

7. VDI-Fachkonferenz

Thermomanagement in elektromotorisch angetriebenen PKW

Maßgeschneiderte Kühlung elektrischer Umrichter in BEVs

Stuttgart, 20. November 2018

Marten Trenktrog, M.Sc.

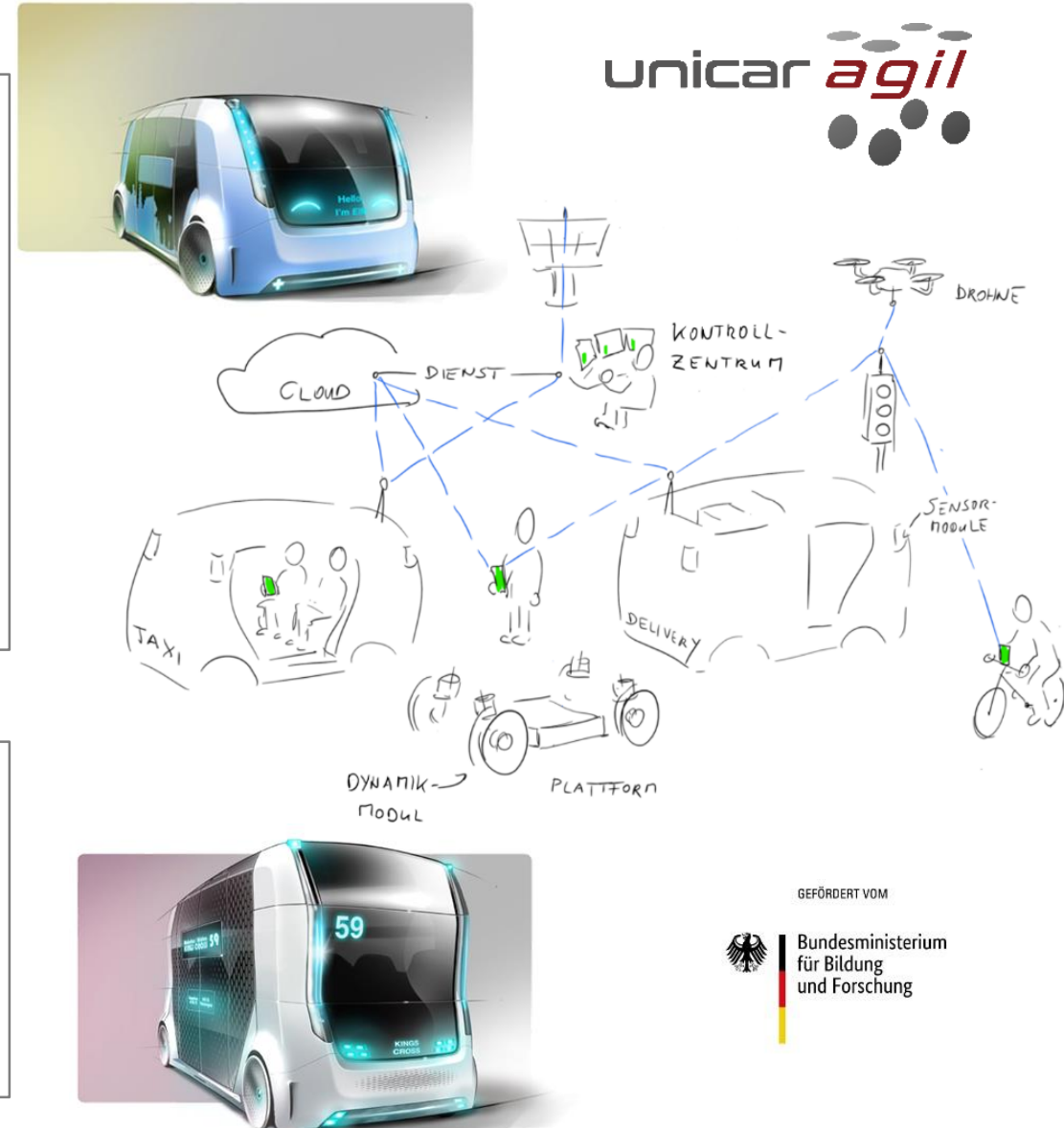
Institut für Kraftfahrzeuge

- Projektvorstellung
 - Rahmen und Ziele
 - Technische Daten
- Prozesskette
- Systembeschreibung und Randbedingungen
- Systemanalyse
- Auslegung der Strömungsführung
- Geometrie der Wärmeübertrager
- Ausblick

ika | RWTH AACHEN
UNIVERSITY

1. Modulare Struktur für agile, automatisierte Fahrzeugkonzepte
2. Disruptive Konzepte in Hardware und Software-Architektur
3. Modulare Plattform mit dynamischen Modulen
4. Vollautomatisierte und fahrerlose Fahrzeuge
5. Vier Prototypen unterschiedlicher Charakteristik

- 26 Mio. € BMBF Fördervolumen
- 01.02.2018 – 31.01.2022 (48 Monate)
- 15 Lehrstühle / Institute
- 6 Industriepartner



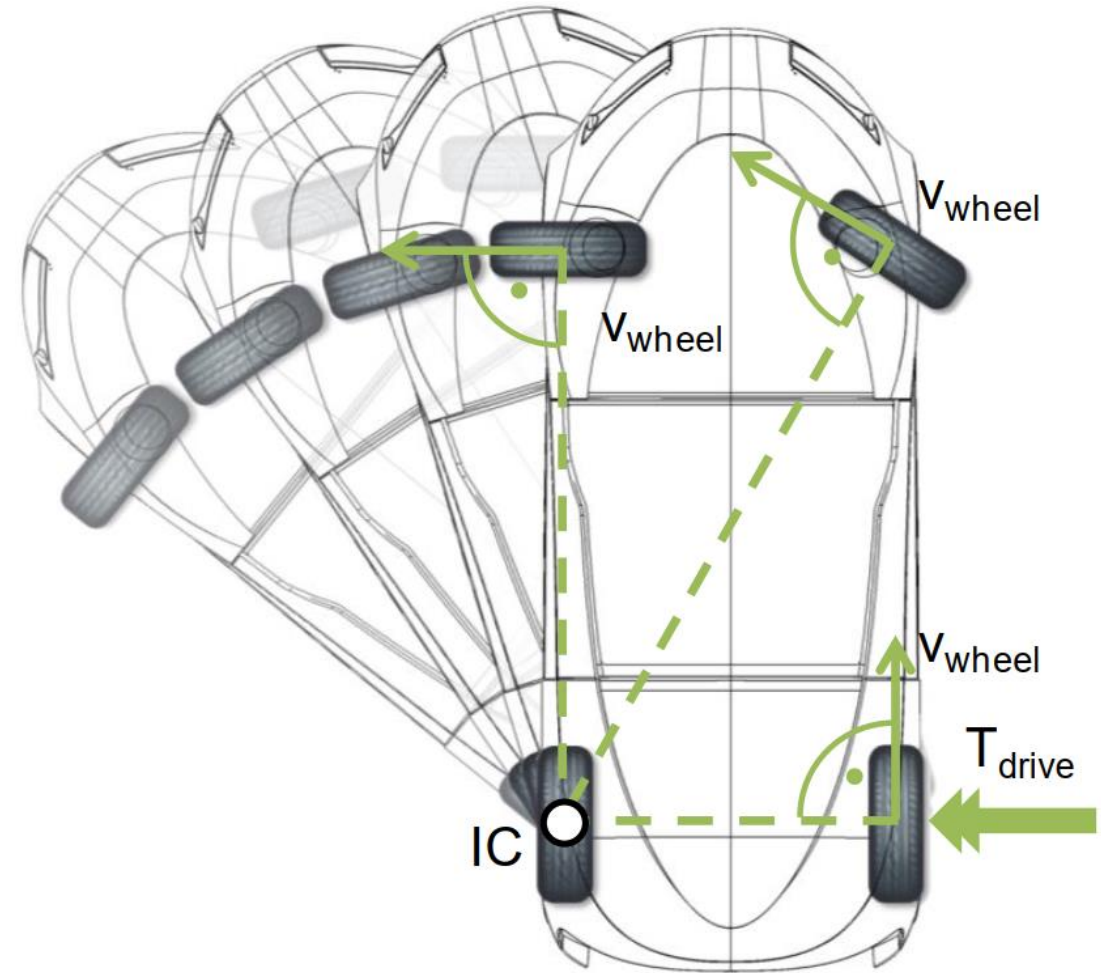
UNICARagil – Technische Daten

Dynamikmodul

- Steer-by-wire-System
- Radindividuell steuerbare Frontachse
- Sehr hohe Manövrierfähigkeit
- Lenkwinkel von -60° bis 90° bzw. -90 bis 60°
- Lenkaktuator mit einer Leistung von 3 kW
- Hohe Relevanz für Fahrzeugsicherheit

Kritische Anwendungsfälle

- Kurvenfahrt mit hoher Geschwindigkeit
 - Hohe Rückstellkräfte
- Blockade des Rads (z.B. beim Parken)
 - Blockierstrom

