



Metallische Latentwärmespeicher als Heizsystem für die Anwendung in batterieelektrischen PKWs und Bussen

Werner Kraft
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Fahrzeugkonzepte

Karlsruhe, 26.06.2019



Wissen für Morgen



Inhaltsübersicht

1 Wer sind wir?

2 Motivation

3 Lösungsansatz

4 Thermische Energiespeicher

5 Speicherkonzept MonoTherm

6 Potentiale

7 Speicherkonzept DuoTherm

8 Aktuelles aus dem Projekt “THS-Bus”

9 Weitere Anwendungsmöglichkeiten



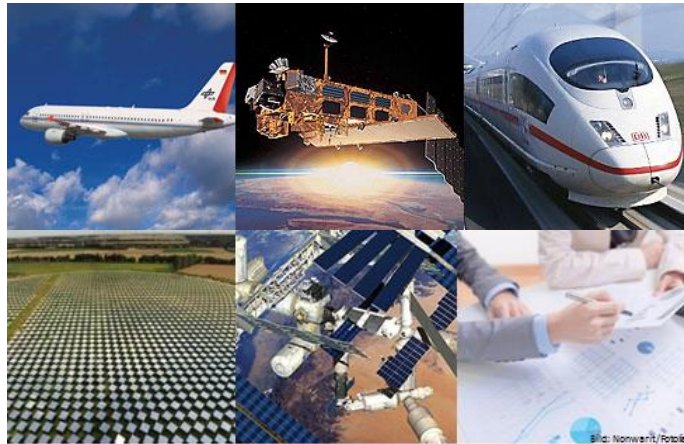
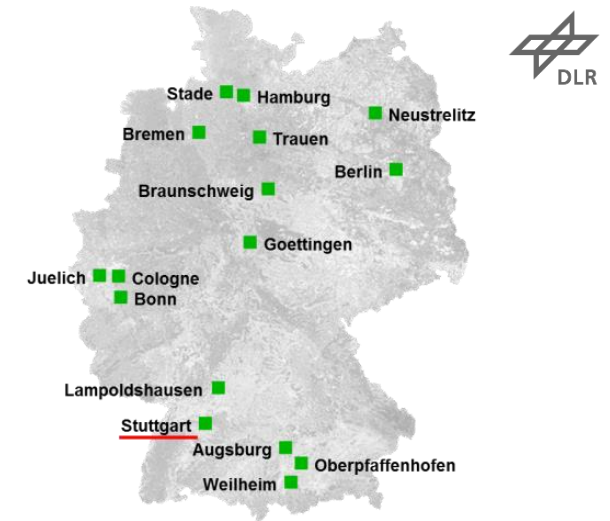
Wer sind wir?



Wer sind wir?

DLR

Das DLR ist das Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Ca. 8.000 Mitarbeiter arbeiten in Forschungsinstituten und Einrichtungen an 20 Standorten.



- Luftfahrt und Raumfahrt
- **Energie und Verkehr**
- Digitalisierung und Sicherheit
- Planung und Umsetzung der deutsche Raumfahrtaktivitäten
- Projektträger zur Forschungsförderung



Wer sind wir?

Institut für Fahrzeugkonzepte



**...im STEP
Engineering Park...**



...und in Berlin...

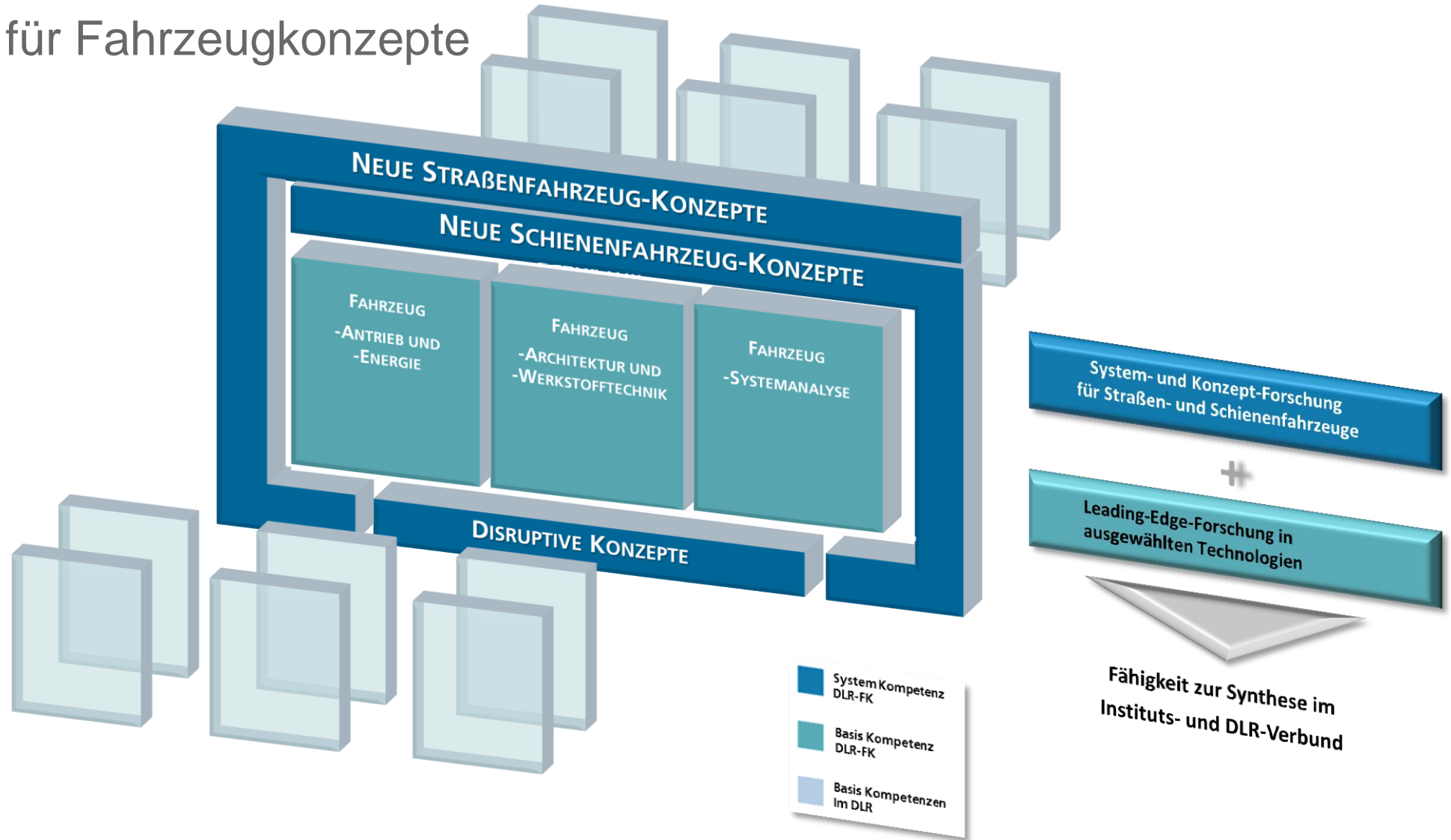


**... und in der
ARENA2036**



Wer sind wir?

Institut für Fahrzeugkonzepte



Wer sind wir?

Kompetenzfeld

Institut für **Fahrzeugkonzepte**



Abteilung **Alternative Energiewandler**

Kompetenzfeld **Thermische Hochleistungsspeicher** für mobile Anwendungen



Tim Lanz



Veronika Jilg



Werner Kraft



Peter Vetter



Motivation



Motivation

Elektrifizierung Verkehr



[1]



[2]

Antriebsstrang
Trend



[3]



[4]

[1]: menschen-in-dresden.de [2]: nw.de
[3]: de.fotolia.com [4]: www.pressebox.de

ÖPNV

- Laufende Erneuerung der Fahrzeugflotten
- Förderung der Anschaffung elektrifizierter Fahrzeuge
- Motivation der Verkehrsbetreiber einer lokal emissionsfreien Fahrzeugflotte

⇒ **Nahezu vollständige Elektrifizierung bis 2030**

Individualverkehr

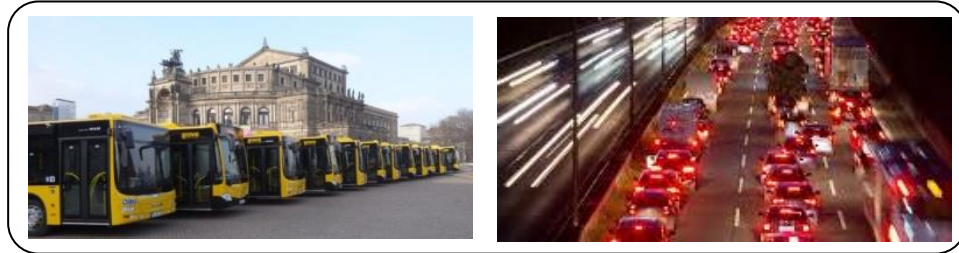
- Ziel 1 Mio. Elektrofahrzeuge bis 2022 (Elektro + Plug-In) (aktuell ca. 150 000; Stand 01/2019 laut KBA)
- Vorbehalte der Nutzer: hohe Kosten, geringe Reichweite

⇒ **Allmähliche Elektrifizierung über längeren Zeitraum**



Motivation

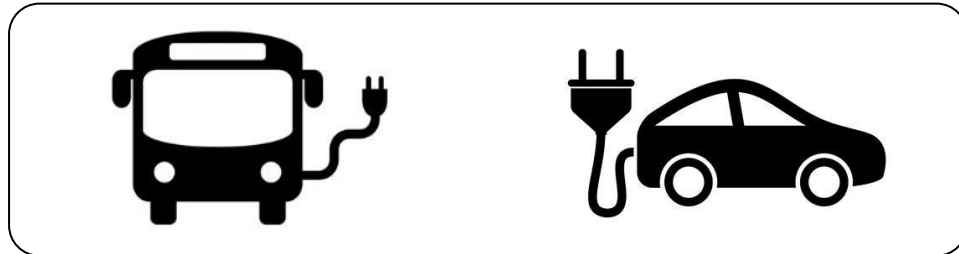
Elektrifizierung Verkehr



[1]

