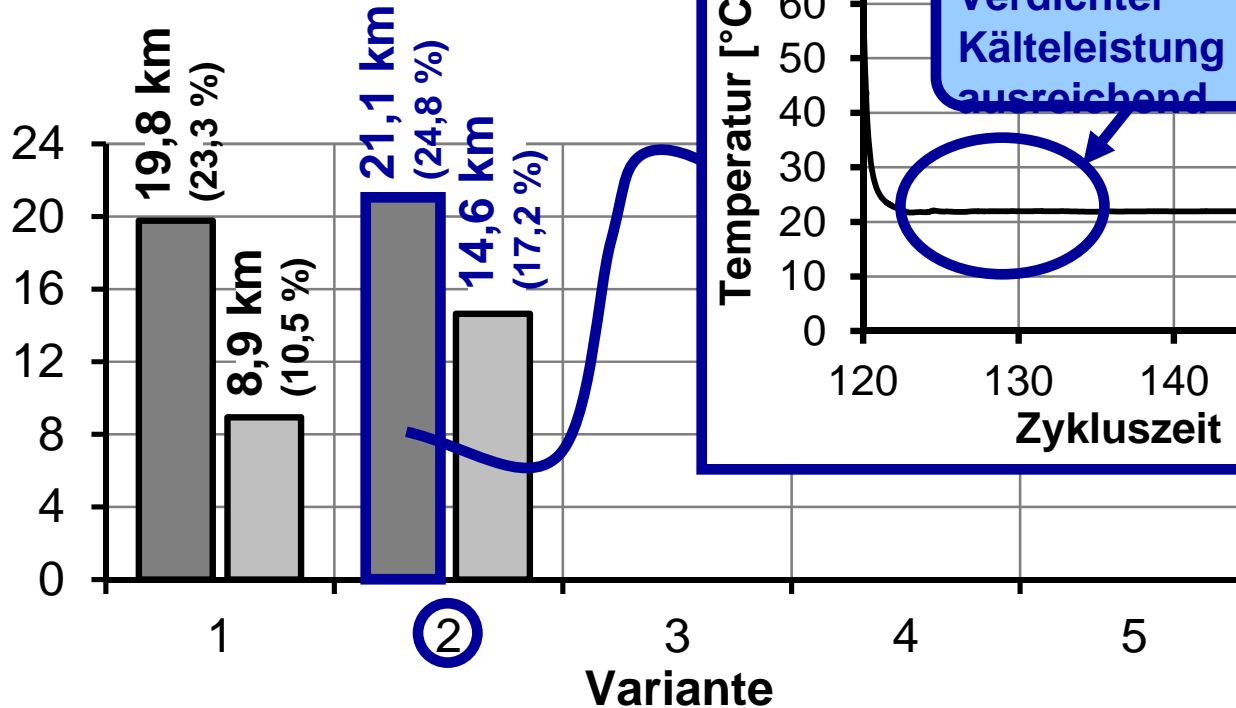
ERGEBNISSE

Verkürzung der Reichweite

Reichweite ohne Klimaanlage: 84,9 km

■ 5. Juli
■ 23. Mai

Verkürzung der Reichweite [km]