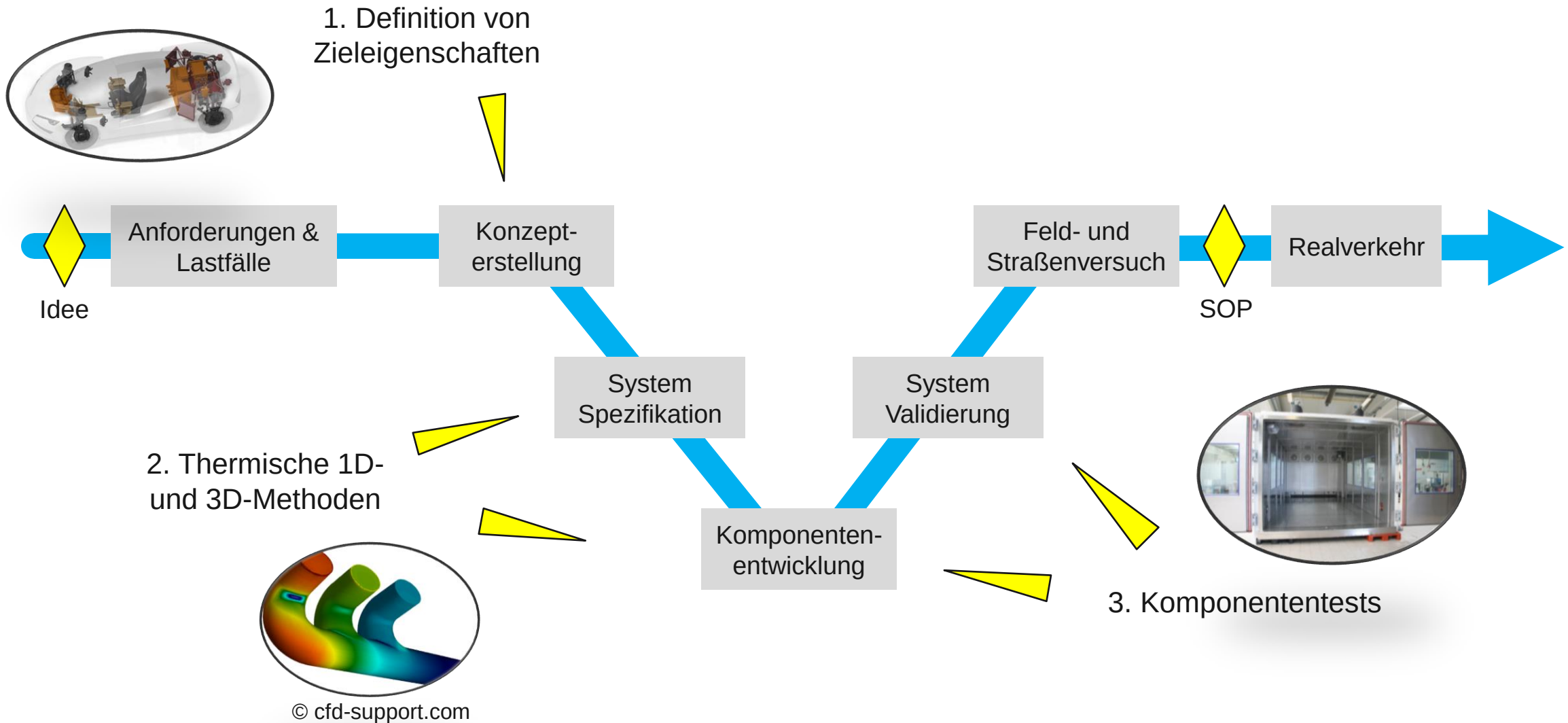


[HES13]

Agenda

- Projektvorstellung
 - Rahmen und Ziele
 - Technische Daten
- Prozesskette
 - Systembeschreibung und Randbedingungen
 - Systemanalyse
 - Auslegung der Strömungsführung
 - Geometrie der Wärmeübertrager
 - Ausblick

Prozesskette



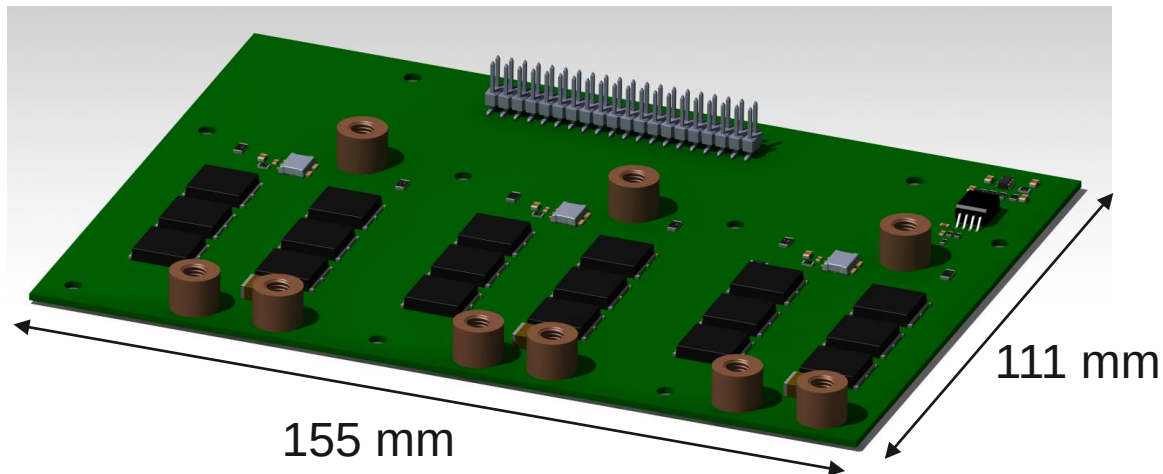
Agenda

- Projektvorstellung
 - Rahmen und Ziele
 - Technische Daten
- Prozesskette
- Systembeschreibung und Randbedingungen
- Systemanalyse
- Auslegung der Strömungsführung
- Geometrie der Wärmeübertrager
- Ausblick

Systembeschreibung und Randbedingungen

System

- Umrichter mit Power MOSFETs
- Wandlung der Bordnetz-Gleichspannung in 3-Phasen-Wechselstrom



Herausforderungen

- Package
- Strömungsführung des Kühlfluids

Technische Randbedingungen

- Betriebsspannung: 48 V
- Max. Phasenstrom: 85 A
- Betriebstemperatur: 50 – 70 °C
- Grenztemperatur: ~100 °C
- Maximal erforderliche Kühlleistung von 150 W

Konstruktive Randbedingungen

- Umrichter in Dynamikmodul integriert
- Gewährleistung der Drehbewegung des Dynamikmoduls
- Symmetrisch zur Fahrzeuglängsachse montierbare Kühlplatte
- Platine bereits auskonstruiert
- Position elektrischer Anschlüsse definiert

Agenda

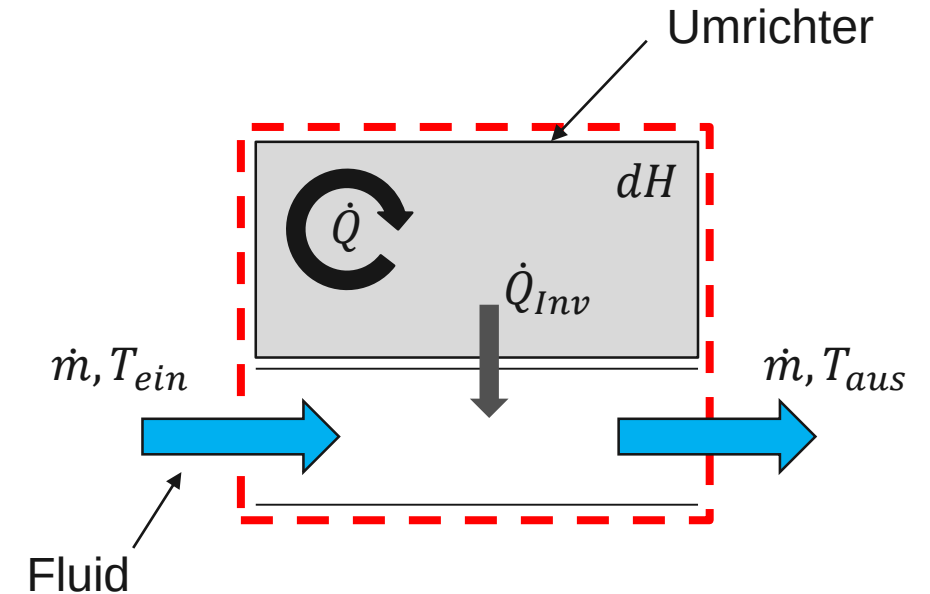
- Projektvorstellung
 - Rahmen und Ziele
 - Technische Daten
- Prozesskette
- Systembeschreibung und Randbedingungen
- Systemanalyse
- Auslegung der Strömungsführung
- Geometrie der Wärmeübertrager
- Ausblick

Abschätzung Betriebsparameter

- Abschätzung über 1D-Betrachtung des Systems
- Energiebilanz für offenes System
- Randbedingungen
 - Temperaturhomogenität ΔT_{Inv} 5 K
 - Maximale Kühlleistung $\dot{Q}_{Inv}$ 150 W
 - Massenerhaltung
 - $c_p \neq f(T)$

Konzeptauswahl

- hohe Leistungsdichte von bis zu 11 W/cm²
- Bewegtes System, Ausrichtung variiert
- Hohe erforderliche Kühlleistung bei Fahrzeugstillstand
 - Kühlung über Kühlwasser



$$\frac{d}{dt}H = 0 = \sum_i \dot{m}_i h_i + \sum_j \dot{Q}_j$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{KW} \cdot c_{p,KW} \cdot (T_{KW,aus} - T_{KW,ein}) = \dot{Q}_{Inv}$$

$$\Rightarrow \dot{V}_{max} \approx 1,5 \frac{l}{min}$$

Agenda

- Projektvorstellung
 - Rahmen und Ziele
 - Technische Daten
- Prozesskette
- Systembeschreibung und Randbedingungen
- Systemanalyse
- Auslegung der Strömungsführung
- Geometrie der Wärmeübertrager
- Ausblick