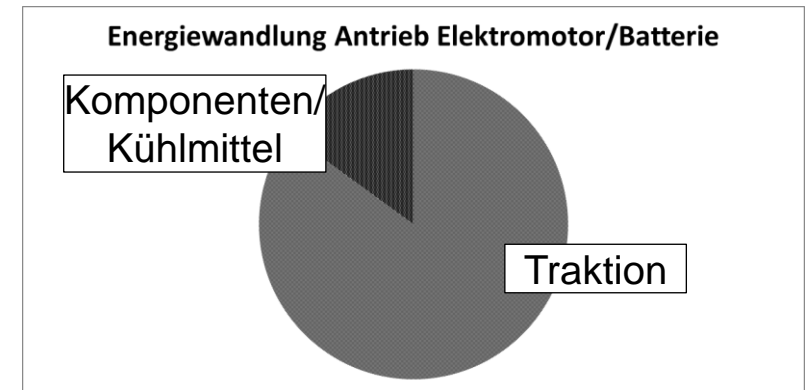
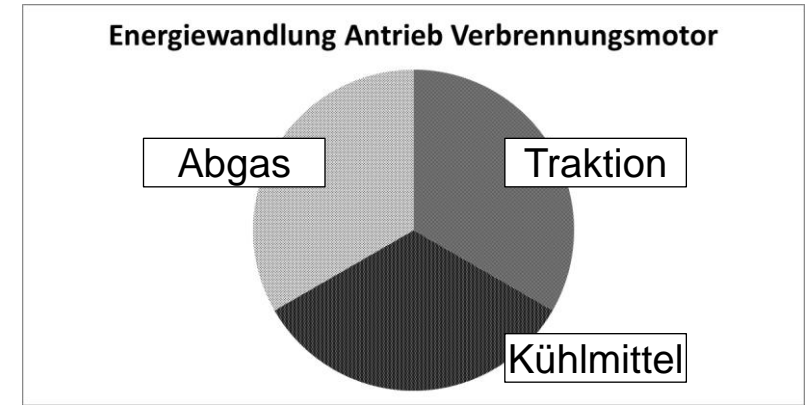
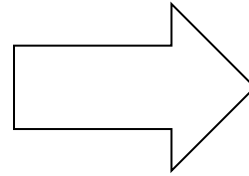
[2]

**Antriebsstrang
Trend**



[3]

[4]

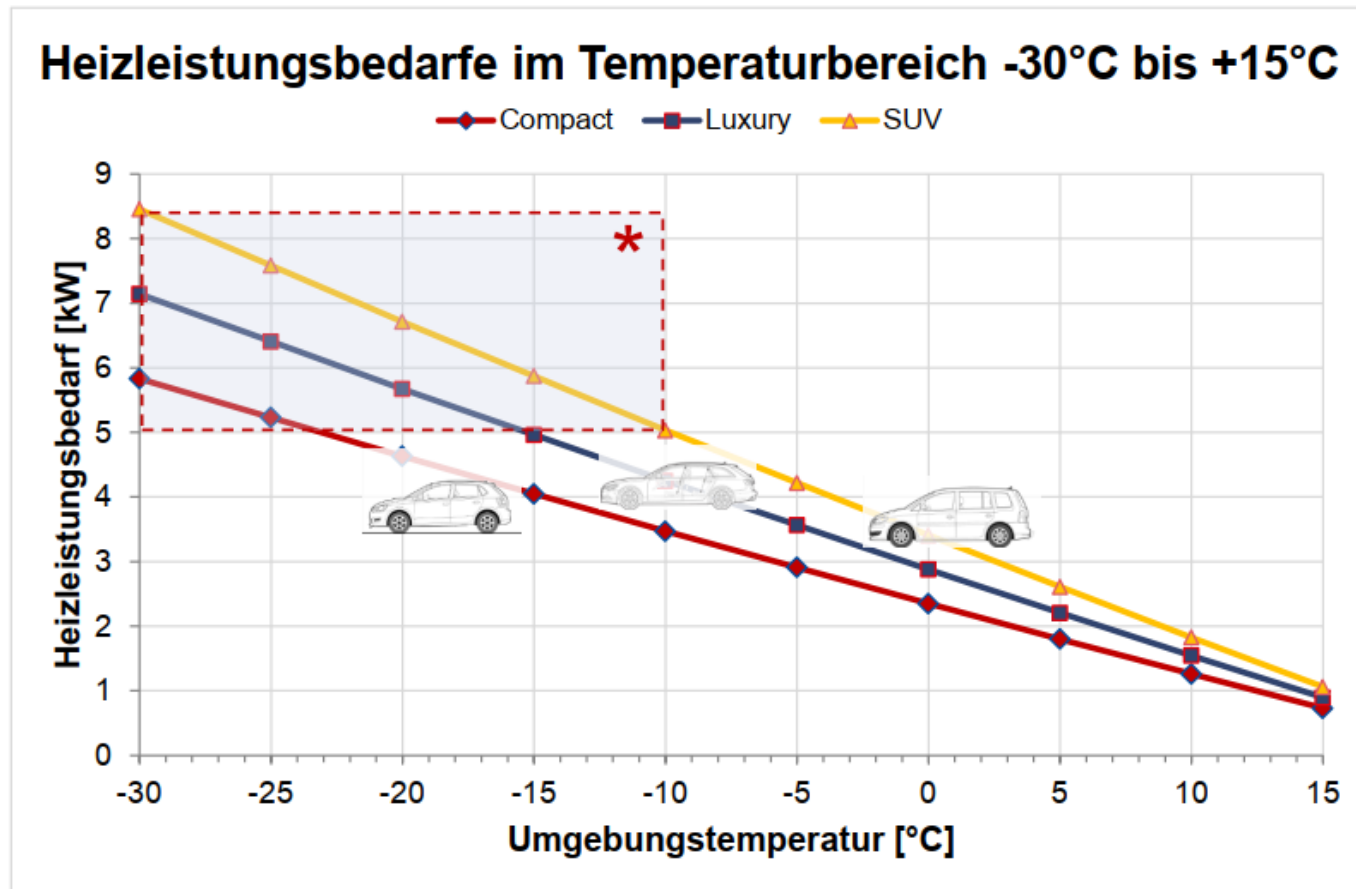


[1]: menschen-in-dresden.de [2]: nw.de
[3]: de.fotolia.com [4]: www.pressebox.de



Motivation

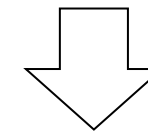
Heizbedarf – Beispiel PKW



Quelle: Webasto – Notwendige Zuheizleistung unterschiedlicher Hybridisierungsstufen, VDI-Thermomanagement, 2014

Beispiel Mitsubishi i-MiEV:

- Leistungsbedarf ohne Klimatisierung von ca. **7 kW** in Referenzzyklus mit Anteilen aus Stadt-, Überland- und Autobahn
- Heizleistung von ca. **4 kW** bei **-10 °C**

