

# Entwicklung und experimentelle Untersuchung von thermischen Energiespeichern auf Basis von Feststoffen zur alternativen Wärmeversorgung in batterieelektrischen Fahrzeugen

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Institut für Technische Thermodynamik

**Volker Dreißigacker, Jürgen Haunstetter, Sergej Belik**

Technische Akademie Esslingen

4. Fachtagung Fahrzeugklimatisierung, 09. – 10. Dezember 2020








# Institute of Engineering Thermodynamics

## Thermal Process Technology

### Abteilung – Thermische Prozesstechnik: Kerntechnologien

- Sensible thermal energy storage: Solid media / Molten salt
- Latent heat energy storage with salts
- Thermochemical systems (utilization of reversible gas-solid-reactions)
- High temperature heat exchangers

<b>Thermal Power Plant Components</b> <i>Dr. Stefan Zunft</i>	<b>Thermal Systems for Fluids</b> <i>Dr. Thomas Bauer</i>	<b>Thermal Systems with Phase Change</b> <i>Dr. Dan Bauer</i>	<b>Thermochemical Systems</b> <i>Dr. Marc Linder</i>	<b>Technology Implementation</b>
				
<b>Regenerator and solid state storage</b> <b>High temperature heat exchangers</b>	<b>Molten salt storage</b>	<b>Latent heat storage</b> <b>PXP storage</b>	<b>Thermochemical Storage</b> <b>Chemical Heat Pumps</b>	<b>3<sup>rd</sup> life of coal-fired power plants</b>



# Thermische Prozesstechnik

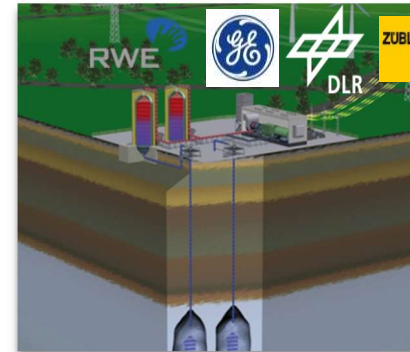
## Thermische Energiespeicher in der Kraftwerkstechnik (Beispiele)



Flexibilisierung konventioneller Kraftwerke



Speichertechnik für CSP



Großmaßstäbliche elektrische Speicher (A-CAES, Carnot-Batterien, ...)



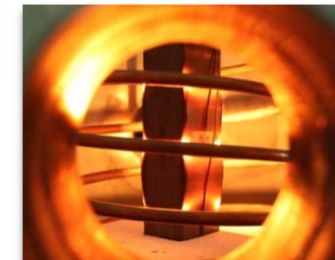
DLR-Technikumsanlagen

### Frage

- Gibt es einen Bedarf an thermischen Energiespeichern im Verkehr?
- Lassen sich thermische Speichertechnologien aus dem Kraftwerksbereich in den Verkehrssektor übertragen?



Abwärmenutzung und Wärmemanagement für Industrieprozesse

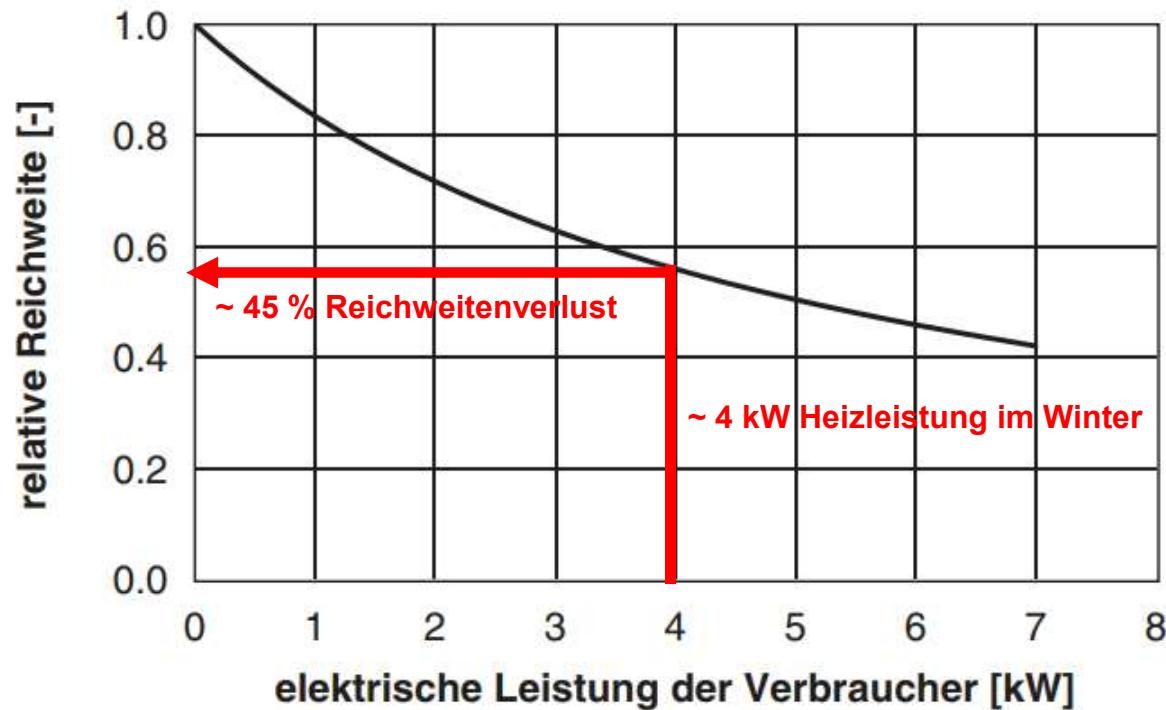


Power-to-Heat (PtH)