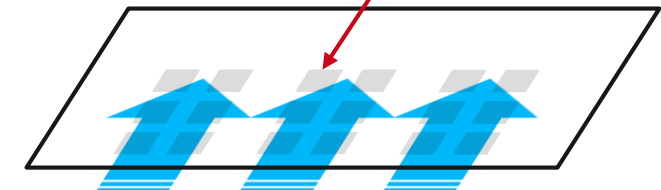
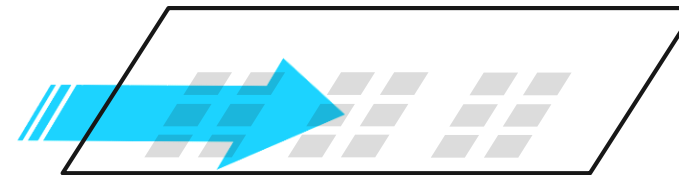
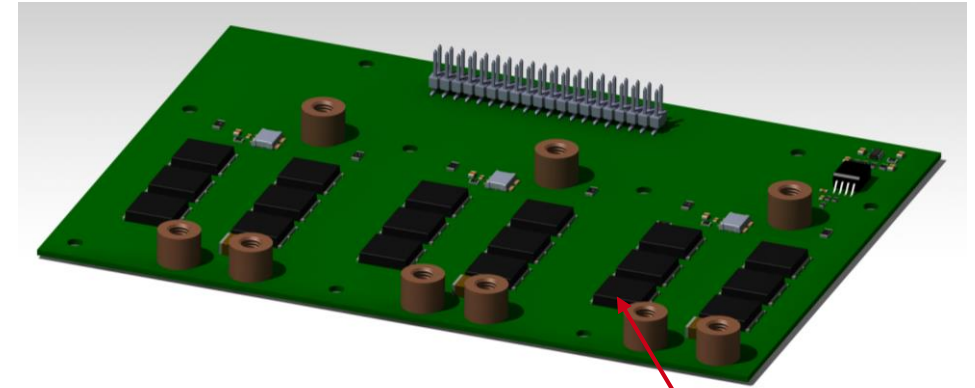
Auslegung der Strömungsführung

Möglichkeiten

- Serielle Durchströmung
 - + Einfache Strömungsführung
 - Temperaturhomogenität
- Parallele Durchströmung
 - + Verbesserte Temperaturhomogenität
 - Aufwendige Strömungsführung

Auslegungskriterien

- Lebensdauer & Funktion
 - Einhaltung von Grenztemperaturen
 - Temperaturhomogenität
- Package
 - Parallele Durchströmung



Wärmeeintragende
Flächen

Auslegung der Strömungsführung

Anordnung hydraulischer Anschlüsse

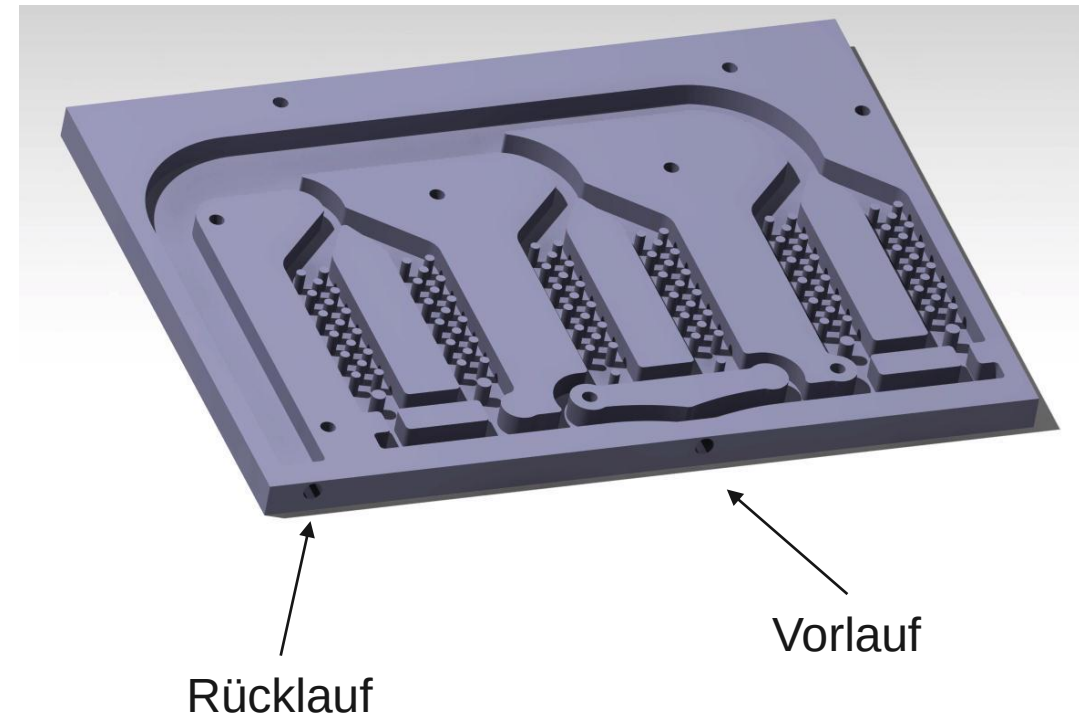
- Konstruktive Randbedingungen
 - Drehbewegung Dynamikmodul
 - Symmetrie zur Fahrzeuglängsachse
 - Zentraler Vorlauf / Seitlicher Rücklauf

Herausforderung

- Anordnung der Anschlüsse führt zu Druckgefälle
 - Ungleiche Einzelmassenströme

Maßnahmen

- Symmetrische Prallplatte am Zulauf
- Verteilerbecken für homogenen Druck vor Kanaleintritt
- Hydraulischer Abgleich



Auslegung der Strömungsführung

Symmetrische Prallplatte

- Symmetrischer Impuls
- Aufteilung des Volumenstroms

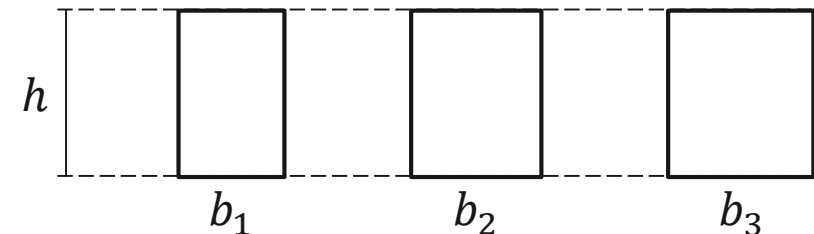
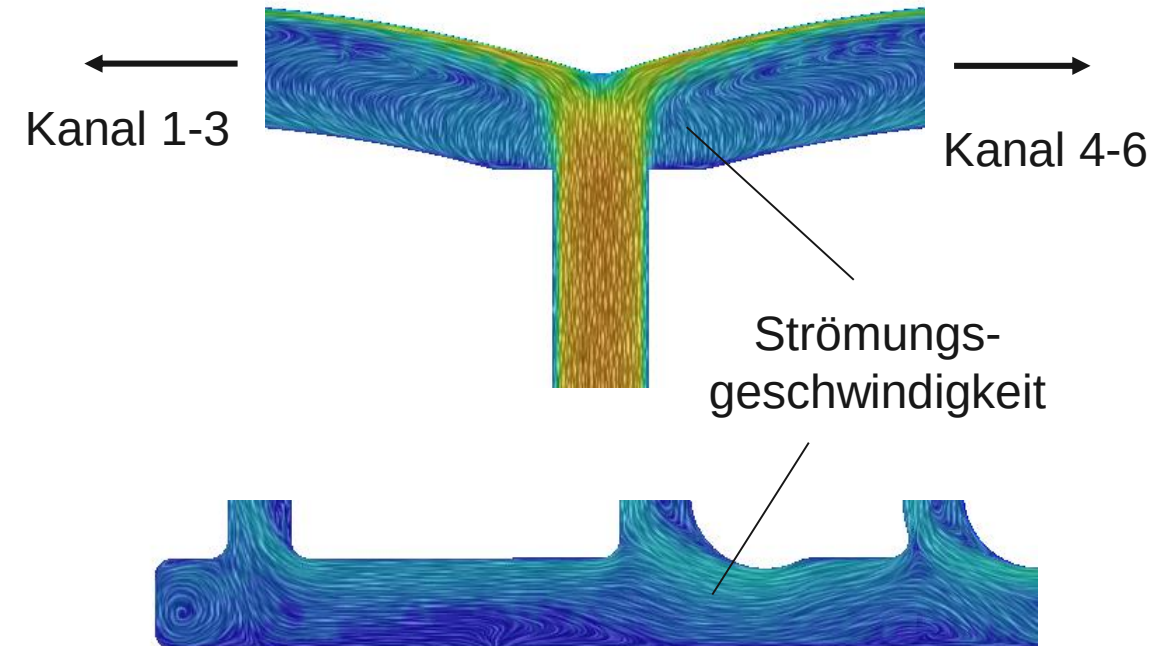
Verteilerbecken

- Verhinderung direkter Strömung in die äußeren Kanäle
- Erzeugung eines Gegendrucks
- Laminare Strömung in Kühlkanäle hinein