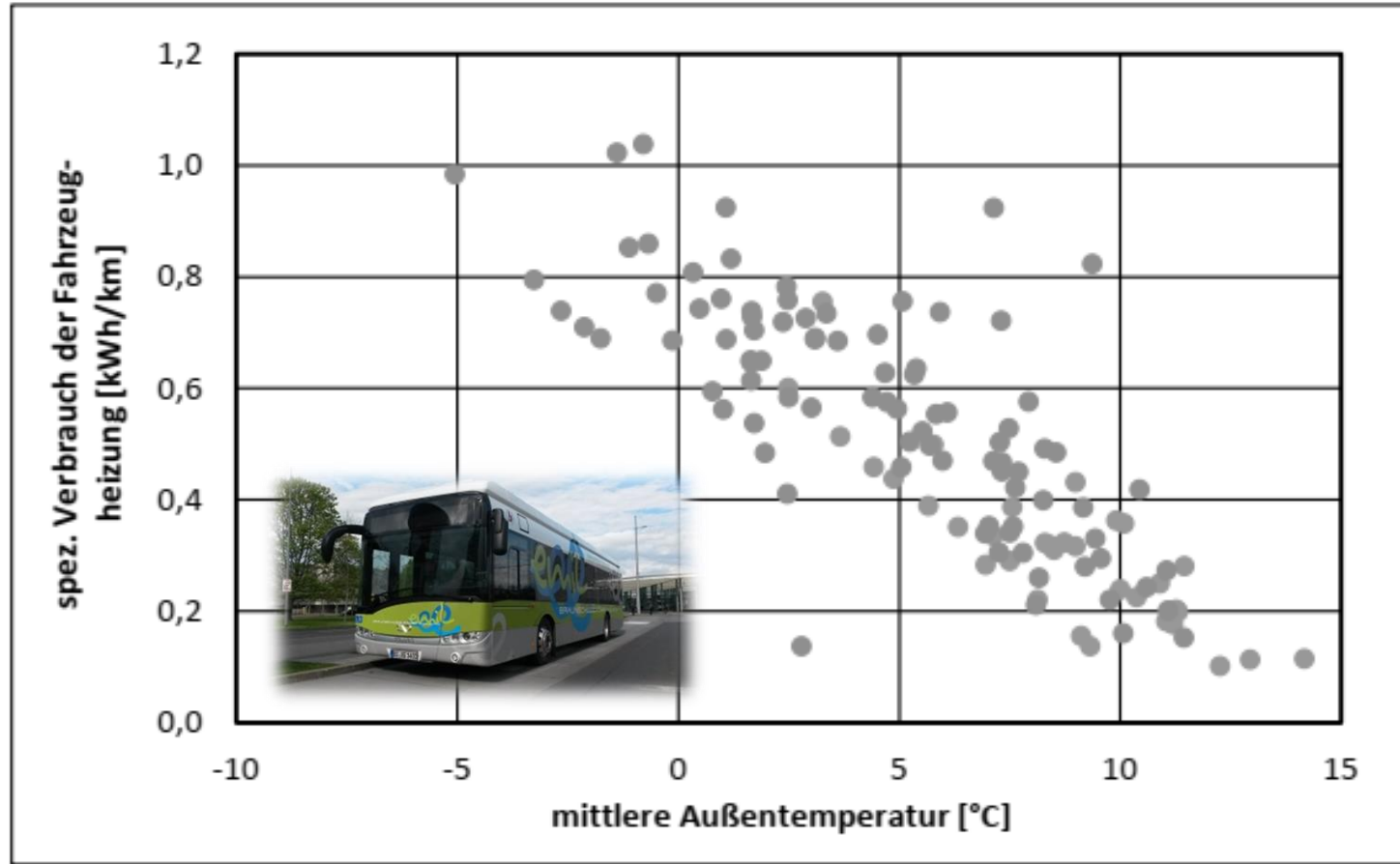


Anteil Heizleistung ca. 36 %

Quelle: ÖVK – Batterieelektrische Fahrzeuge in der Praxis, 2012

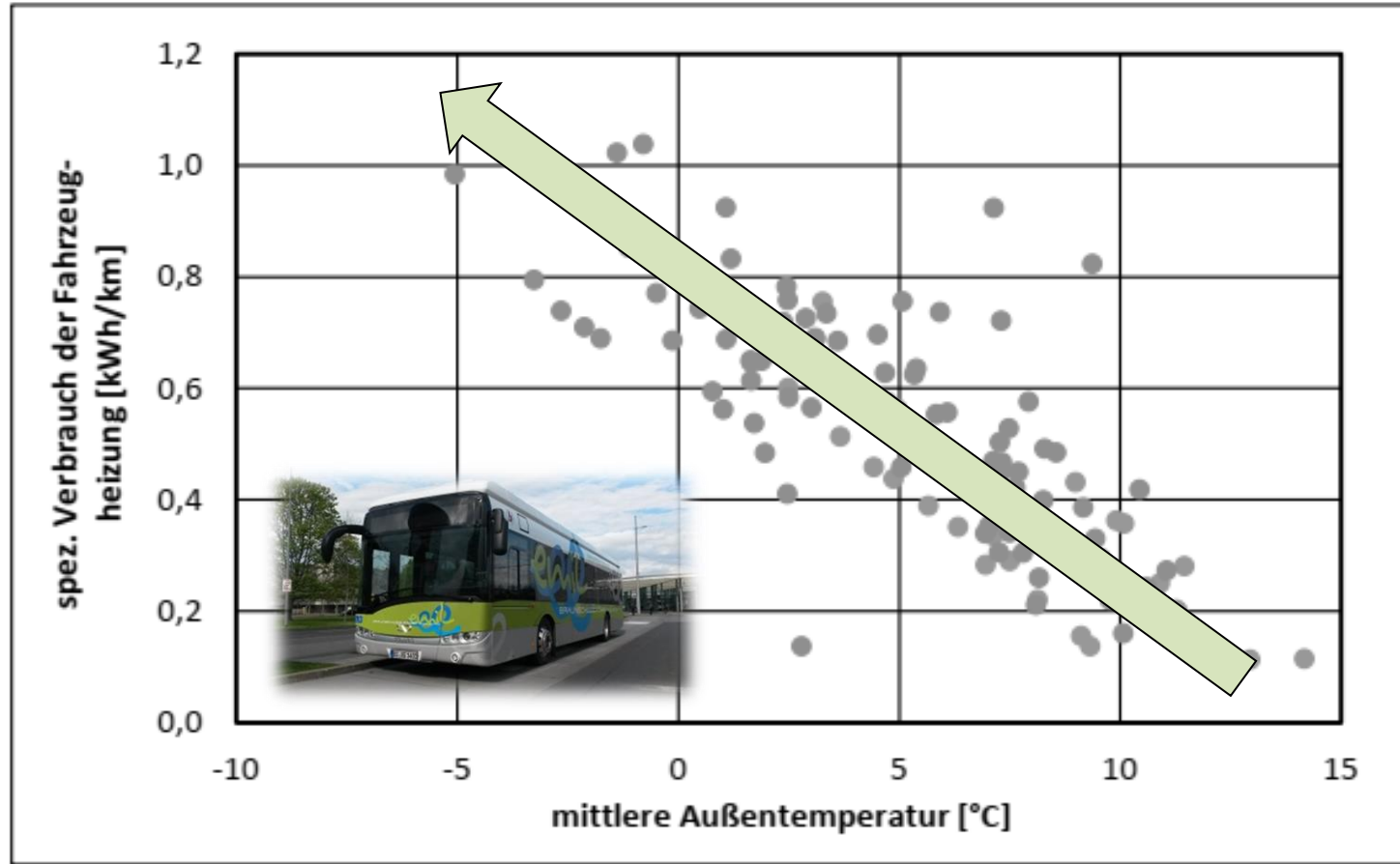
Motivation

Heizbedarf – Beispiel Bus



Motivation

Heizbedarf – Beispiel Bus

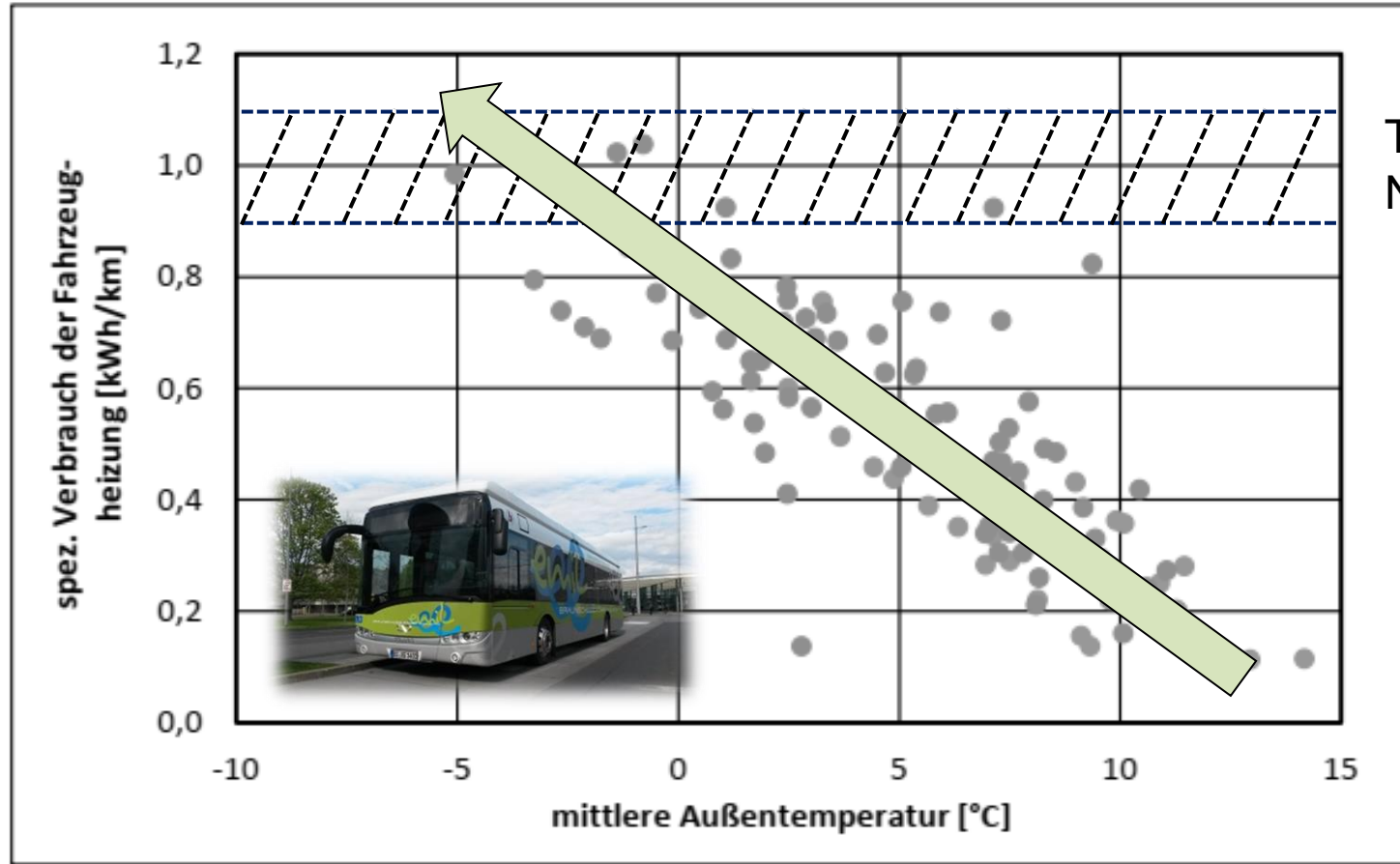


Quelle: Fraunhofer IVI



Motivation

Heizbedarf – Beispiel Bus



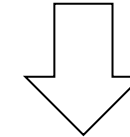
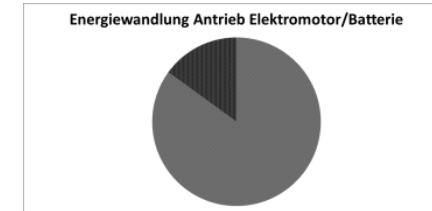
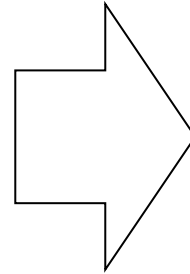
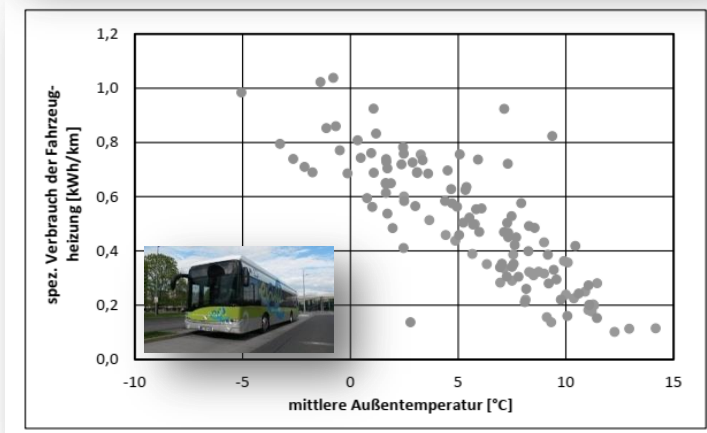
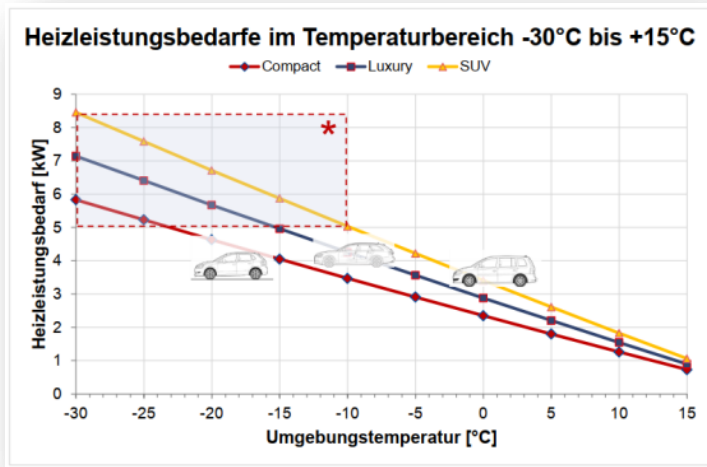
Traktion +
Nebenverbraucher

Quelle: Fraunhofer IVI

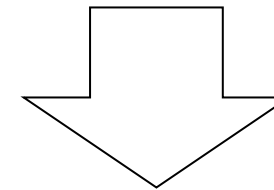


Motivation

Heizbedarf – Zusammenfassung



Heizwärmebedarf kann nicht durch
Abwärme Komponenten
Antriebsstrang bereitgestellt werden



**Unabhängige Heizlösungen
erforderlich!**



Motivation

Stand der Technik - Heizsysteme

Elektrische Heizer

- Im PKW-Bereich nahezu ausschließlich PTC-Heizer
- Wandlung elektrischer Energie aus Batterie in thermische Energie
- Coefficient of Performance (COP) $\approx 0,9$



Quelle: Eberspächer



Quelle: Valeo

Kraftstoff-Heizgerät

- Wandlung chemischer Energie in thermische Energie
- Überwiegend Verwendung von Diesel als Kraftstoff
- Wirkungsgrad von 80 bis 85 %



Quelle: Eberspächer

Wärmepumpe

- Nutzung thermischer Energie aus Umgebung oder Kühlmittel
- Wandlung elektrischer Energie aus Batterie am Verdichter
- COP in Abhängigkeit der Temperatur der Energiequelle (COP ≈ 1 bis 4)
- Verwendete Kältemittel:
 - R134a (GWP¹ 1430, seit 2017 verboten)
 - R1234yf (GWP 4, entzündlich, Bildung Flusssäure)
 - R744a bzw. CO₂ (GWP 1)



Quelle: Konvekta

1: GWP = Global Warming Potential



Motivation

Stand der Technik - Heizsysteme

Elektrischer – Heizer

- Hoher Reichweitenverlust bei niedrigen Umgebungstemperaturen
- Nachteile einer hohen Batteriekapazität (Kosten, Masse/Volumen, Umweltaspekte)