# Thermische Energiespeicher im Verkehr

## Beispiel: Wärmeversorgung batterieelektrischer Fahrzeuge



[H. Grossmann, Pkw – Klimatisierung – Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung, Berlin Heidelberg: Springer, 2013]

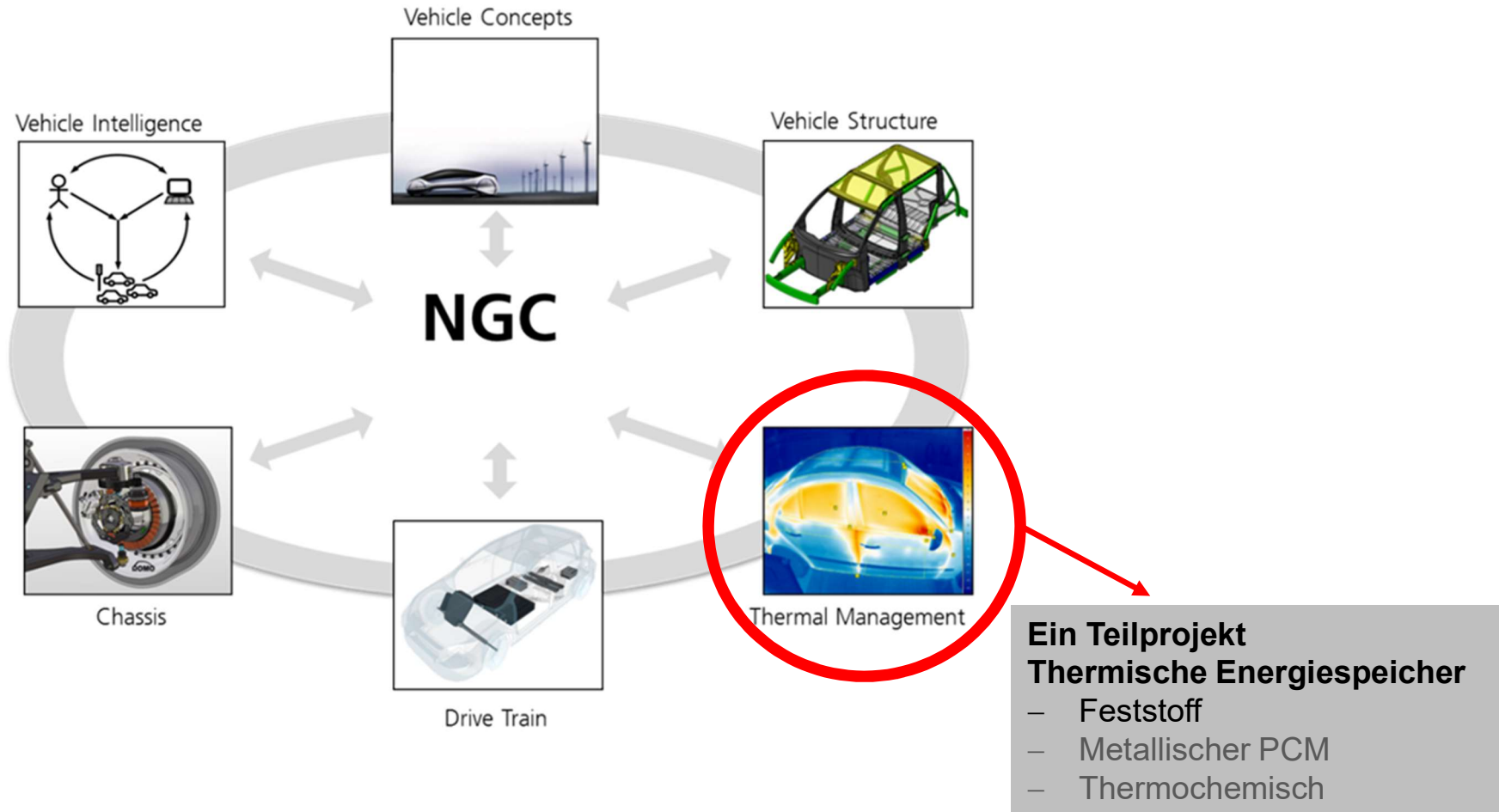
**Antwort**

**Ja, Bedarf an thermischen Energiespeichern ist vorhanden**



# DLR-Projekt: Next Generation Car (NGC)

## Übersicht

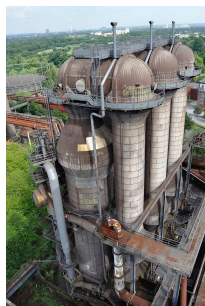


# Sensibler Wärmespeicher (Feststoff)

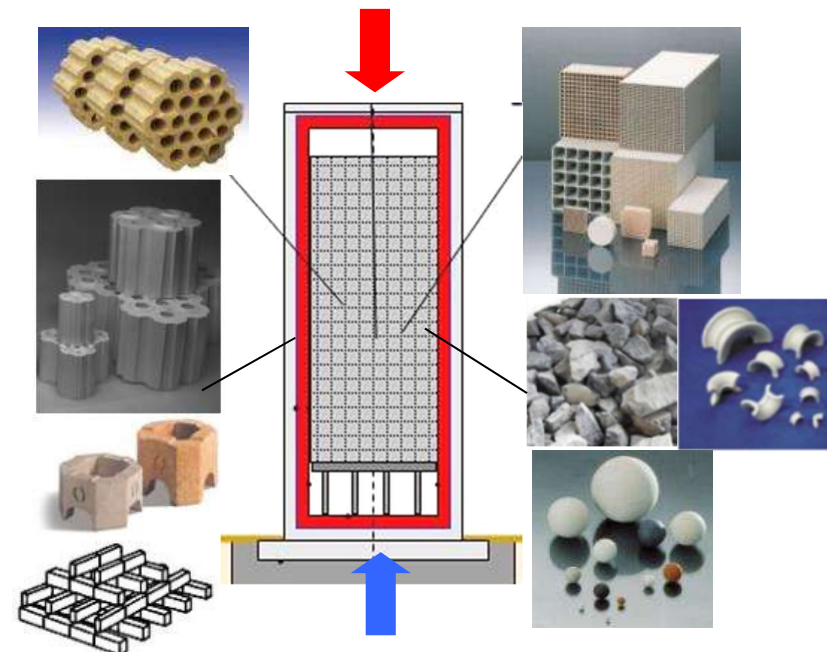
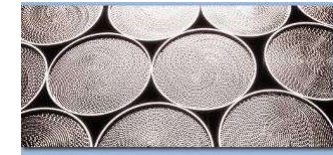
## Hintergrund

### Zentrale Charakteristika

- Einsatztemperaturen: - 200 °C – 1500 °C
- Gasförmige Wärmeträger
- Vielfältige Inventaroptionen und Materialien
- Direktkontakt zw. Speicher und Wärmeträger
  - Effiziente Wärmeübertragung