Hydraulischer Abgleich

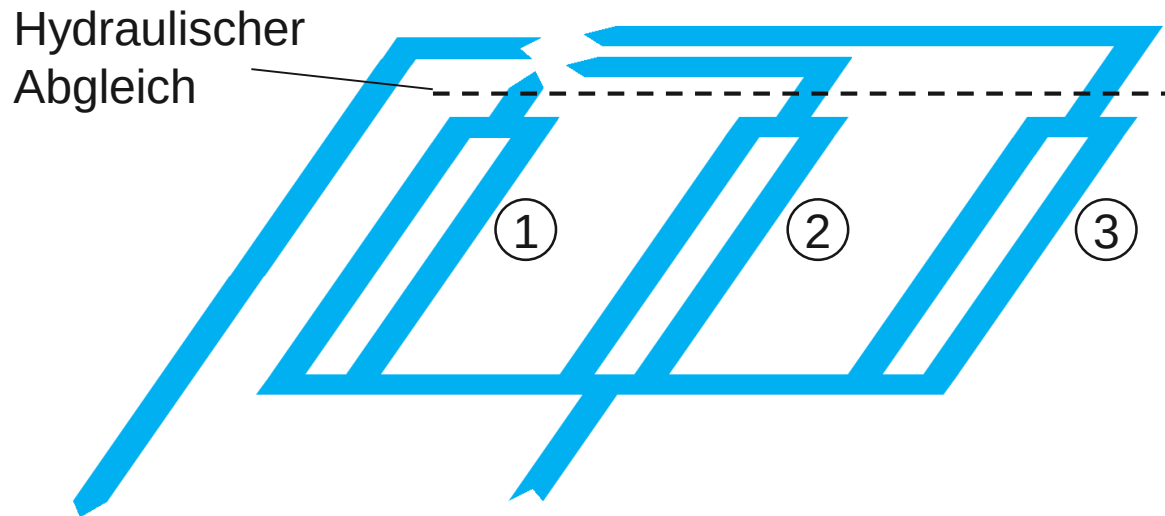
- Bernoullische Druckgleichung
- Herbeiführung gleicher Druckverluste über die Kanäle

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p_3$$



Hydraulischer Abgleich

- Angleichen der Verluste über dynamischen Druck
- Package erlaubt keine symm. Strömungsführung
 - Unterschiedliche Kanallängen
 - Druckgefälle Kanal 3 → Kanal 1



Bernoullische Druckgleichung

$$p_0 + \frac{\rho}{2} v_0^2 = p_{1,2,3} + \frac{\rho}{2} v_{1,2,3}^2 \left(1 + \lambda \frac{l_{1,2,3}}{d_{1,2,3}} \right)$$

$$\left| p_1 \stackrel{!}{=} p_2 \stackrel{!}{=} p_3 \right.$$

$$\Leftrightarrow v_1^2 \left(1 + \lambda \frac{l_1}{d_1} \right) = v_3^2 \left(1 + \lambda \frac{l_3}{d_3} \right)$$

$$\left| \dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \right.$$

$$\left| d_{hydr.} = 4A/2(b + h) \right.$$

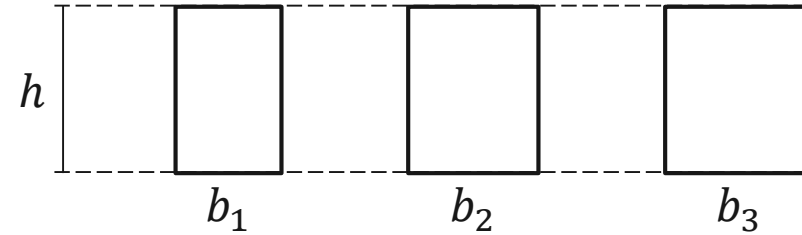
$$\frac{1}{A_1^2} \cdot \left(1 + \lambda \frac{2l_1(b_1 + h)}{4 \cdot A_1} \right) = \frac{1}{A_3^2} \cdot \left(1 + \lambda \frac{2l_3(b_3 + h)}{4 \cdot A_3} \right)$$