Quelle: Eberspächer



Quelle: Valeo

Kraftstoff - Heizgerät

- Lokaler Ausstoß von Schadstoffen und CO₂
- Verbrauch bis ca. 15 l pro 100 km Diesel (12 m – Bus)



Quelle: Eberspächer

Wärmepumpe

- Reichweitenverlust abgeschwächt bei moderaten Umgebungstemperaturen
- Hoher Reichweitenverlust bei niedrigen Umgebungstemperaturen
- Heizleistung nicht ausreichend bei Umgebungstemperaturen < 0 °C (R134a) bzw. < -10 °C (R744a)
- Zusätzlich elektrischer Heizer oder Dieselheizer notwendig



Quelle: Konvekta

➔ **Keine zufriedenstellenden Heizlösungen verfügbar**



Lösungsansatz

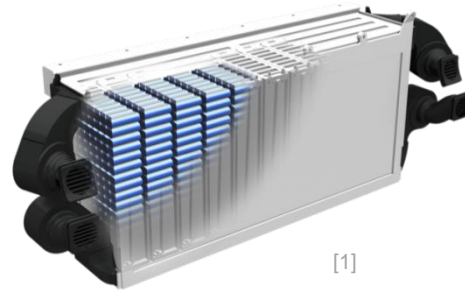


Lösungsansatz

Verwendung thermischer Energiespeicher

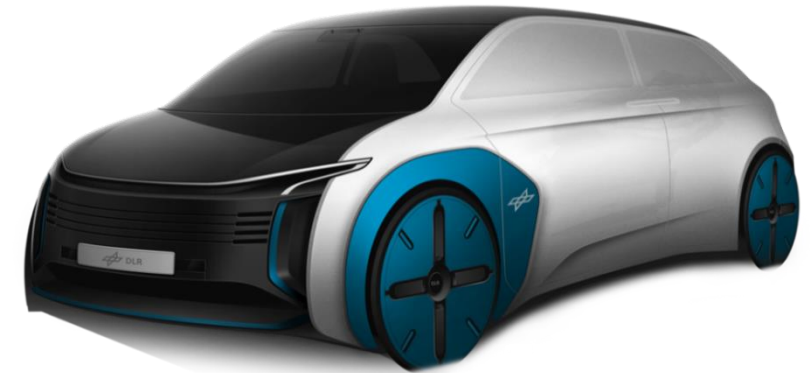
Traktionsbatterie

- Teure Komponente
 - Relativ hohes Gewicht und Volumen
 - Ökologische Auswirkungen ungeklärt
- **Verwendung für Traktion**



Thermischer Speicher

- Potentiell günstig
 - Potentiell klein / leicht
 - Potentiell umweltfreundlicher als Batterie
- **Verwendung für Beheizung**



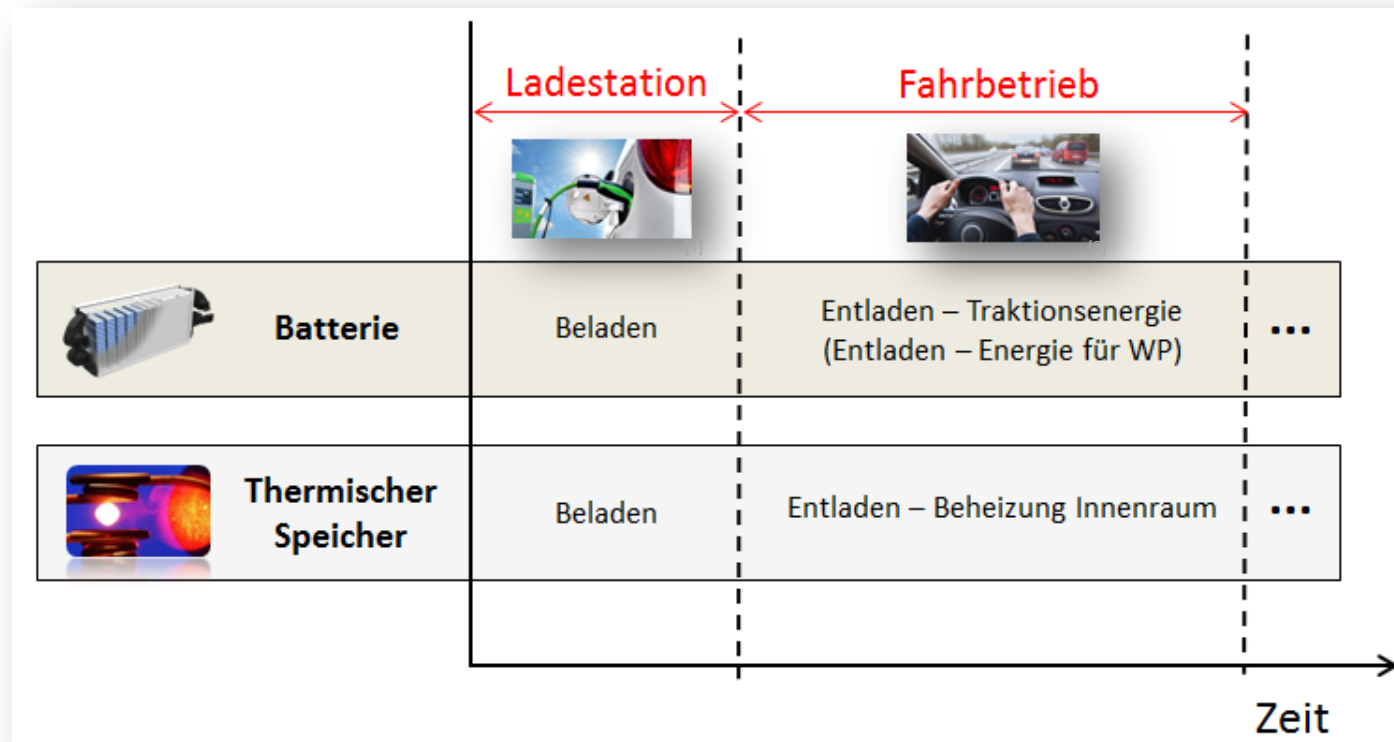
[1]: "Traction battery" [Online]. Available: <http://www.eenewsautomotive.com/sites/default/files/images/01-edit-photo-uploads/2014/2014-06-june/akku.png> [Last access on 29th of August 2017].



Lösungsansatz

Verwendung thermischer Energiespeicher

- Bedarfsgerechte Beladung vor Fahrtbeginn
- Beheizung Innenraum während der Fahrt (alleiniges Heizsystem oder Ergänzung zur WP)



[1]: <https://www.impulse.de/auto/stromtankstellen/2106427.html>

[2]: <https://www.ndr.de/ratgeber/gesundheit/Auto-fahren-birgt-Gefahren-fuer-Allergiker,autofahren138.html>

Thermische Energiespeicher



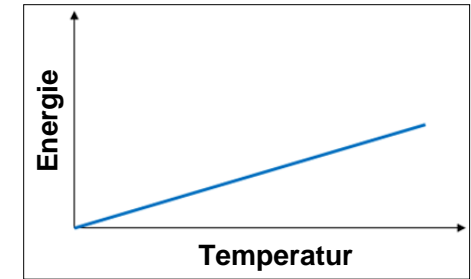
Thermische Energiespeicher

Sensible Thermische Energiespeicherung

Grundprinzip

Energieeintrag hat Temperaturänderung zur Folge
Spezifische Wärmekapazität **cp** als maßgebliche Stoffeigenschaft

$$Q = m \cdot c_p \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)$$



Beispiele



[1]



[2]



[3]

Medium	Anwendungstemperatur [°C]	Spezif. Wärmekapazität [kJ/kgK]	Vol. Wärmekapazität [kJ/m³K]
Wasser	0 - 100	4,19	4175
Kies, Sand	0 - 800	0,71	1278 - 1420
Beton	0 - 500	0,8 – 1,2	1672 - 2074
Salzschmelze	150 - 450	1,3	1970 - 1725



[4]

[1]: <https://www.si-shk.de/strengere-daemmvorgaben-fuer-warmwasserspeicher/150/10004/358010>[2]: <https://www.gesundheits-laden.de/Waermflasche-Gummi-20l-Doppellamelle>

[3]: Vorlesungsunterlagen ITW – Thermische Energiespeicher

[4]: DLR-Blog – 18.10.2015

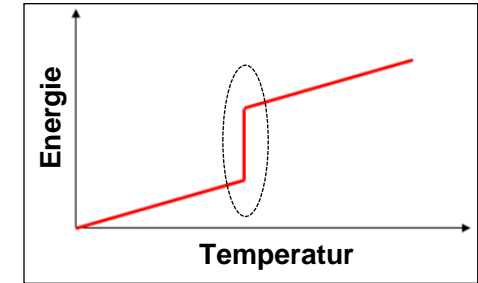
Thermische Energiespeicher

Latente Thermische Energiespeicherung

Grundprinzip

Energieeintrag hat Phasenwechsel zur Folge
 Schmelzenthalpie **hs** als maßgebliche Stoffeigenschaft

$$Q = m \cdot hs$$



Beispiele



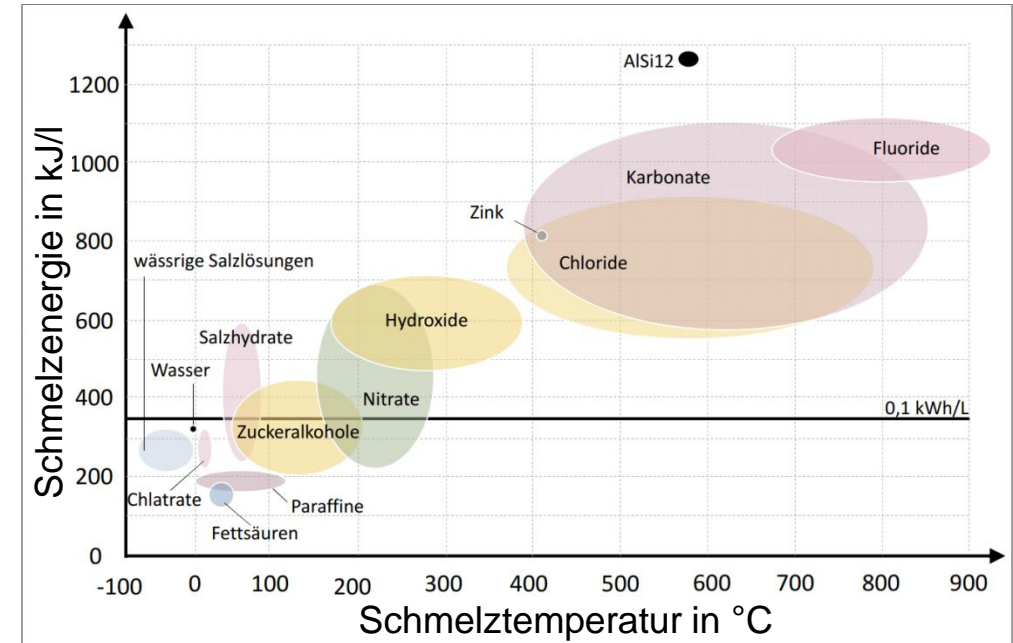
[2]