1 = geregelter 7-Zylinder-Verdichter direkt mit Traktionsmotor verbunden

2 = 7-Zylinder-Verdichter (155 cm³) mit separatem E-Motor

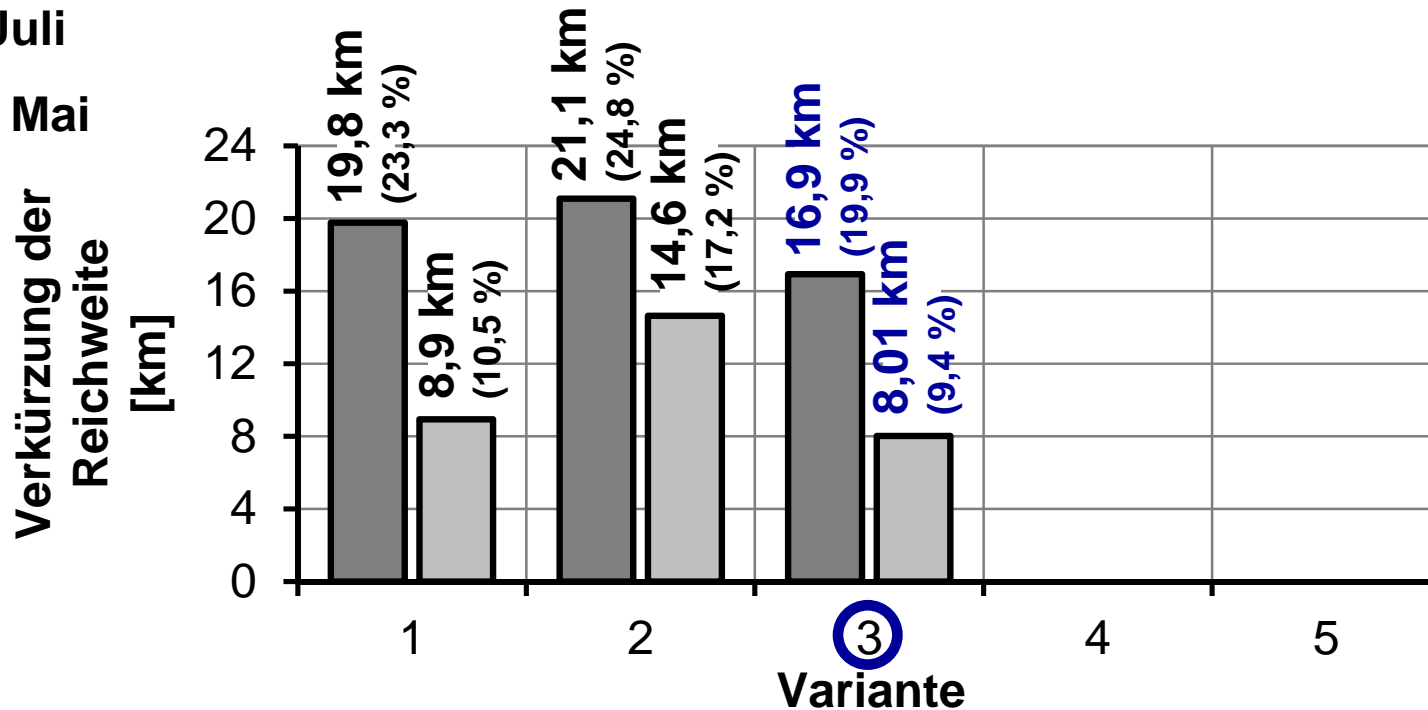


ERGEBNISSE

Verkürzung der Reichweite

Reichweite ohne Klimaanlage: 84,9 km

■ 5. Juli
■ 23. Mai



1 = geregelter 7-Zylinder-Verdichter direkt mit Traktionsmotor verbunden

2 = 7-Zylinder-Verdichter (155 cm³) mit separatem E-Motor

3 = 5-Zylinder-Verdichter (111 cm³) mit separatem E-Motor

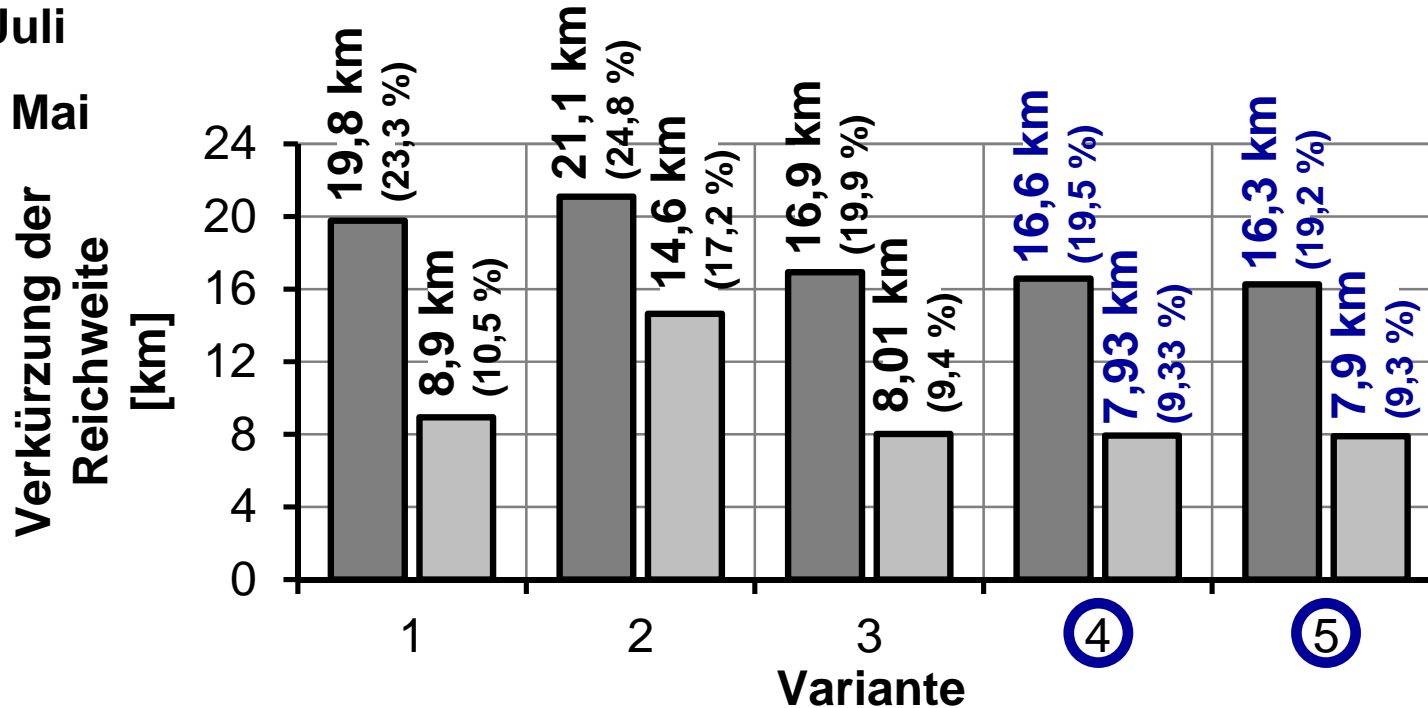


ERGEBNISSE

Verkürzung der Reichweite

Reichweite ohne Klimaanlage: 84,9 km

■ 5. Juli
■ 23. Mai



1 = geregelter 7-Zylinder-Verdichter direkt mit Traktionsmotor verbunden

2 = 7-Zylinder-Verdichter (155 cm³) mit separatem E-Motor

3 = 5-Zylinder-Verdichter (111 cm³) mit separatem E-Motor

4 = 5-Zylinder-Verdichter (111 cm³) mit separatem E-Motor, Transmissionsgrad der Fahrzeugscheiben = 0,4

5 = 5-Zylinder-Verdichter (111 cm³) mit separatem E-Motor, Transmissionsgrad der Fahrzeugscheiben = 0,3



ZUSAMMENFASSUNG/AUSBLICK

- **Modell für die gesamte Klimaanlage inklusive der Fahrgastzelle**
 - vollständig geometrie- und prozessbasiertes Modell
 - Optimierung von Pkw-Klimaanlagen hinsichtlich Energieeffizienz
- **Modell für E-Fahrzeug**
 - vollständig geometrie- und prozessbasiertes Modell
 - Entwicklung von effizienten Betriebsstrategien
 - Verlustanalyse von Modifikationen im Antriebsstrang
- **Gesamtmodell**
 - gesamtheitliche Betrachtung des kompletten Fahrzeuges mit allen Komponenten
 - 1. Schritt: Untersuchung verschiedener Varianten mit Axialkolbenverdichter
Einfluss des Transmissionsgrades der Scheiben auf Reichweite
- **Ausblick**
 - Betrachtung weiterer Verdichterprinzipien, wie z.B. Spiralverdichter
 - Untersuchung von TM-Maßnahmen mit Speisung aus elekt. Verlusten