$$b_1 = 4,5 \text{ mm} \Rightarrow b_2 = 5,2 \text{ mm}, b_3 = 5,8 \text{ mm}$$

Auslegung der Strömungsführung

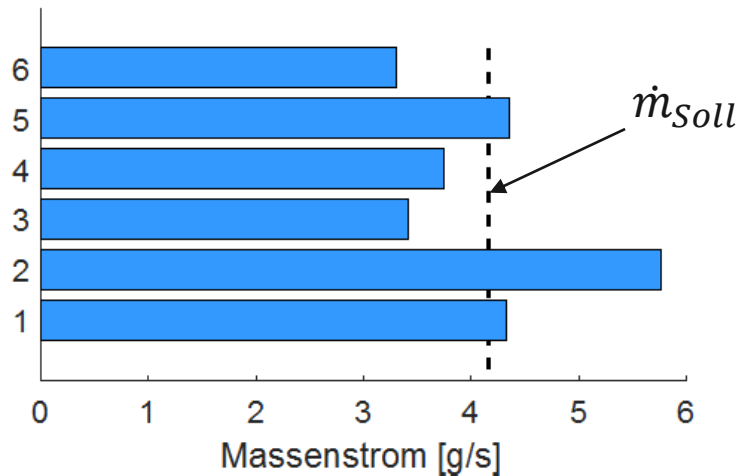
Massenstromverteilung

- Gesamtmassenstrom @150 W: 25 g/s
- Soll-Einzelmassenstrom: 4,17 g/s



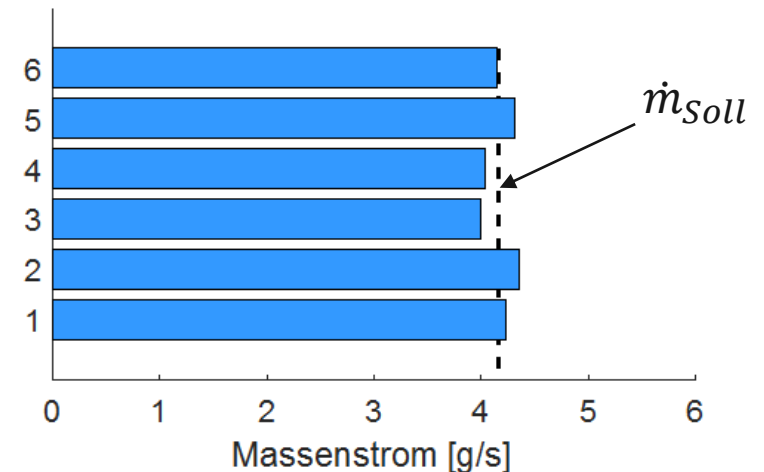
Ohne hydraulischen Abgleich

- $A_1 = A_2 = A_3$
- Maximale Abweichung $\dot{m}_{Soll}$: 28 %



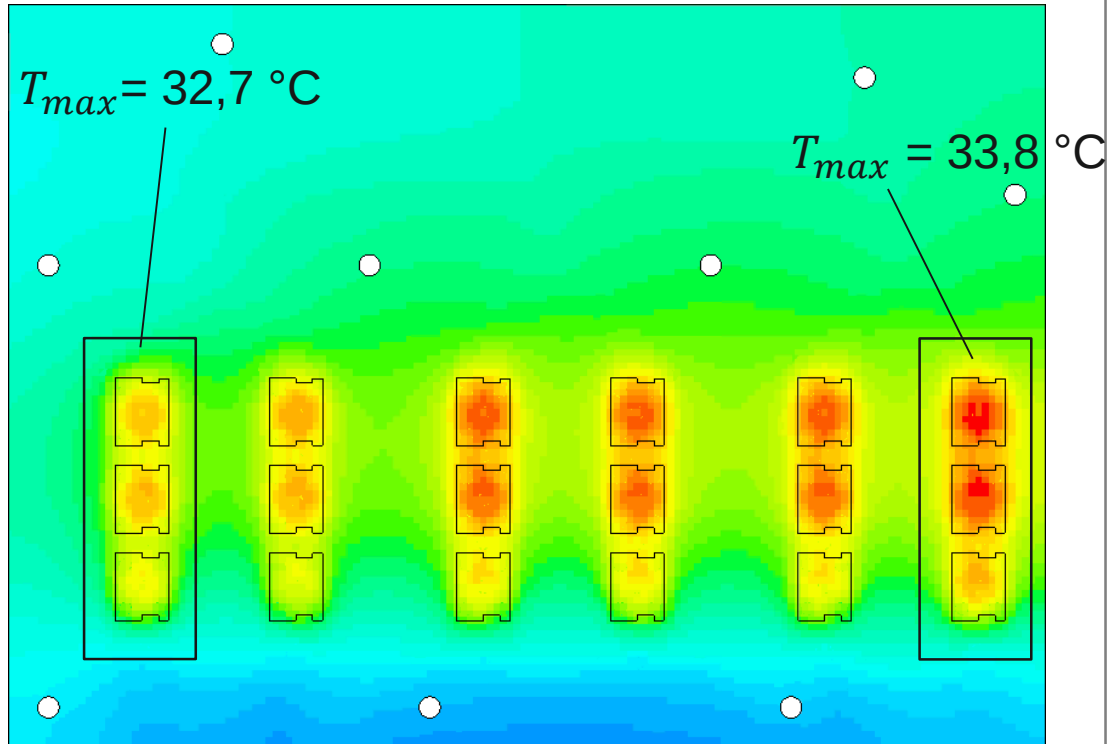
Mit hydraulischem Abgleich

- $A_1 < A_2 < A_3$
- Maximale Abweichung $\dot{m}_{Soll}$: 4 %

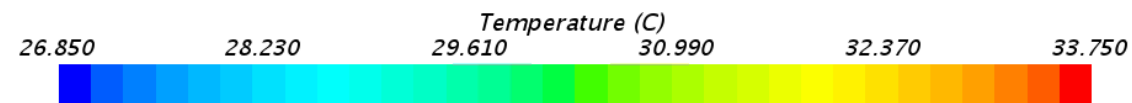
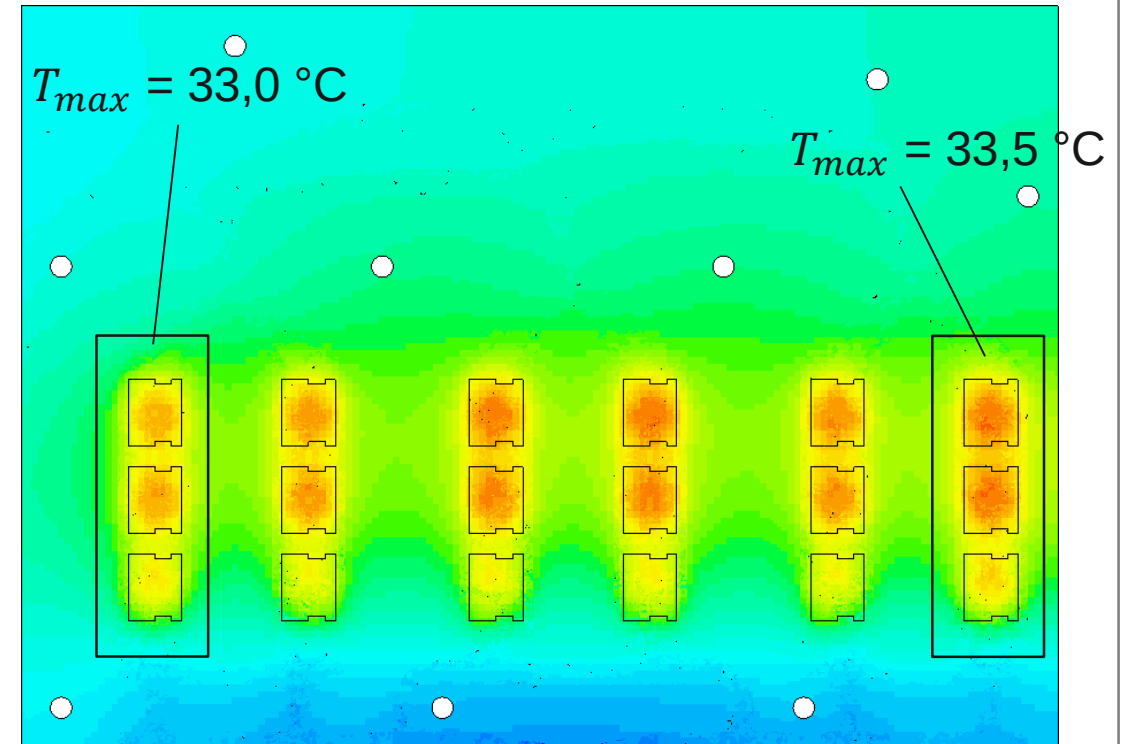


Auslegung der Strömungsführung

Ohne hydraulischen Abgleich



Mit hydraulischem Abgleich

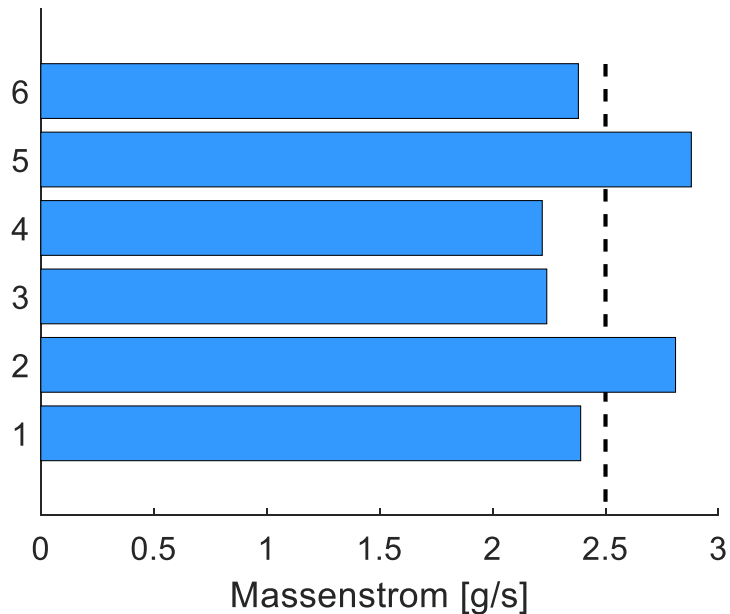


Variation des Volumenstroms

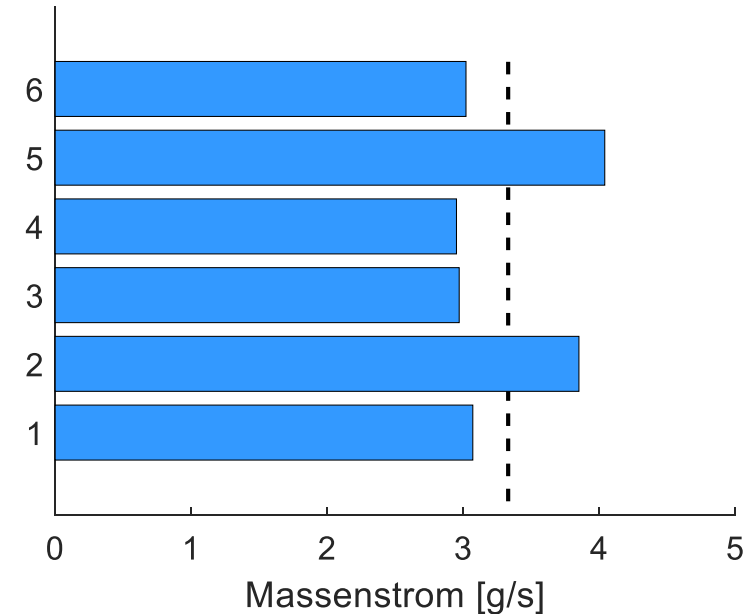
Ziel

- Gleichverteilung des Volumenstroms über breiten Betriebsbereich
 - Volumenstromunabhängige Temperaturhomogenität