[1]



[3]



[4]

[1]: <https://www.pearl.de/a-SD66-5005.shtml>
 [2]: https://www.ebay.de/itm/273404778464?ul_noapp=true
 [3]: <https://www.daserste.de/information/wissen-kultur/w-wie-wissen/sendung/2011/intelligente-fassaden-100.html>
 [4]: Mehling – "Latentwärmespeicher", BINE 4, 2002

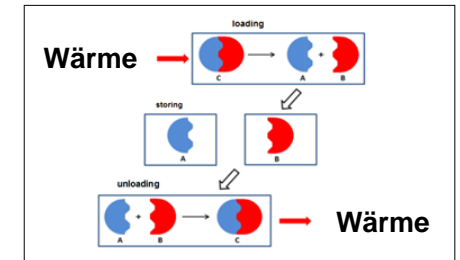
Thermische Energiespeicher

Thermochemische Energiespeicherung

Grundprinzip

Reaktionsenergie eines chemischen Prozesses

Reaktionsenthalpie $\Delta_R H$ als maßgebliche Eigenschaft



Beispiele



[1]



[2]

Reaktion	Temperatur [°C]	Reaktionsenthalpie [kJ/kg]
Reversible Wasserabspaltung $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{Dampf}$ $\text{Ca}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{CaO} + \text{Dampf}$	258 479	555 1473
Reversible Zersetzung von Metallhydriden $\text{MgH}_2 \leftrightarrow \text{Mg} + \text{H}_2$	280 - 500	2885
Adsorption von Wasser und Silicagel $\text{Silicagel} + \text{Dampf} \leftrightarrow \text{Silicagel feucht}$	40 - 100	991

[3]

[1]: <https://www.klimakoenner.de/erfuellungsoptionen/solar>

[2]: <https://eneff-industrie.info/projekte/2015/waerme-fahrt-mit-dem-sattelschlepper-zum-abnehmer/>

[3]: Vorlesungsunterlagen ITW – Thermische Energiespeicher

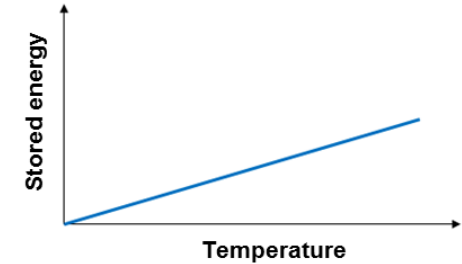
Thermische Energiespeicher

Übersicht Grundprinzipien

Sensible Wärmespeicherung

Energieeintrag hat Temperaturänderung zur Folge

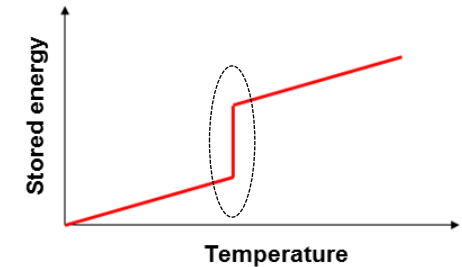
$$Q = m \cdot c_p \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)$$



Latente Wärmespeicherung

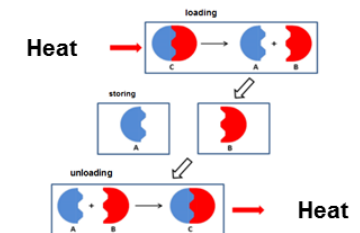
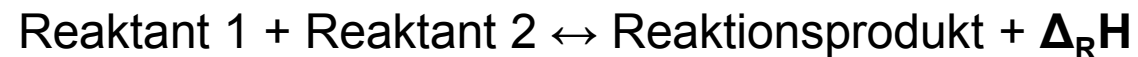
Energieeintrag hat Phasenwechsel zur Folge

$$Q = m \cdot h_s$$

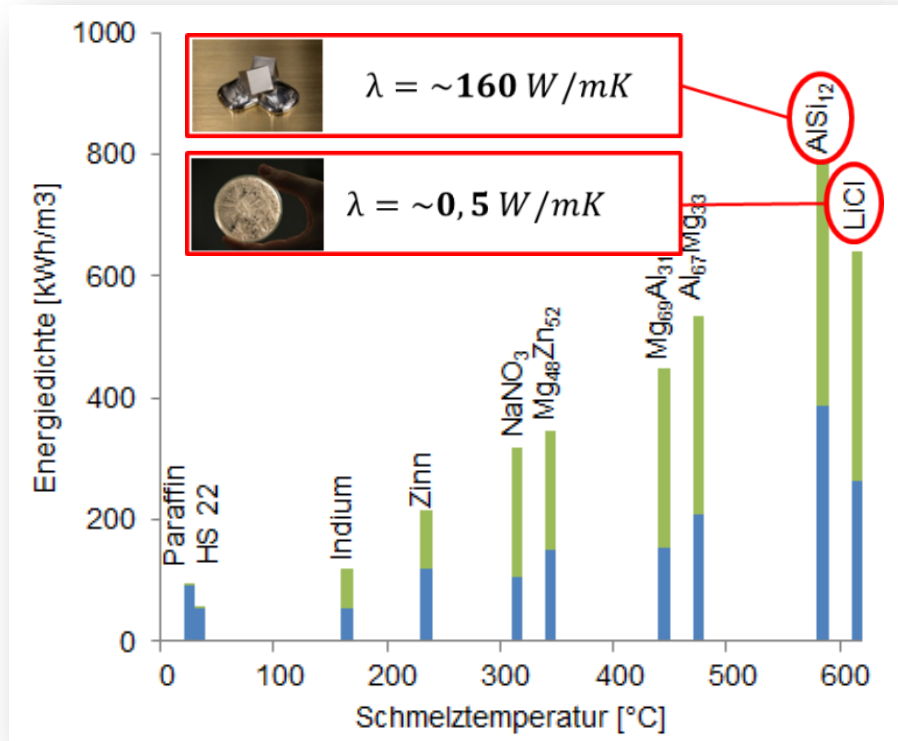


Thermochemische Wärmespeicherung

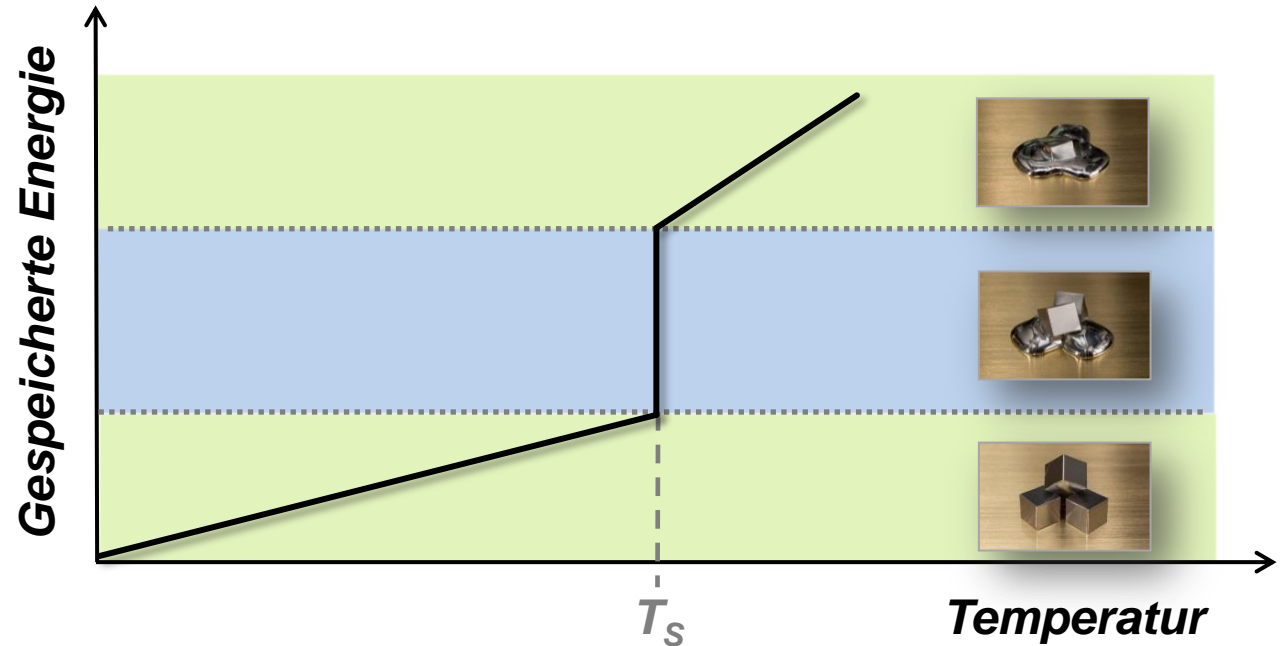
Reaktionsenergie eines chemischen Prozesses



Thermische Energiespeicherung Metallische Phasenwechselmaterialien



■ Sensible Wärme ■ Latente Wärme



Stoffeigenschaften AlSi12

$\lambda \approx 160 \text{ W/mK}$
 $c_p \approx 1000 \text{ J/kgK}$
 $h_s \approx 511 \text{ kJ/kg}$
 $T_m \approx 577 \text{ °C}$

Thermische Energiespeicherung

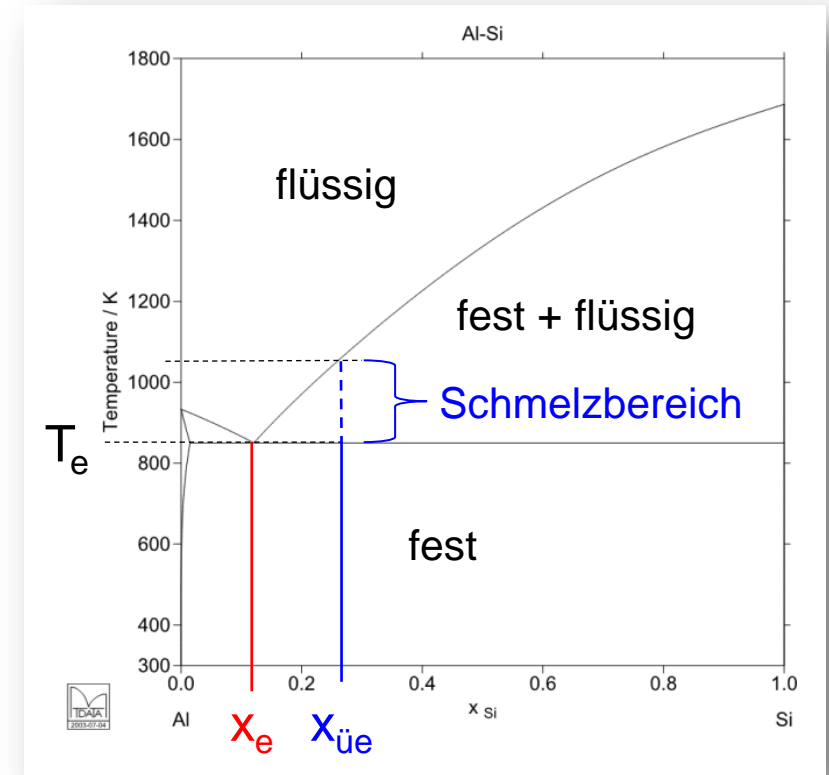
Metallische Phasenwechselmaterialien

Potentiale

- Hohe Wärmeleitfähigkeit: ca. 50 bis 200 W/mK
- Definierter Schmelzpunkt bei eutektischer Zusammensetzung
- Keine Zersetzung bei Überhitzung
- Potentiell hohe Zyklenbeständigkeit

Herausforderungen

- Reaktivität im flüssigen Zustand
- Bildung von Lunker und Poren



[1]

[1]https://www.researchgate.net/publication/321576842_Faceted_and_dendritic_morphology_change_in_alloy_solidification/figures?lo=1[Last access on 15rd of March 2019].