- Robuste und kostengünstige Aufbauten
- Kommerzielle Anwendungen in Industrieprozessen (s. Winderhitzer)



Winderhitzer



# Sensibler Wärmespeicher (Feststoff)

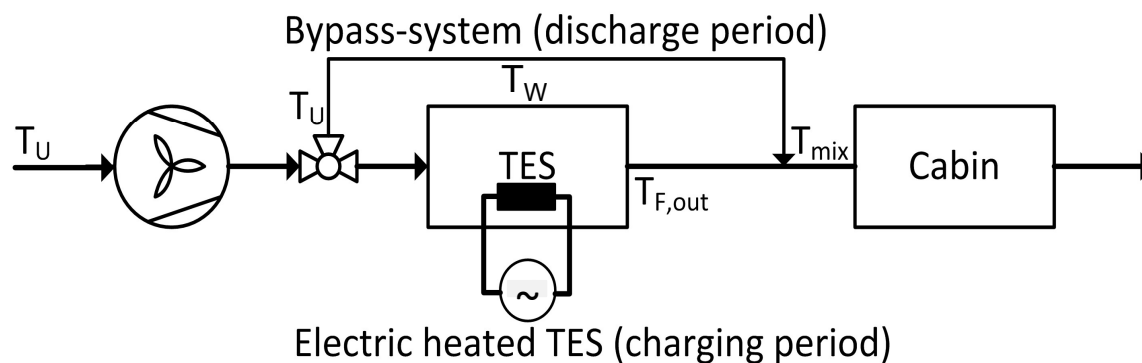
Anwendung: Wärmeversorgung batterieelektrischer Fahrzeuge

## Ziel

- Konzeptentwicklung: **Thermischer EnergieSpeicher (TES)** für BEV
- Kompakte Speichersysteme mit hohen Speicherdichten
- Bewertung im Vergleich zu heutigen batteriegespeisten Heizsystemen

## Konzept

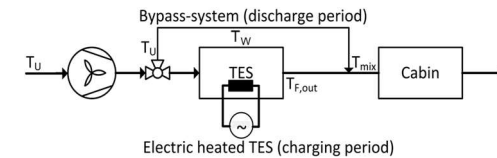
- Beladung: elektrische Beheizung eines Feststoffspeichers auf hohe Temperaturen
- Entladung: Bypass für konstante Entlade-Austrittstemperatur ( $T_{mix}$ )



$\dot{Q}$ [kW <sub>th</sub> ]	5
$T_U$ [°C]	-10
$T_{mix}$ [°C]	60
$\tau$ [min]	30
$T_W$ [°C]	60
$\Delta p$ [mbar]	10