- Massenstrom $\dot{m}$ 15 g/s

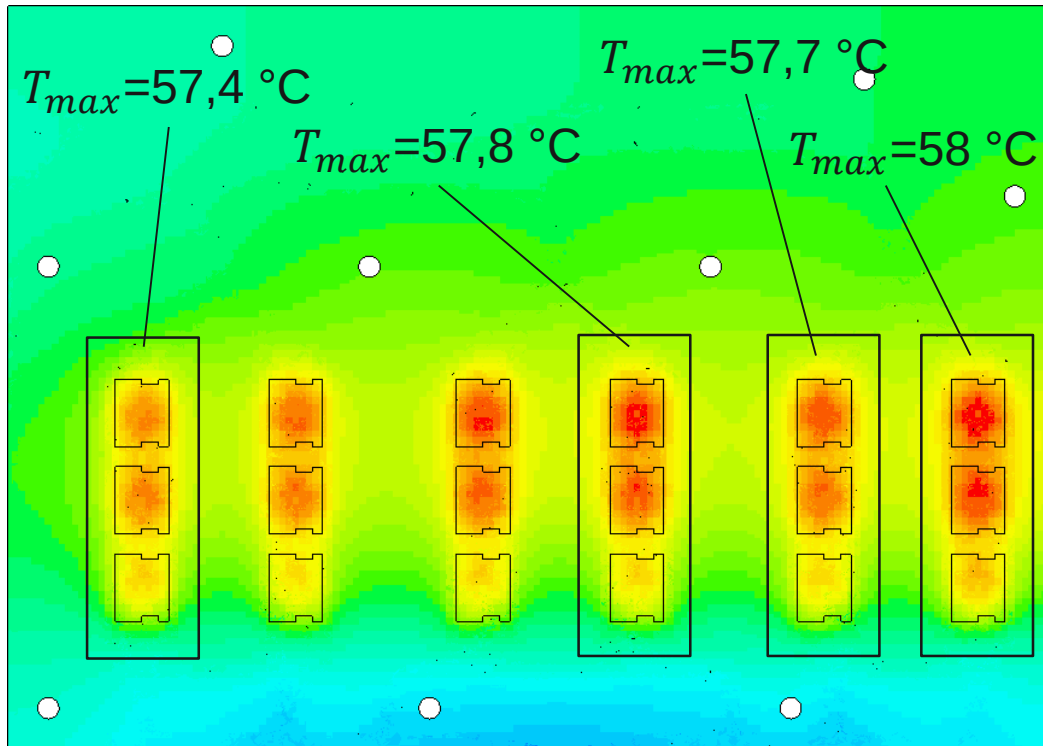


- Massenstrom $\dot{m}$ 20 g/s



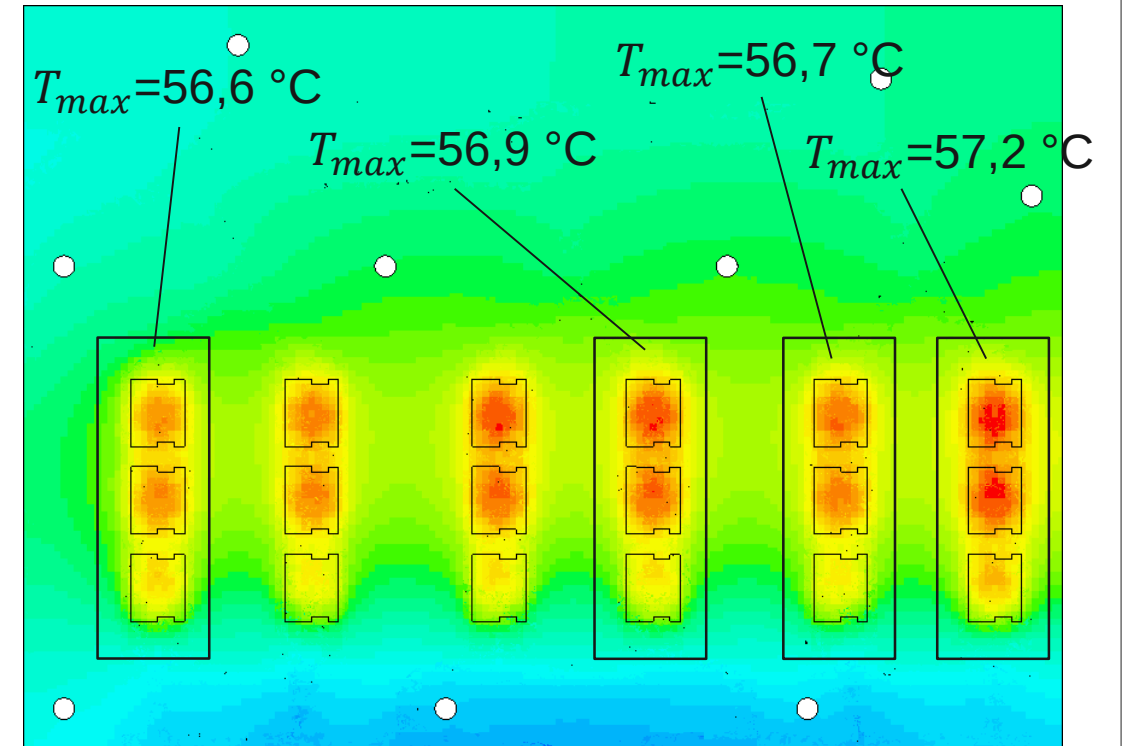
Variation des Volumenstroms

Massenstrom 15 g/s

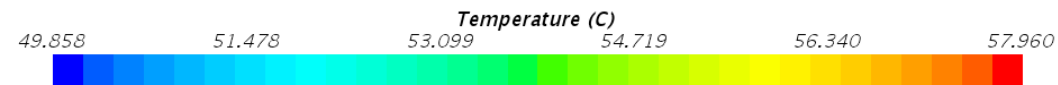


■ Temperatur Min/Max 57,4 / 58 °C

Massenstrom 20 g/s



■ Temperatur Min/Max 56,6 / 57,2 °C



Agenda

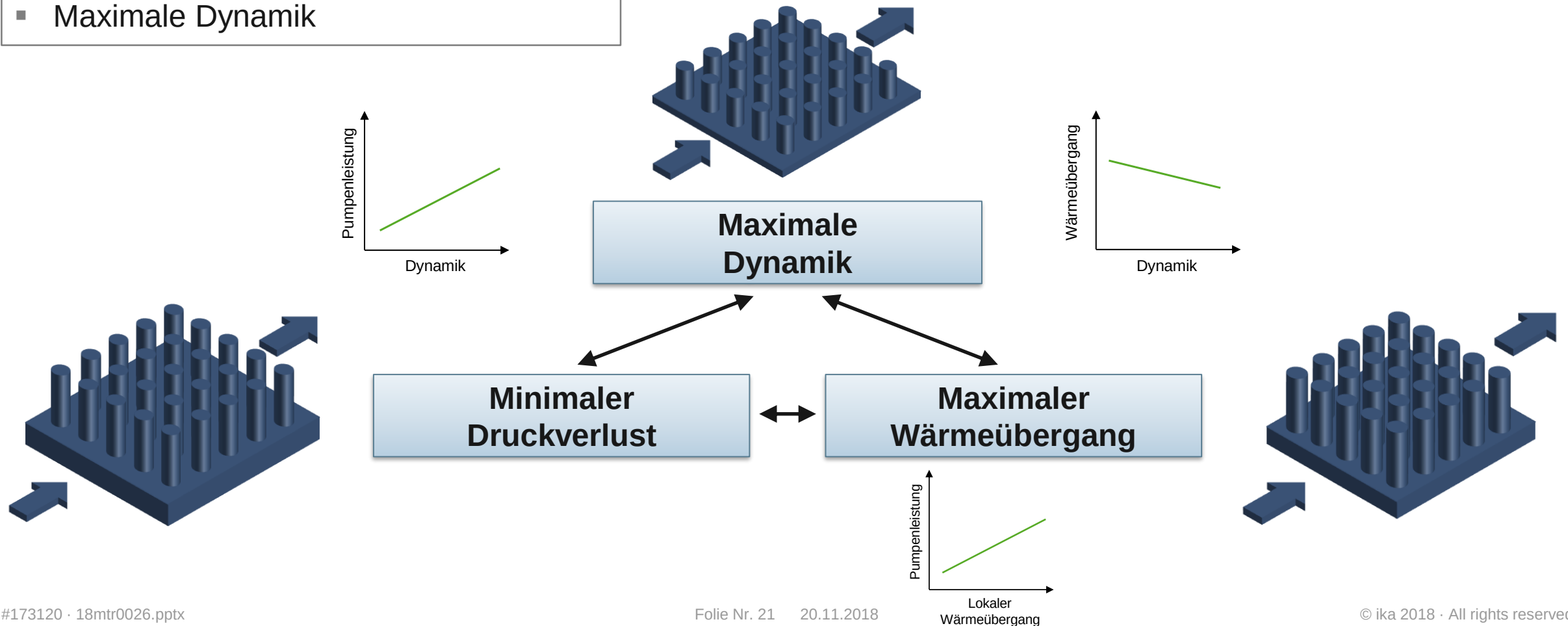
- Projektvorstellung
 - Rahmen und Ziele
 - Technische Daten
- Prozesskette
- Systembeschreibung und Randbedingungen
- Systemanalyse
- Auslegung der Strömungsführung
- Geometrie der Wärmeübertrager
- Ausblick

Geometrie der Wärmeübertrager

Zielkonflikt der Eigenschaften

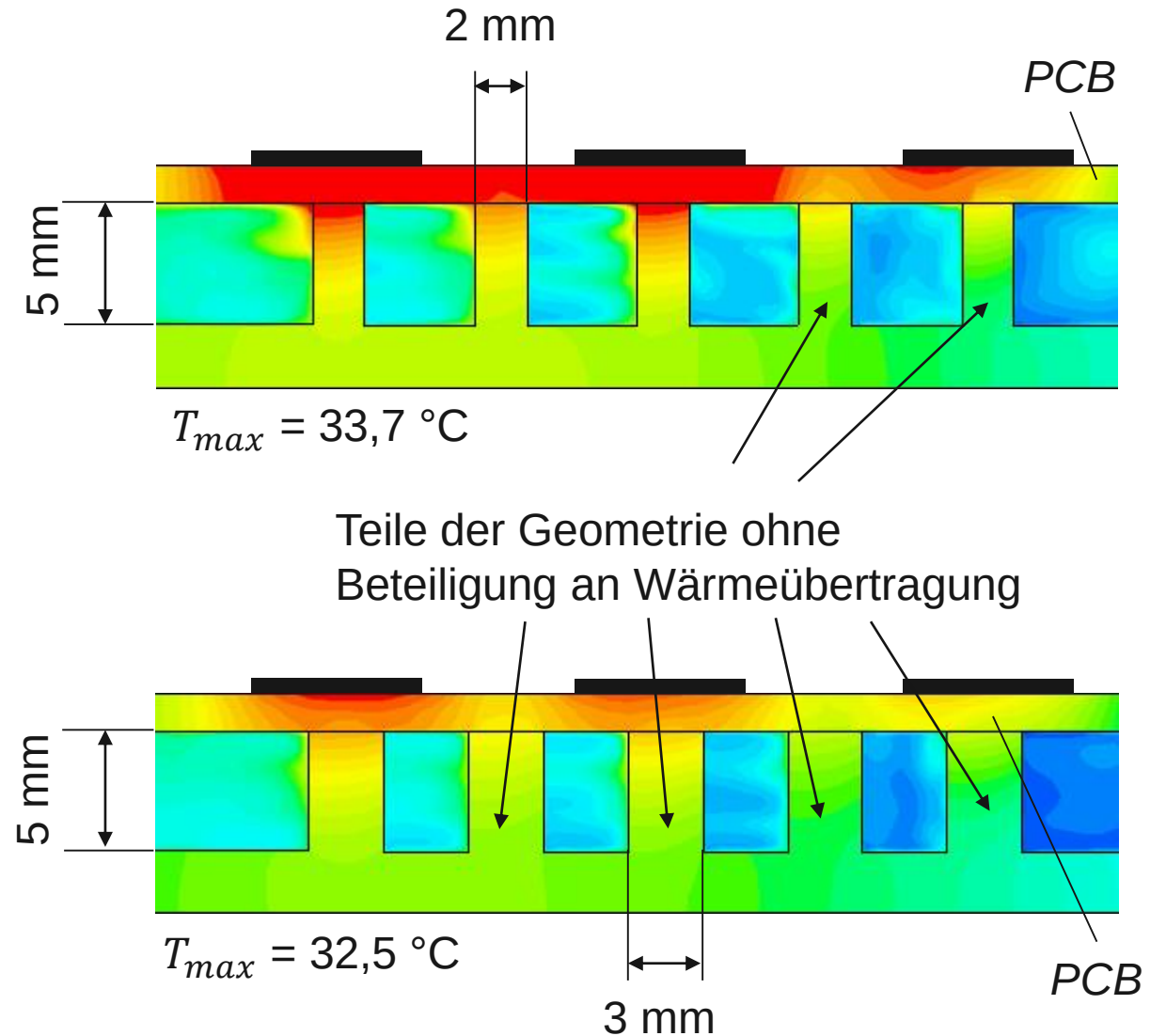
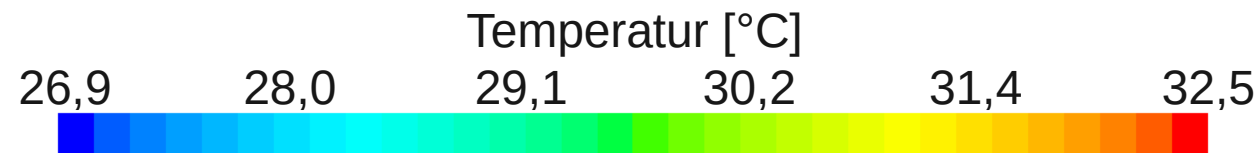
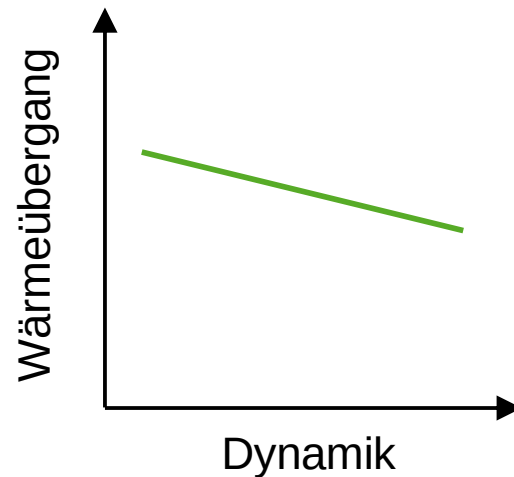
Zieleigenschaften