Thermische Energiespeicherung

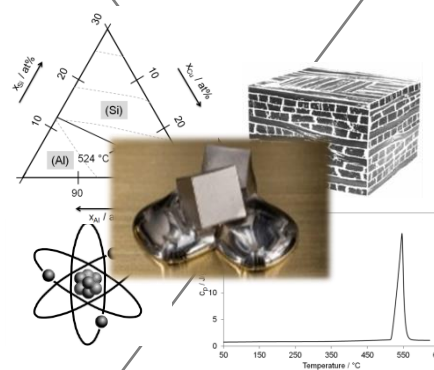
Metallische Phasenwechselmaterialien

Materialentwicklung im Labormaßstab

Materialuntersuchung im
Anwendungsmaßstab



- Metallisches Phasenwechselmaterial
 - Datenbank Screening
 - Thermophysikalische Analyse (DSC¹, LFA²)
- Einhausungsmaterial
 - Phasendiagramm-Analyse
 - Reaktivitätsanalyse (Reaktionsofen, Elektronenmikroskop, Röntgentomografie, Benetzungsanalyse)



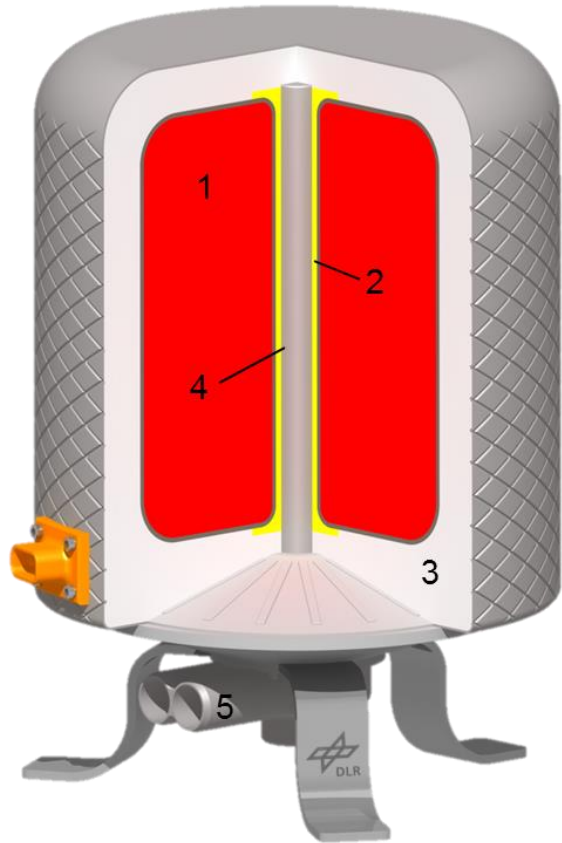
- Metallisches Phasenwechselmaterial + Einhausungsmaterial
 - Thermophysikalische Charakterisierung (Prüfstand für Wärmespeichersysteme)
 - Zyklerversuche für Langzeitverhalten
- Einhausungskomponente
 - Design mit Erfahrung aus Material- und Konzeptentwicklung



Speicherkonzept MonoTherm



Speicherkonzept MonoTherm



Speichermaterial
und Einhausung



Elektrischer
Widerstandsheizler

[1]



Wärmedämmung

[2]



Wärmeabtragssystem oder
Luft - Wärmeübertrager

[3]

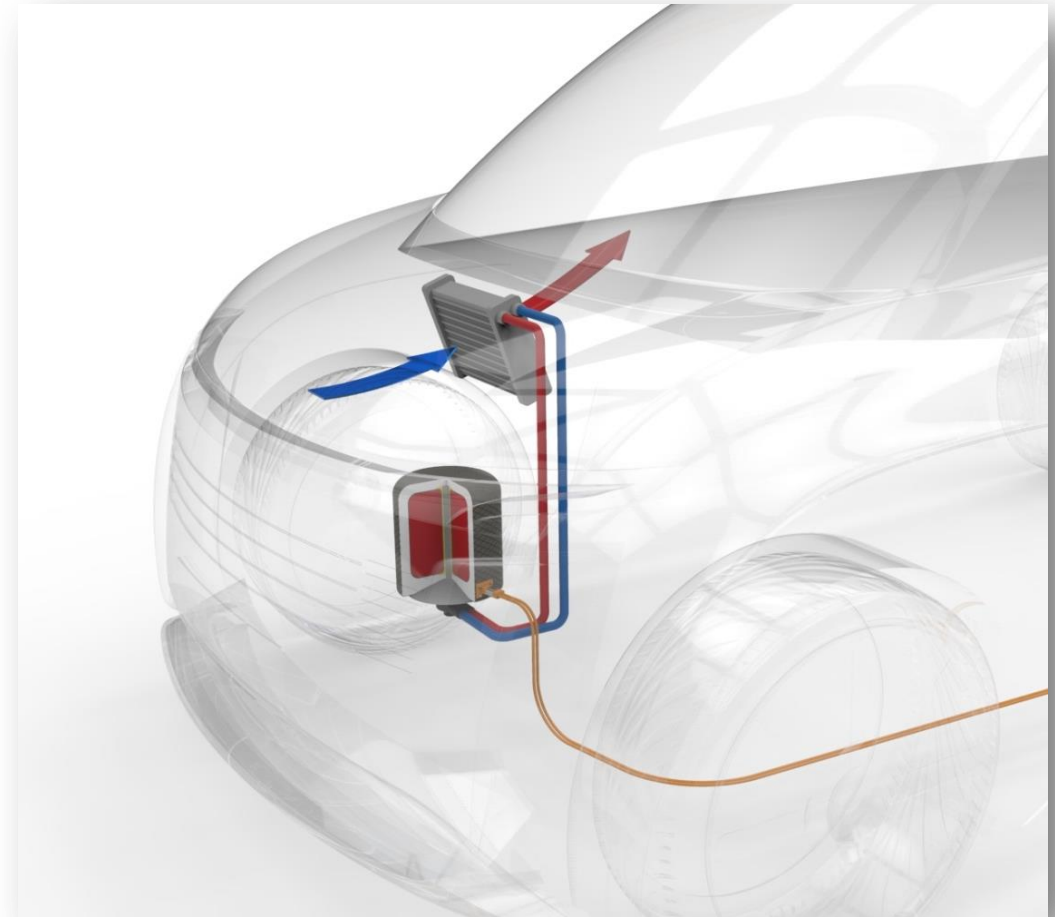
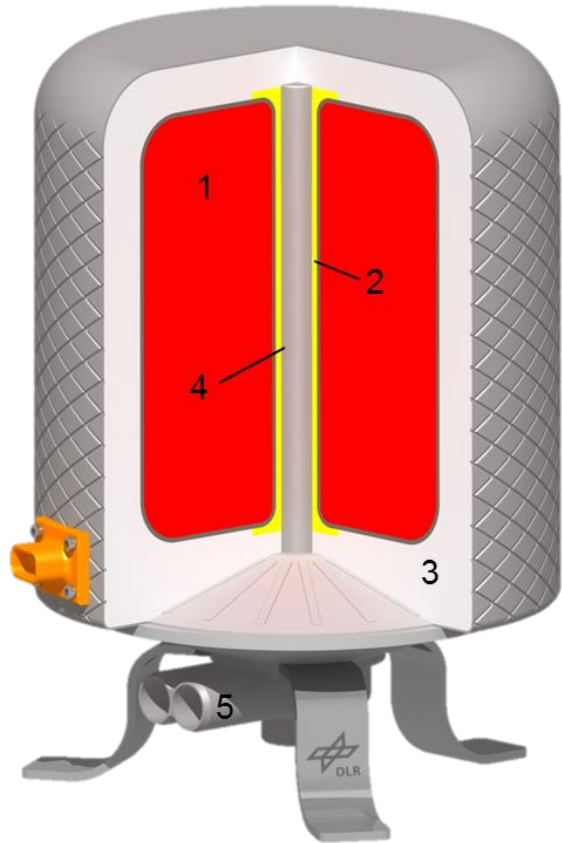
[1]: <https://www.hotset.com/de/komponenten/hotrod-heizpatronen/>; Letzter Zugriff: 15.03.2019

[2]: <https://www.promat-hpi.com/de-de/anwendungen/energiegewinnung/solar/microtherm-mps-parabolrinnen-de/>; Letzter Zugriff: 15.03.2019

[3]: <https://www.chemanager-online.com/themen/thermische-verfahrenstechnik/verdampfung-eine-zentrale-grundoperation-stellt-sich-vor/>; Letzter Zugriff: 15.03.2019



Speicherkonzept MonoTherm



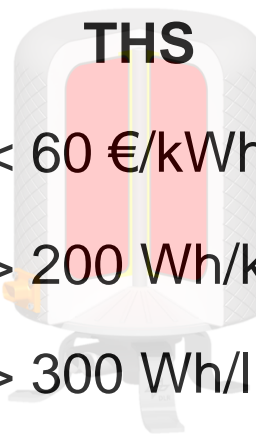
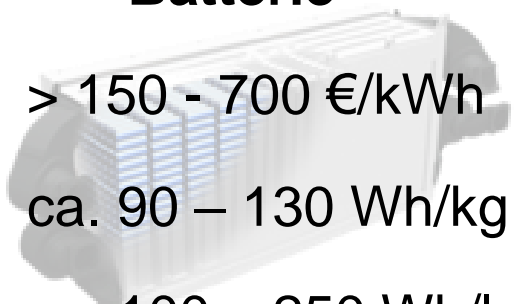
Potentiale



Potentiale

Thermischer Hochleistungsspeicher

Potentiale gegenüber Batterie

	 THS	 Batterie
Kosten	< 60 €/kWh	> 150 - 700 €/kWh
Grav. Energiedichte	> 200 Wh/kg	ca. 90 – 130 Wh/kg
Vol. Energiedichte	> 300 Wh/l	ca. 100 – 250 Wh/l

- Verzicht auf kritische Rohstoffe (Lithium, Kobalt)
- Hohe Recyclebarkeit / Verwendung recycelter Rohstoffe
- Geringerer Energieaufwand für Herstellung (bis Faktor 20 bei Verw. recyceltes AlSi)
- Höhere Langzeitstabilität (muss noch validiert werden)



[1]

[1]: <https://www.filcom-technik.de/hd-kolben-komplett-fur-mahle-kolbenkompressor-5017892.html>; Letzter Zugriff: 15.03.2019