Spezifikationen: Entladung



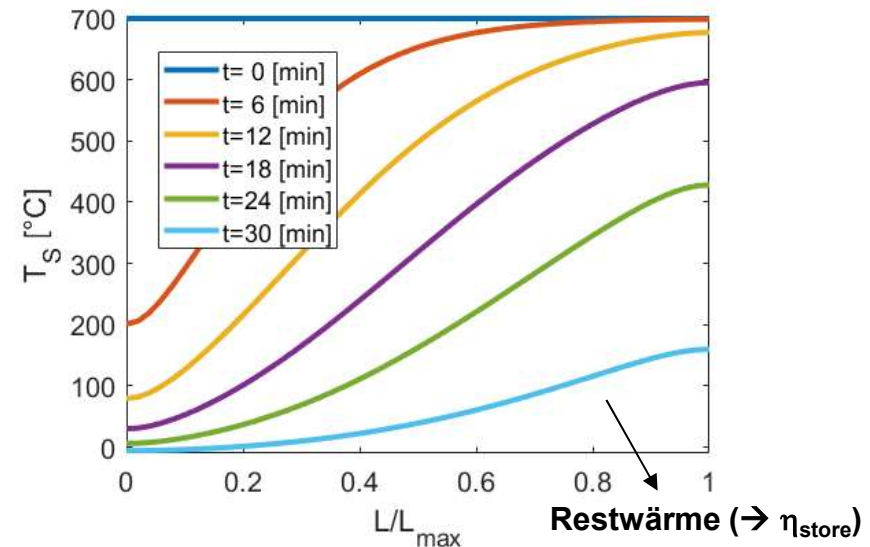
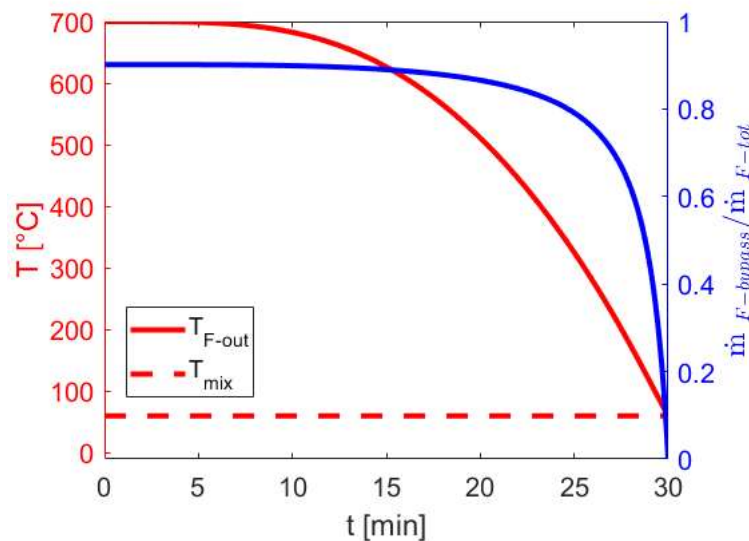


# Sensibler Wärmespeicher (Feststoff)

## Simulation: Entladung

**Anfangsbedingung:** 700 °C homogene Starttemperatur (exemplarisch)

**Inventar:** spezifische Oberfläche = 400 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, Hohlraum = 40 %, L/D = 4



### Ergebnis

- Zunahme des TES-Massenstroms mit abnehmender TES-Austrittstemperatur ( $T_{F-out}$ )
- Ende der Entladung: 100 % Massenstrom durch TES
- Nicht die komplette thermische Energie wird entladen (→ **Speicherausnutzung  $\eta_{store}$** )