- Minimaler Druckverlust
- Maximaler Wärmeübergang
- Maximale Dynamik



Maximale Dynamik

- Reduzierung der Materialstärke
- Reduzierung der thermischen Masse
- Reduzierung des Strömungsquerschnitts

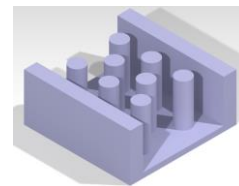
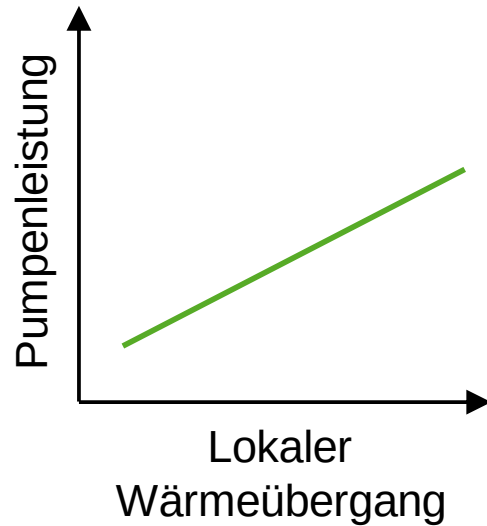


Geometrie der Wärmeübertrager

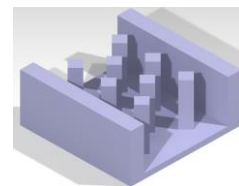
Druckverlust und Wärmeübergang

Minimaler Druckverlust

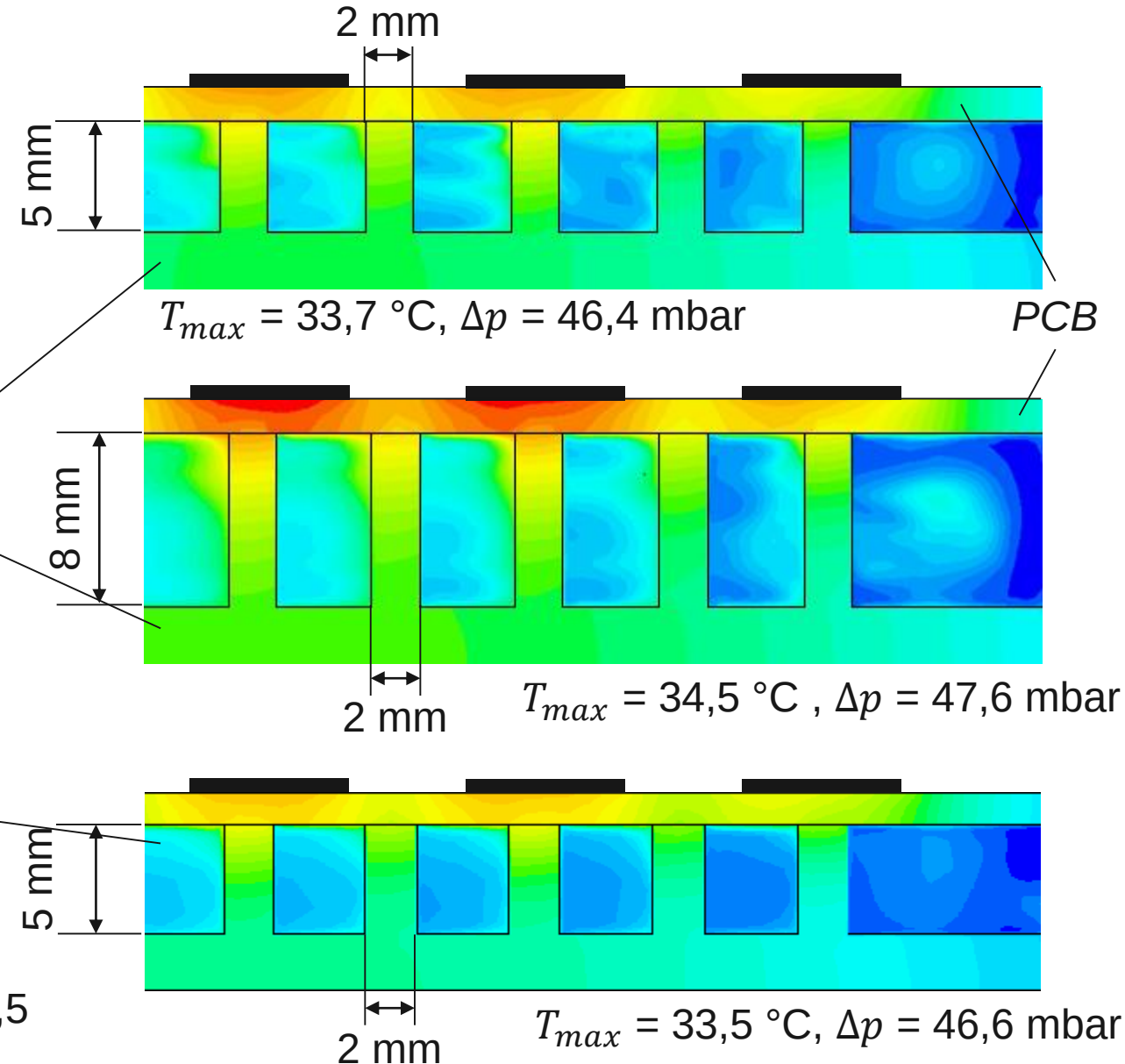
- Reduzierung der Turbulenz
- Reduzierung der wärmeübertragenden Fläche
- Vergrößerung des Strömungsquerschnitts



Variante 2



Variante 3



Geometrie der Wärmeübertrager

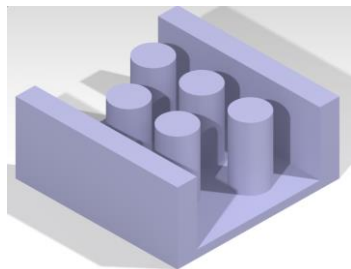
Geometrievariation der Kühlkörper

Variation

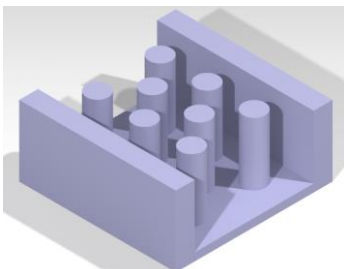
- Geometrie (Grundfläche, Höhe, etc.)
- Anzahl
- Anordnung

Betriebspunkt

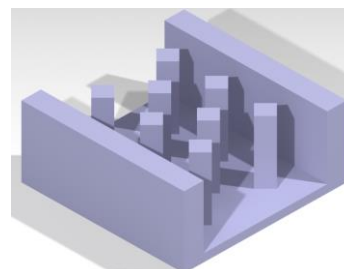
- Volumenstrom $\dot{V}_{KW}$ 1,5 l/min @ 27 °C
- Wärmestrom $\dot{Q}_{Inv}$ 150 W