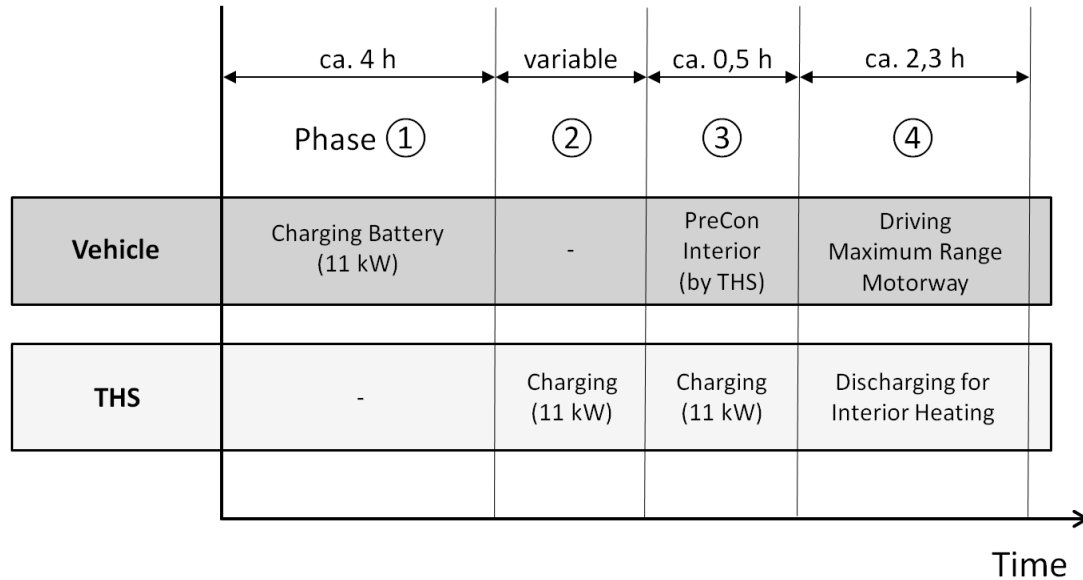


Potentiale

Referenzszenario

Auslegung MonoTherm-Speicher für:

- Langstreckenfahrt auf Autobahn bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Winterliche Bedingungen mit Heizleistung von ca. 5 kW
- Beheizung Innenraum mit thermischen Speicher



[1]



[2]

1: Beladen der Batterie

2: Beladen des thermischen Speichers

3: Vorkonditionierung Innenraum

4: Zurücklegen der maximalen Reichweite

Angenommener Verbrauch Traktion: 20 kWh/100 km

Angenommene Batteriekapazität: 45 kWh

[1] : <https://deavita.com/dekoration/weihnachtsdeko-ideen/weihnachtsbaum-festlich-schmucken-spas-fur-die-ganze-familie.html> [Last access on 23rd of October 2018]

[2]: <https://www.hotelaustria.com/>[Last access on 23rd of October 2018].

Potentiale

Referenzszenario

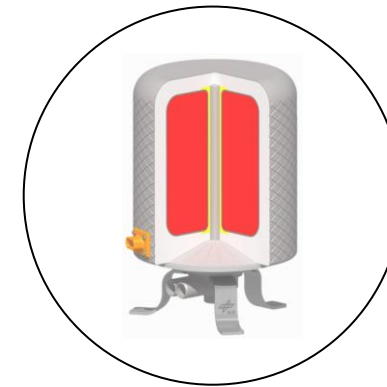
Auslegungsbedingungen

- Langstreckenfahrt auf Autobahn
- Gleiche Reichweite durch thermischen Speicher oder Batterie + PTC
- Benötigte Heizenergie ca. 11,25 kWh

	ca. 4h	variable	ca. 8,5h	ca. 2,3h
	Phase ①	②	③	④
Vehicle	Charging Battery (11 kWh)		Heating Internal (By PTC)	Driving Maximum Range (Maximum)
Thermal		Charging (11 kWh)	Charging (11 kWh)	Discharging for interior heating



VS.



Masse	95 kg	- 42 %	55 kg
Volumen	50 l	- 26 %	37 l
Kosten	1856 €	-57 %	792 €

[1] <https://publicdomainvectors.org/de/kostenlose-vektografiken/ClipArt-von-Braun-und-schwarz-Akku/35235.html> [Letzter Aufruf: 06.06.2019]

Annahme Batterie + PTC: COP = 0,9, $q_{grav} = 130 \text{ Wh/kg}$, $q_{vol} = 250 \text{ Wh/l}$, $k = 150 \text{ €/kWh}$

Speicherkonzept DuoTherm

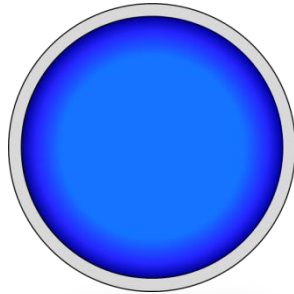


Speicherkonzept DuoTherm

Grundprinzip

Latente Wärmespeicherung

Niedertemperaturspeicher



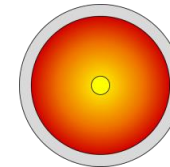
Niedrige spezifische Wärmekapazität

Niedrige thermische Leistung

Gute Kopplungsmöglichkeit für Kühlsystem



Hochtemperaturspeicher



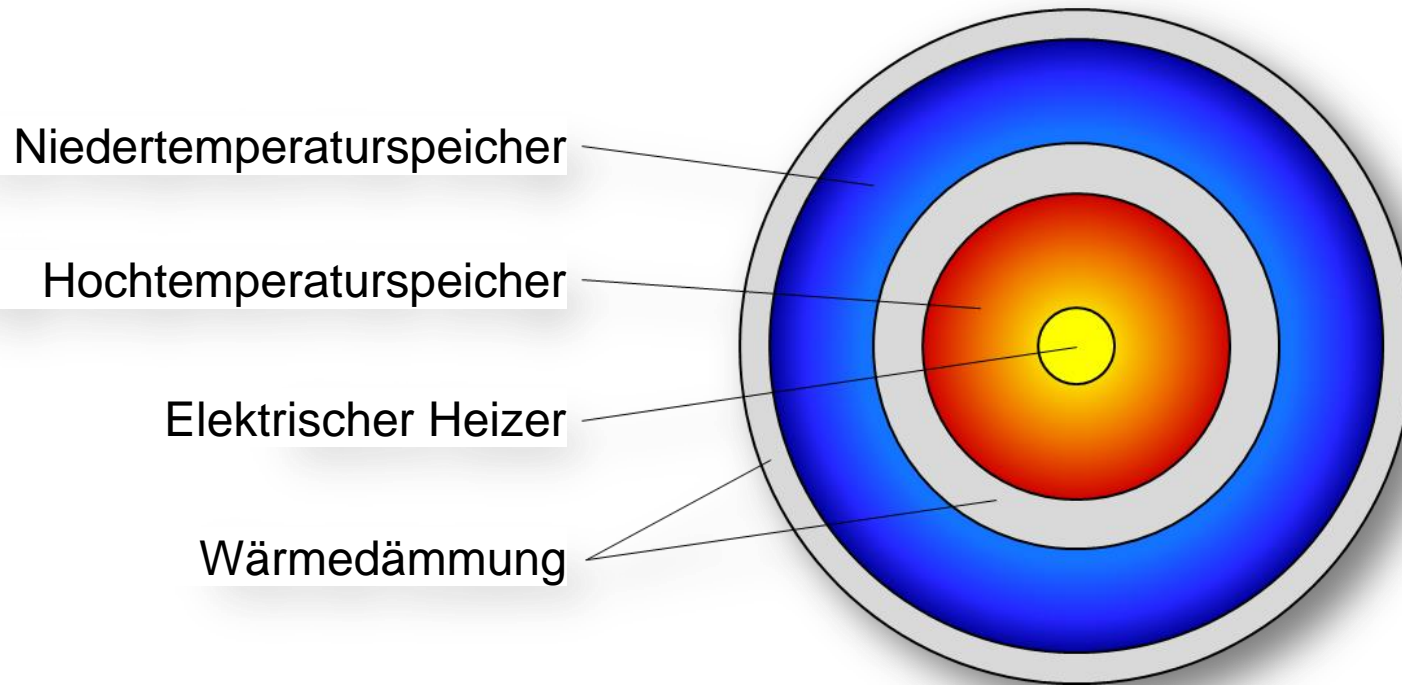
Hohe spezifische Wärmekapazität

Hoher thermische Leistung

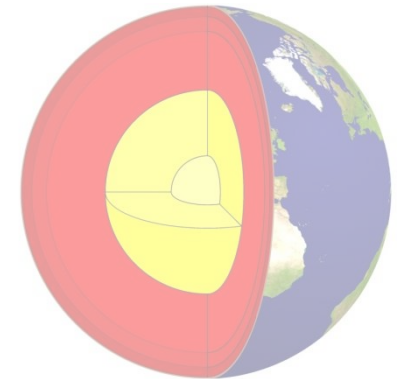
Hohe thermische Verluste

Speicherkonzept DuoTherm

Grundprinzip

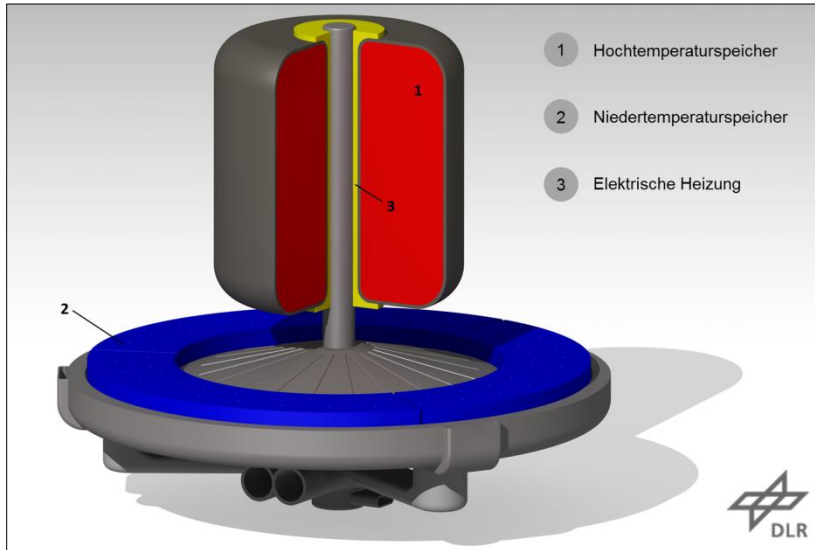


(DE102015111235 A1)