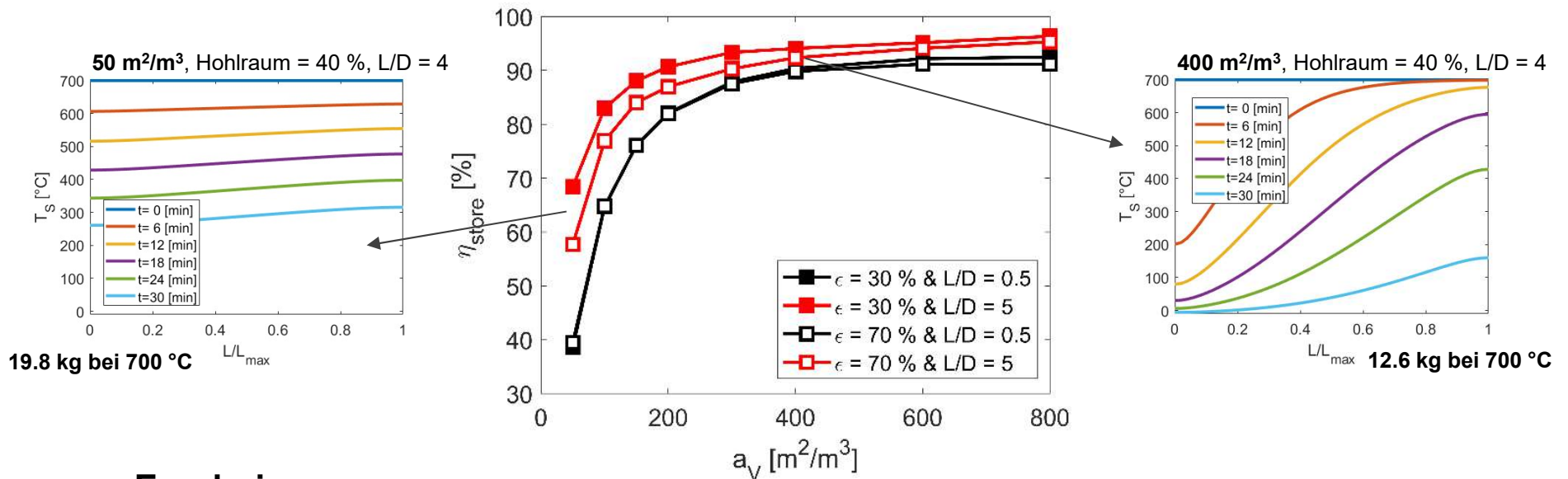




# Sensibler Wärmespeicher (Feststoff)

Simulation: Entladung

**Variationsstudie:** spezifische Oberfläche ( $a_V$ ), Hohlraum ( $\epsilon$ ), L/D-Verhältnis



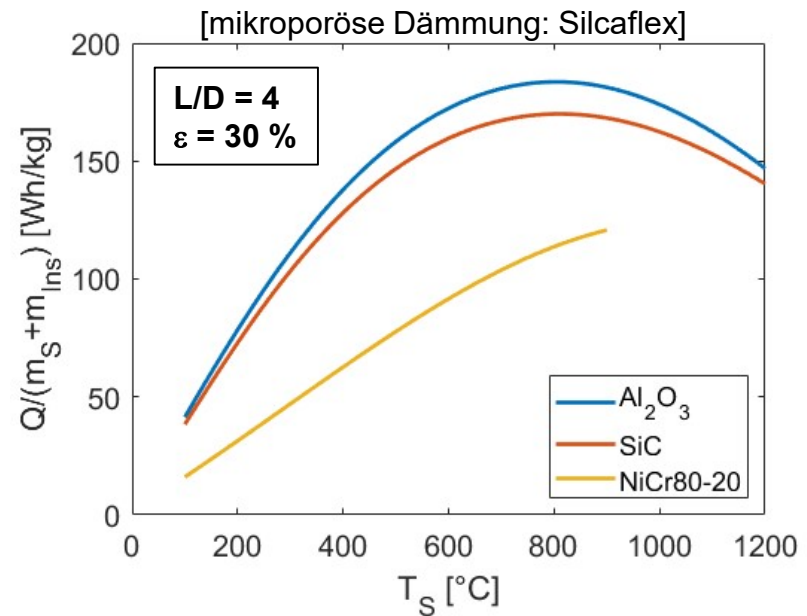
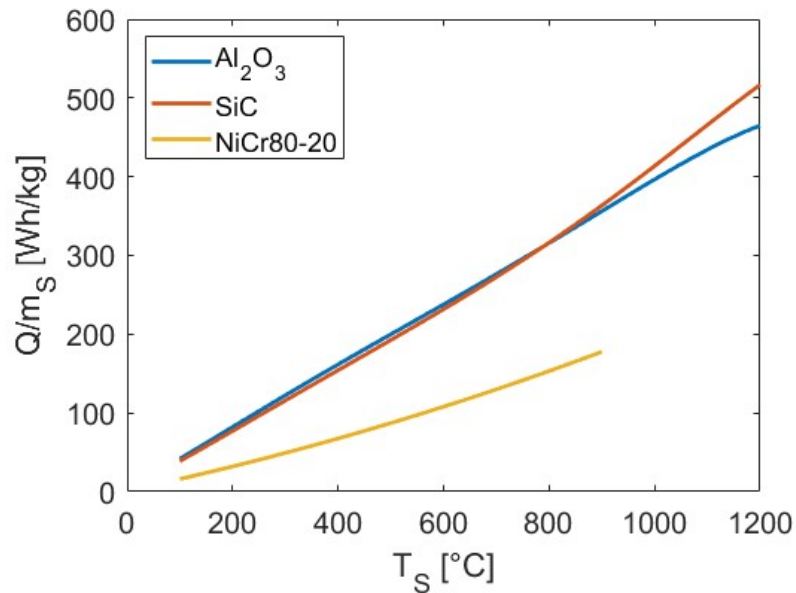
## Ergebnis

- Hohe spezifische Oberfläche entscheidend für Speicherausnutzung
- Moderate Verbesserung der Speicherausnutzung durch hohes L/D-Verhältnis und geringen Hohlraum (→ Wärmeübergang)
- Favorisiertes Design: Wabenkörper



# Sensibler Wärmespeicher (Feststoff)

Simulation: Speicherdichte vs. Temperatur ( $T_S$ )



## Speicherdichte (ohne Wärmedämmung)

- Zunahme der inventarbezogenen Speicherdichte mit steigender Temperaturdifferenz
- Materialeigenschaften ( $c_p$ ,  $\rho$ ) entscheidend für grav./vol. Speicherdichte

## Speicherdichte (mit Wärmedämmung)

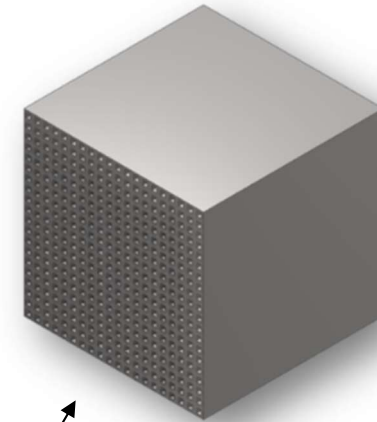
- Zunahme der inventarbezogenen Speicherdichte mit steigender Temperaturdifferenz bei gleichzeitiger Zunahme der Wärmedämmdicke
- Folge: materialspezifisches Maximum