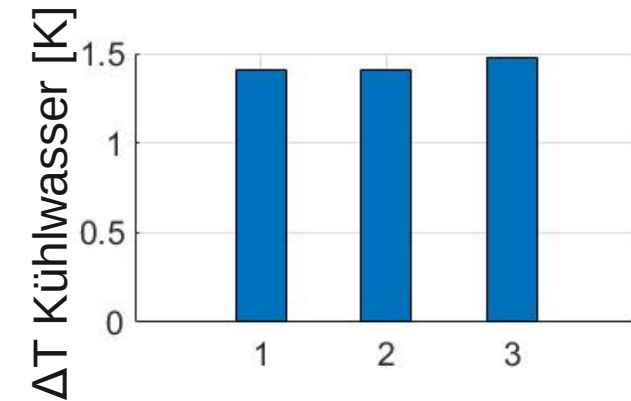
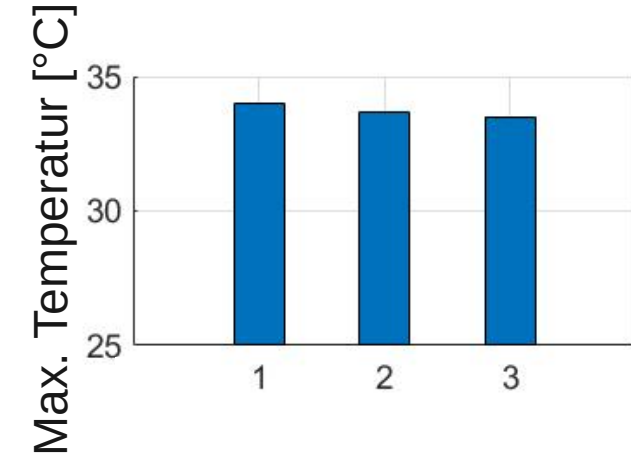
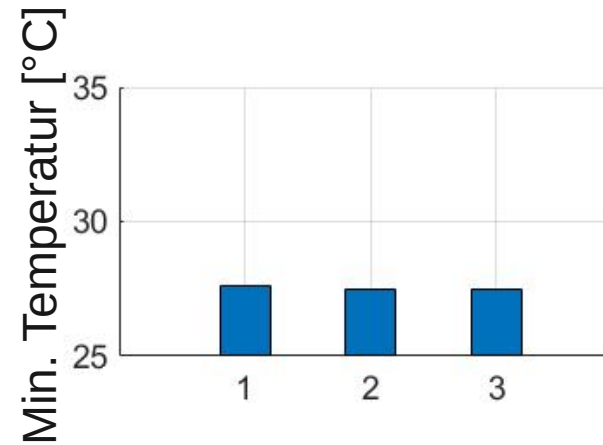
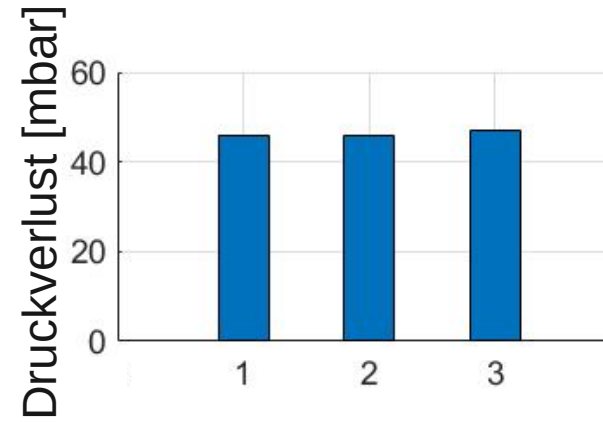
Variante 1



Variante 2



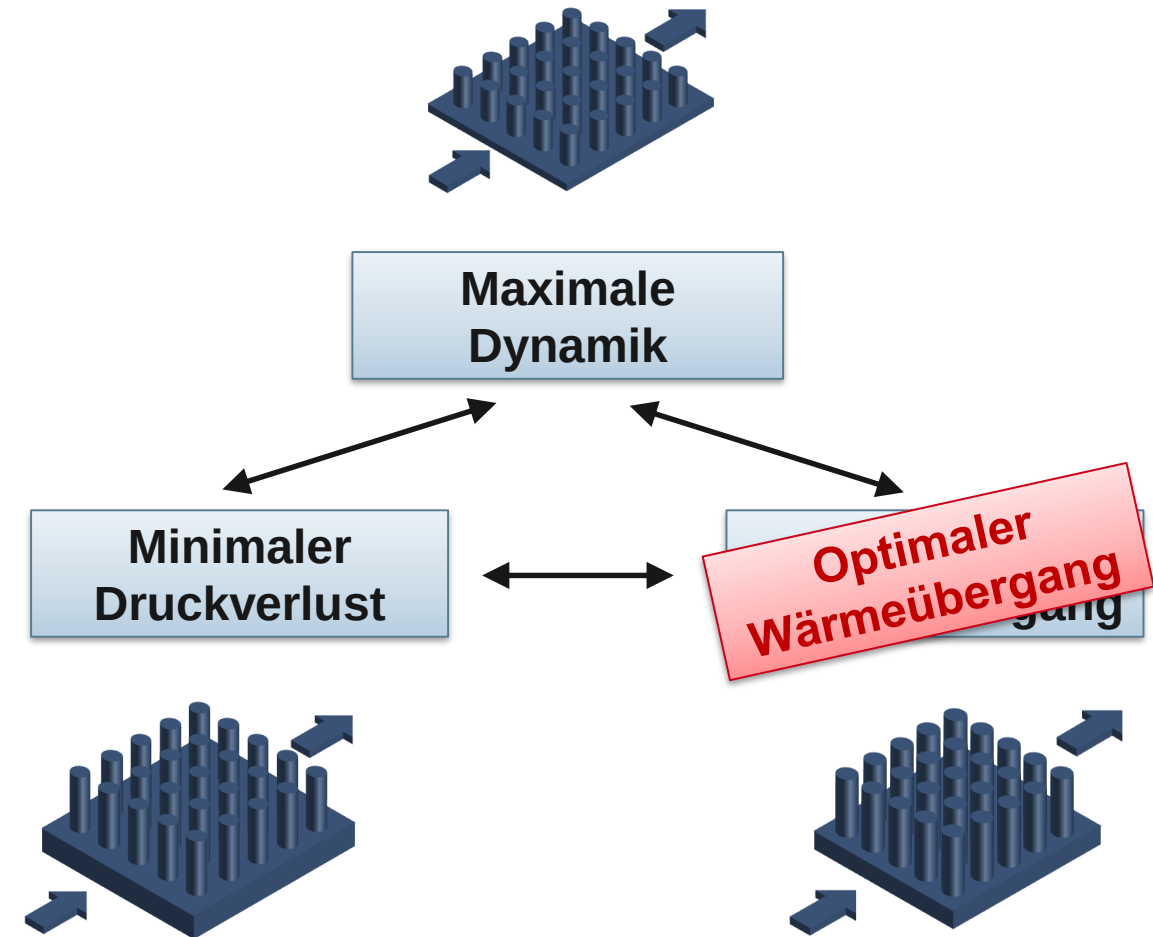
Variante 3



Geometrie der Wärmeübertrager

Zielkonflikt der Eigenschaften

	Minimaler Druckverlust	Maximaler Wärmeübergang	Maximale Dynamik
Turbulenz			
wärmeübertragende Fläche			
Strömungsquerschnitt			
Materialstärke			
Therm. Masse			



Agenda

- Projektvorstellung
 - Rahmen und Ziele
 - Technische Daten
- Prozesskette
- Systembeschreibung und Randbedingungen
- Systemanalyse
- Auslegung der Strömungsführung
- Geometrie der Wärmeübertrager
- Ausblick

Montage Fluidkonnektoren

- Geringe Bauhöhe der Kühlplatte
 - Axiale Montage der Konnektoren schwierig
 - Abwägung senkrechte/axiale Einströmung
- Einschraub- vs. Lötverbindung

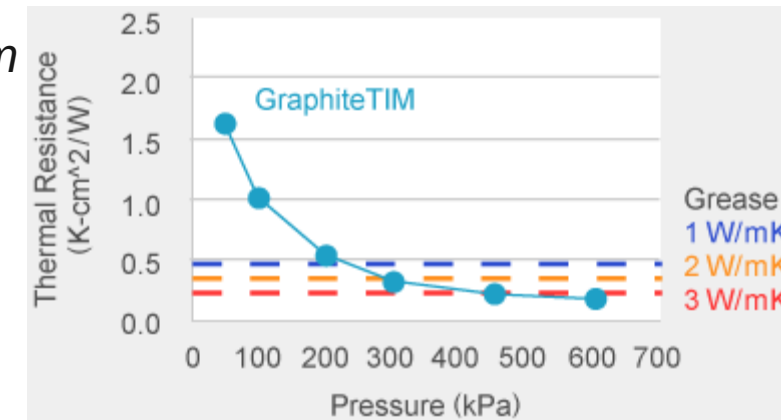


© indiamart.com

Montage Kühlplatte

- Abdichtung der Kühlplatte direkt durch Platine
- Abdichtung durch zusätzlichen Deckel
 - Fügeverfahren Laserschweißen
 - TIM-Layer für Reduzierung des Kontaktwiderstands

© panasonic.com



Komponententests

- Tests unter verschiedenen klimatischen Bedingungen in Batterieklimakammer

Kontakt

Marten Trenktrog, M.Sc.

Institut für Kraftfahrzeuge
RWTH Aachen University
Steinbachstraße 7
52074 Aachen

Telefon +49 241 80 25708
Fax +49 241 80 22147

E-Mail marten.trenktrog@ika.rwth-aachen.de
Internet www.ika.rwth-aachen.de

- [HES13] L. Hesse, B. Schwarz, M. Klein, L. Eckstein
The Wheel-Individually Steerable Front Axle
of the Research Vehicle SpeedE
22nd Aachen Colloquium Automobile and
Engine Technology 2013, Aachen, Oktober
2013
- [GIN13] A.E. Ginart, I. N. Ali, J. R. Celaya, P. W.
Kalgren, S. D. Poll, M. J. Roemer
Modeling SiO₂ Ion Impurities Aging in
Insulated Gate Power Devices Under
Temperature and Voltage Stress
Annual Conference of the Prognostics and
Health Management Society, 2010