# Sensibler Wärmespeicher (Feststoff)

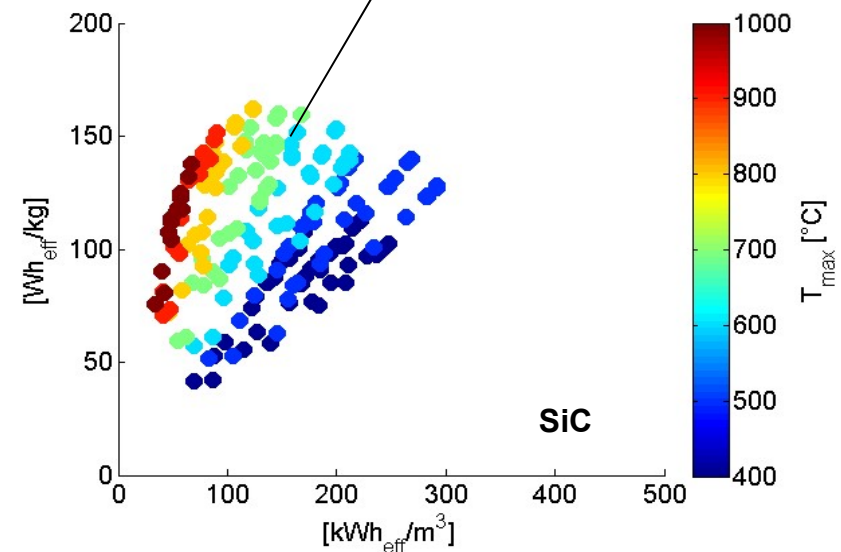
## Simulation: Fazit

Inventarwerkstoff	SiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiCr80-20
Systemische Speicherdichte [Wh/kg]	~ 145	~ 155	~ 95
Systemische Speicherdichte [kWh/m <sup>3</sup> ]	~ 190	~ 275	~ 300
Spezifische Oberfläche [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	> 200		
Hohlraum [%]	20 - 40		
Speichernutzungsgrad [%]	80 - 95		



### Fazit

- Systemische (grav.) Speicherdichten vergleichbar zu heutigen batteriegespeisten Heizlösungen
- Kommerzielle Wabenkörper verfügbar
- Druckverluste < 10 mbar
- Optimierungspotentiale vorhanden

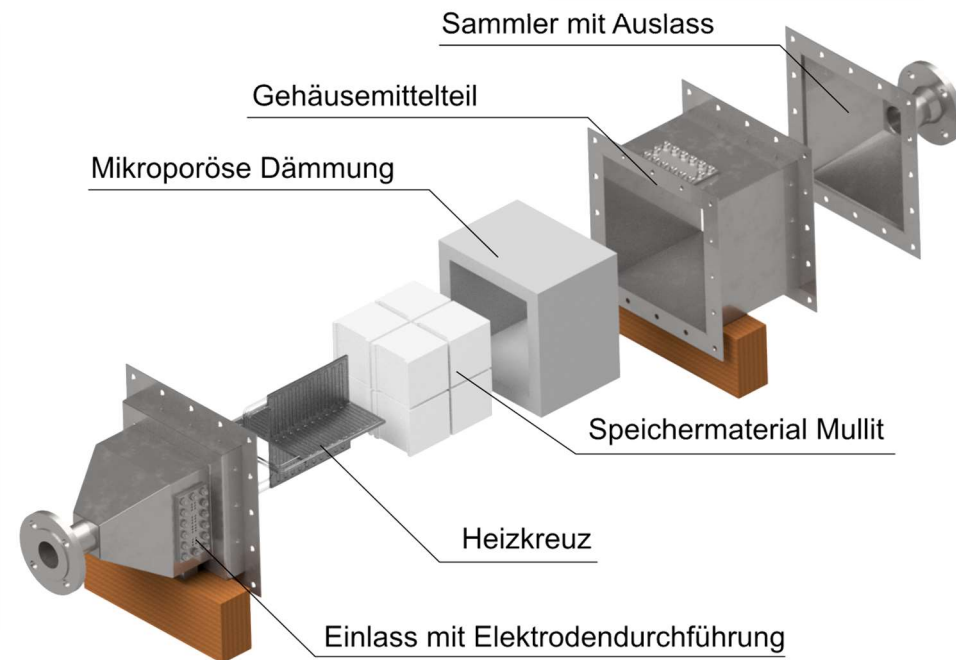
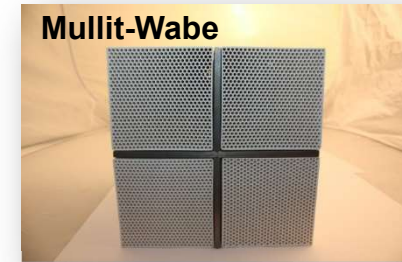


# Sensibler Wärmespeicher (Feststoff)

## Versuchsaufbau

### Versuchsaufbau

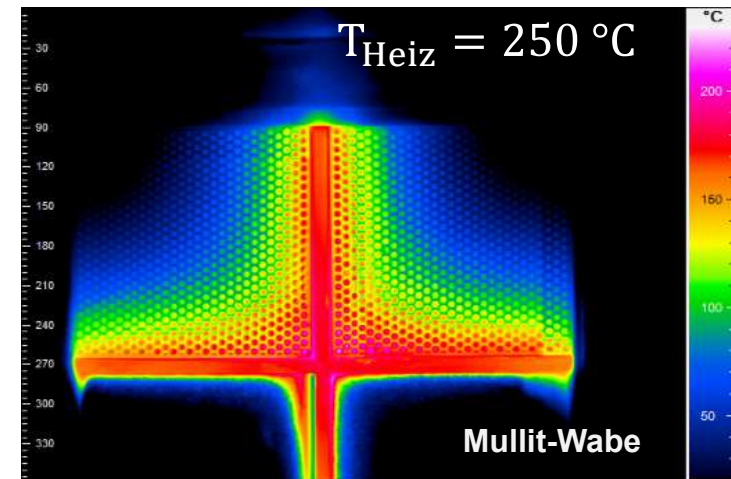
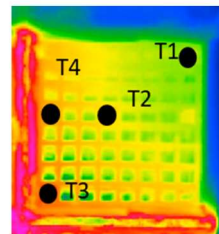
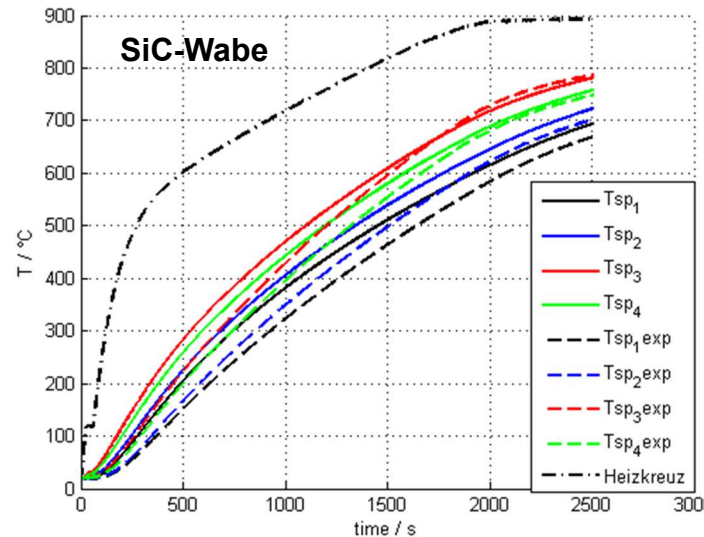
- Testmuster: Mullit-Waben (7.8 kg) / SiC-Waben (13.2 kg)
- Isolationsschichtaufbau: mikroporöse Dämmung
- El. Leistung Heizkreis: 8 kW / 900 °C
- Bypass-Strömungsführung (Entladung)



# Sensibler Wärmespeicher (Feststoff)

Experiment: Beladung (exemplarisch)

**Ziel:** Proof of Concept & Validierung



## Ergebnis

- Erfolgreiche Beheizung der Inventarkörper auf Temperaturen von ca. 700 °C
- Gute Übereinstimmung mit Simulationsmodellen
- Aber, stark limitierter Leistungseintrag aufgrund
  - Hohem thermischen Kontaktwiderstand (Heizplatte – Inventar)
  - Speziell Mullit-Wabe: geringe Wärmeleitung & „lange“ Wärmetransportpfade

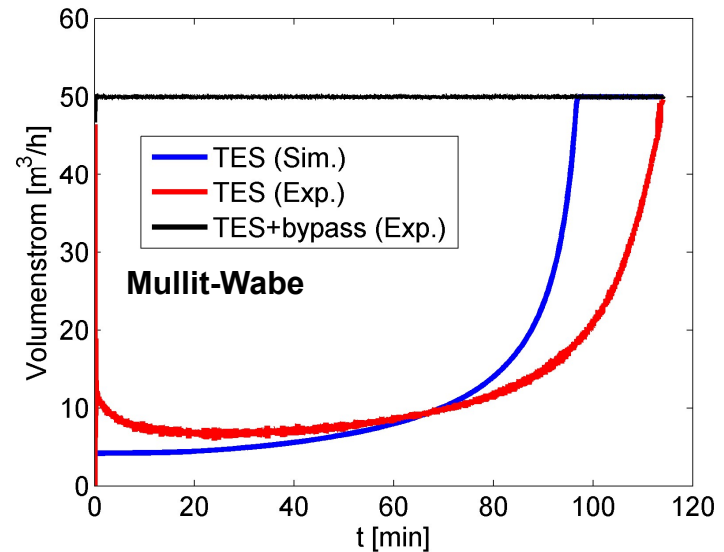
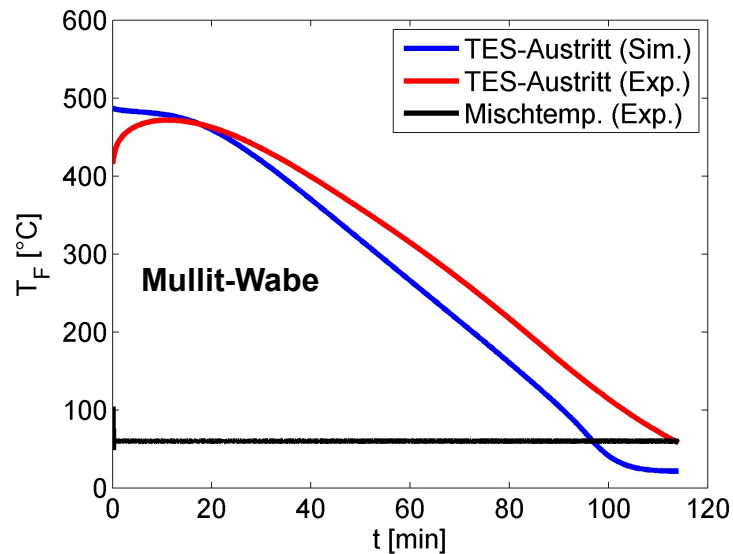


50 m<sup>3</sup>/h  
T<sub>s</sub>(t=0) ~ 500 °C  
T<sub>mix</sub> = 60 °C

# Sensibler Wärmespeicher (Feststoff)

Experiment: Entladung (exemplarisch)

**Ziel:** Proof of Concept & Validierung



## Ergebnisse

- Zunahme des TES-Volumenstroms mit abnehmender TES-Austrittstemperatur aufgrund konstanter Entladeleistung (→ Bypass)
- Vergleichbarer Verlauf zwischen Messung und Rechnung
- Abweichungen durch
  - Nicht berücksichtigte thermische Massen (Wärmedämmung)
  - Wärmestrahlung: Inventar und Verteiler

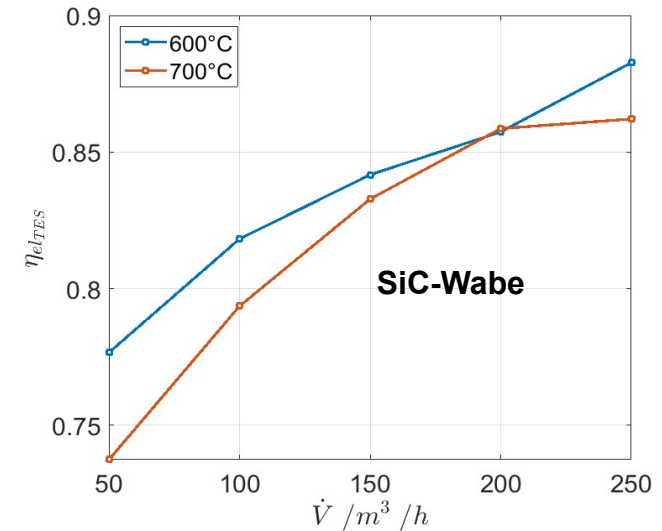


# Sensibler Wärmespeicher (Feststoff)

## Experiment: Fazit



Messung	$\vartheta_{Sp,m}$ [°C]	$\vartheta_{Heiz}$ [°C]	$\vartheta_{Mix}$ [°C]	$V_{ges}$ [m <sup>3</sup> /h]
1	700	900	100	50
2				100
3				150
4				200
5				250
6	600	770	100	50
7				100
8				150
9				200
10				250



### Fazit

- Hohe Speicherausnutzung bestätigt
- Bypassfunktion mit konstanter Entladetemperatur nachgewiesen
- Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit vorteilhaft (z. B.: SiC / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- Systemische Speicherdichte (SiC-Testmuster): ~ 178 kWh/m<sup>3</sup> und 102 Wh/kg
- Kritischer Teilprozess: Beladung mit hoher effektiver Leistung



# Sensibler Wärmespeicher (Feststoff)

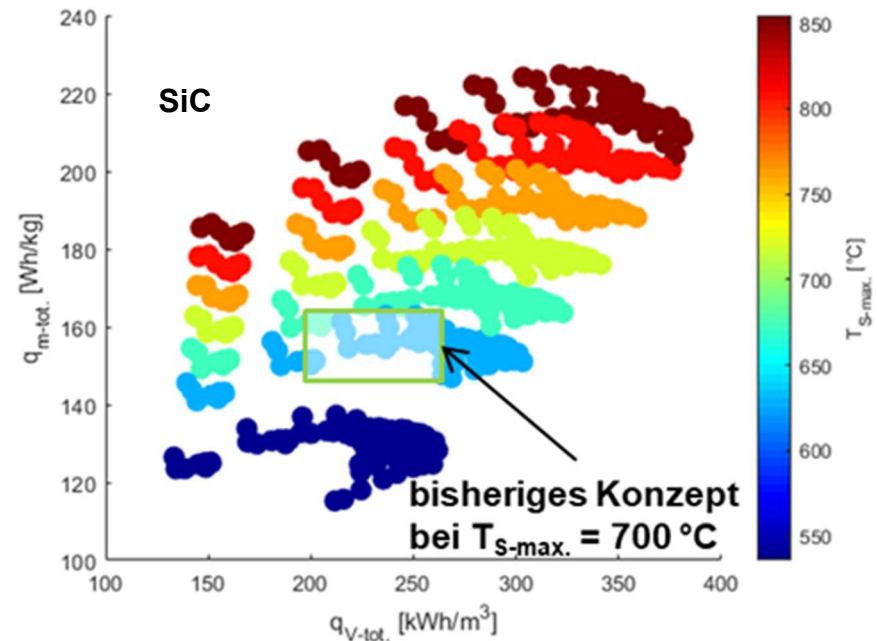
Aktuelle Arbeiten: Optimierung

## Steigerung der syst. Speicherdichte

- Konzeptionell weiterentwickelte Wärmedämmung
- Inventarmaterialien
- Lokal angepasste Inventarstrukturen
- ...

## Steigerung der effektiven Beladeleistung

- Anpassung industrienaher Lösungen auf Basis offener Heizdrähte bis 1300 °C
- Direkte Erwärmung der Speichersteine
- ...





# Zusammenfassung & Ausblick

## Zusammenfassung

- Gibt es einen Bedarf an thermischen Energiespeichern im Verkehr?
  - Ja**, potentielle Wärmespeicher-Anwendungen vorhanden
    - Wärmeversorgung batterieelektrischer Fahrzeuge
    - Komponententemperierung (Batterie, BZ, Kat., ...)
    - Klimatisierung (Wärme & Kälte)
- Lassen sich thermische Speichertechnologien aus dem Kraftwerksbereich in den Verkehrssektor übertragen?
  - Ja**, vielfältige Konzepte / Lösungsansätze vorhanden
    - Hohe Flexibilität: Kapazität, Leistung, Temperatur
    - Kommerzielle und kostengünstige Lösungen verfügbar

## Ausblick

- Ganzheitliche Auslegungsberechnungen und Nutzung von Optimierungspotentialen
- Laboruntersuchungen zu zentralen Einzelaspekten (z. B. Heizungssystem)
- Prototypische Umsetzung



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Institut für Technische Thermodynamik | Thermische Prozesstechnik |  
Pfaffenwaldring 38-40 | 70569 Stuttgart

Dr.-Ing. Volker Dreißigacker  
Telefon 0711 6862-449 | Telefax 0711 6862-747  
volker.dreissigacker@dlr.de  
www.DLR.de/tt