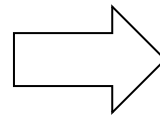
Speicherkonzept DuoTherm

Anwendung



Anwendungsmöglichkeiten

- Batteriekühlung
- Thermische Verluste Ladegeräte



Energetisches Potential in
Abhängigkeit der Randbedingungen

Aktuelles aus dem Projekt THS-Bus



Projekt THS-Bus

Übersicht



Ziel: Aufbau und Untersuchung Funktionsmuster für Flughafenbus

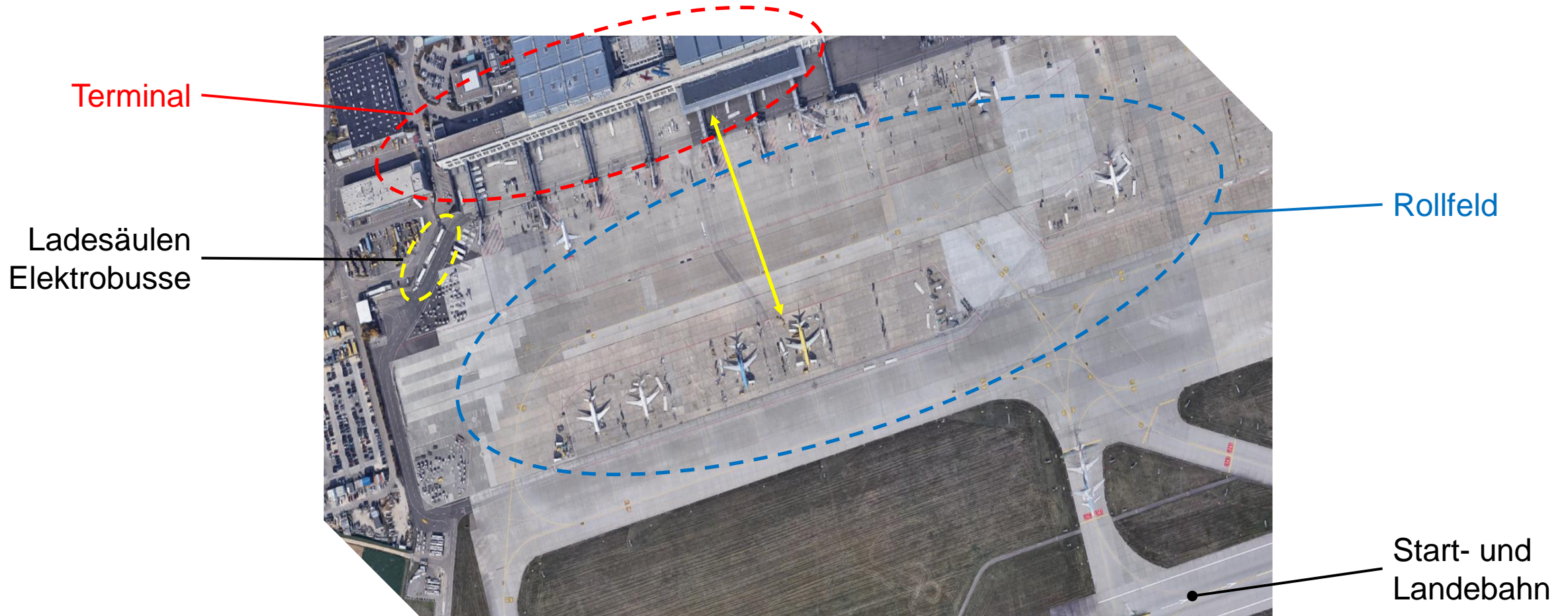
Zeitraum: 07/2018 bis 06/2021

Projekthomepage: [Aktuell noch im Aufbau](#)



Projekt THS-Bus

Übersicht Betriebsszenario



Projekt THS-Bus

Übersicht Elektrobus und Ladeinfrastruktur

Bus

- Elektrobus der Fa. COBUS
- Batteriekapazität ca. 84 kWh, Lithium-Titan-Oxid-Batterien
- Max. ca. 110 Passagiere, überwiegend Stehplätze
- Getrennte Belüftung und Klimatisierung von Fahrer- und Fahrgastraum
- Beheizung mit elektr. Heizer (20 kW), zusätzlich elektr. Standheizer (7 kW)

Ladeinfrastruktur

- Hersteller Siemens
- Zentrale Anordnung, insgesamt 16 Ladepunkte
- 690 VDC, 60 kW über Stecker
- 400 VAC, 11 kW über Stecker



[1]



[2]



[3]

[1]: <http://www.philipeichler.de/portfolio/cobus/>

[2]: <https://www.cobus-industries.de/produkte/e-cobus/>

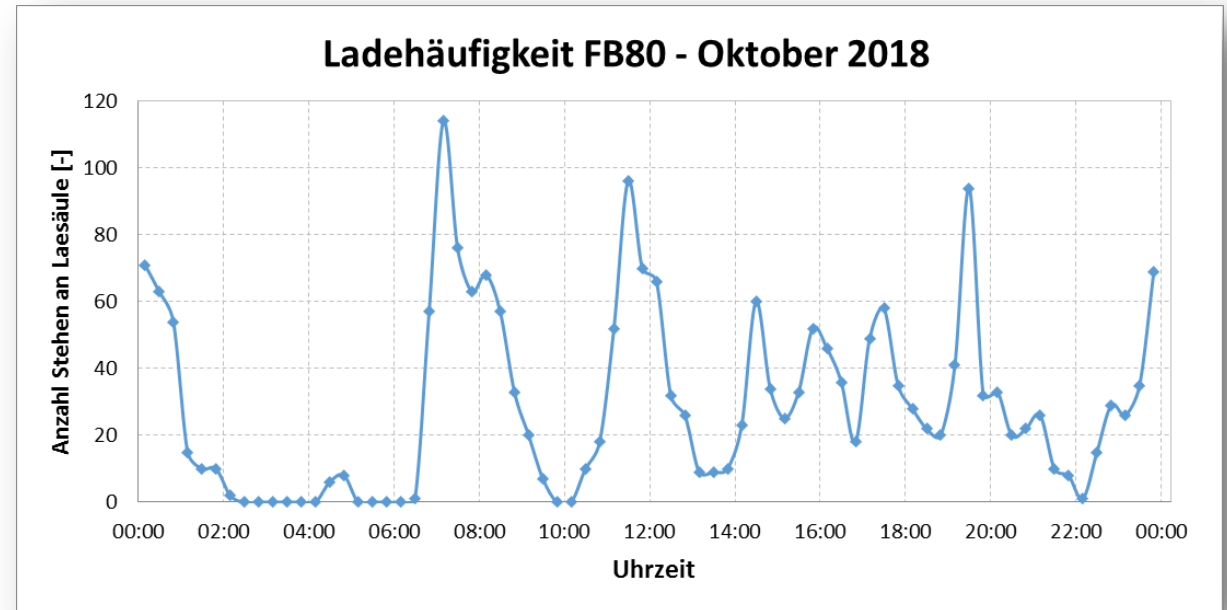
[3]: <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.flughafen-stuttgart-elektrobus-bringt-passagiere-zum-jet.ff6a63b6-4c74-4740-8a41-1cd7554f4b15.html>

Projekt THS-Bus

Betriebsszenario

Fahr- und Ladeszenario

- Pro Tag etwa 3 bis 4 Zwischenladungen
- Abstand zwischen Ladungen ca. 2 bis 4 Stunden
- Ladedauer im Mittel ca. 30 Minuten
- Lange Standzeit über Nacht ohne Beladung
- Sehr niedrige Durchschnittsgeschw. (4,6 km/h)
- Sehr lange Türöffnungszeiten

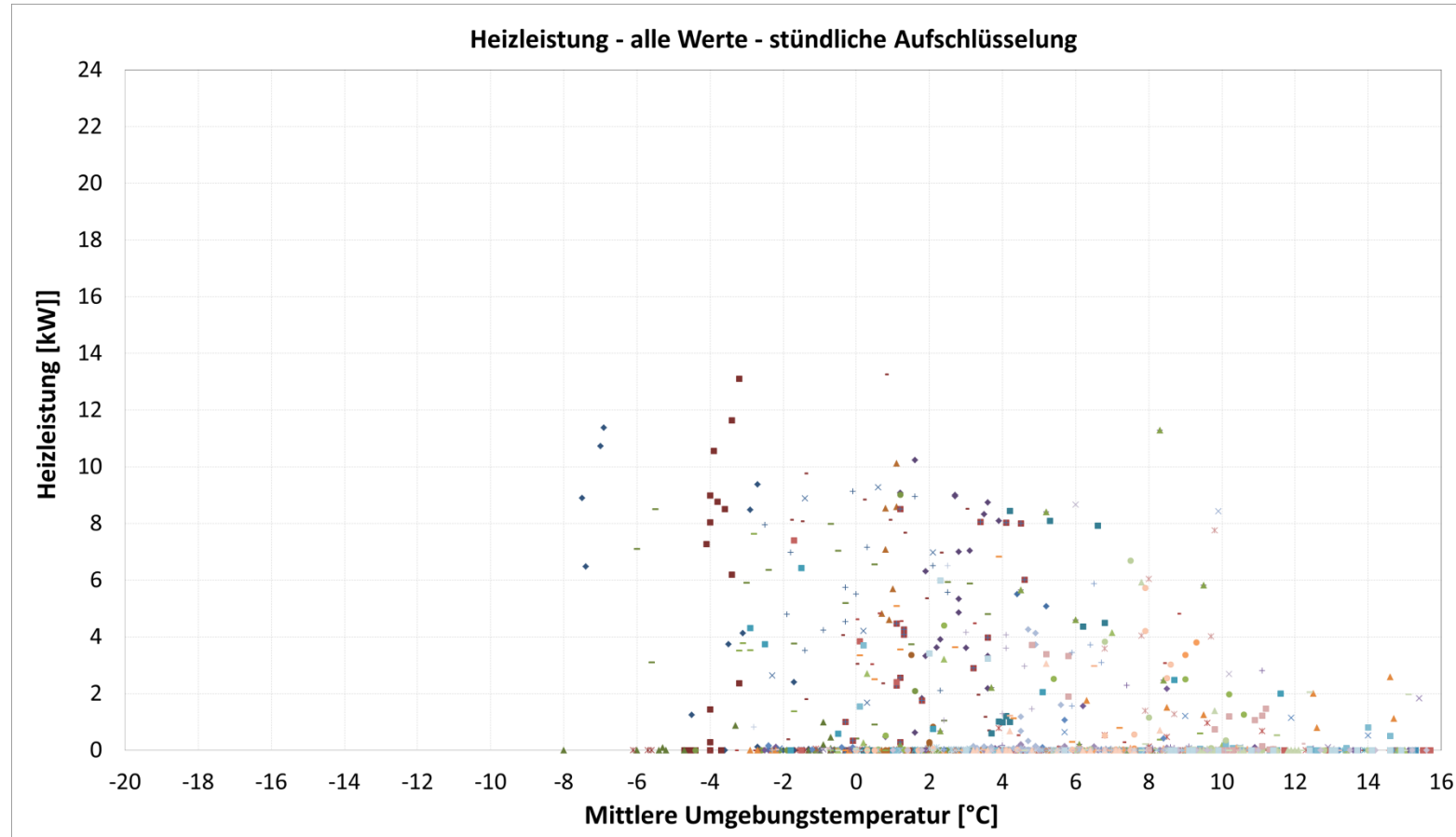


- **Beladung THS über Nacht (ca. 4 bis 5 h)**
- **Bedingt auch Zwischenladung tagsüber möglich**



Projekt THS-Bus

Messung Heizleistung

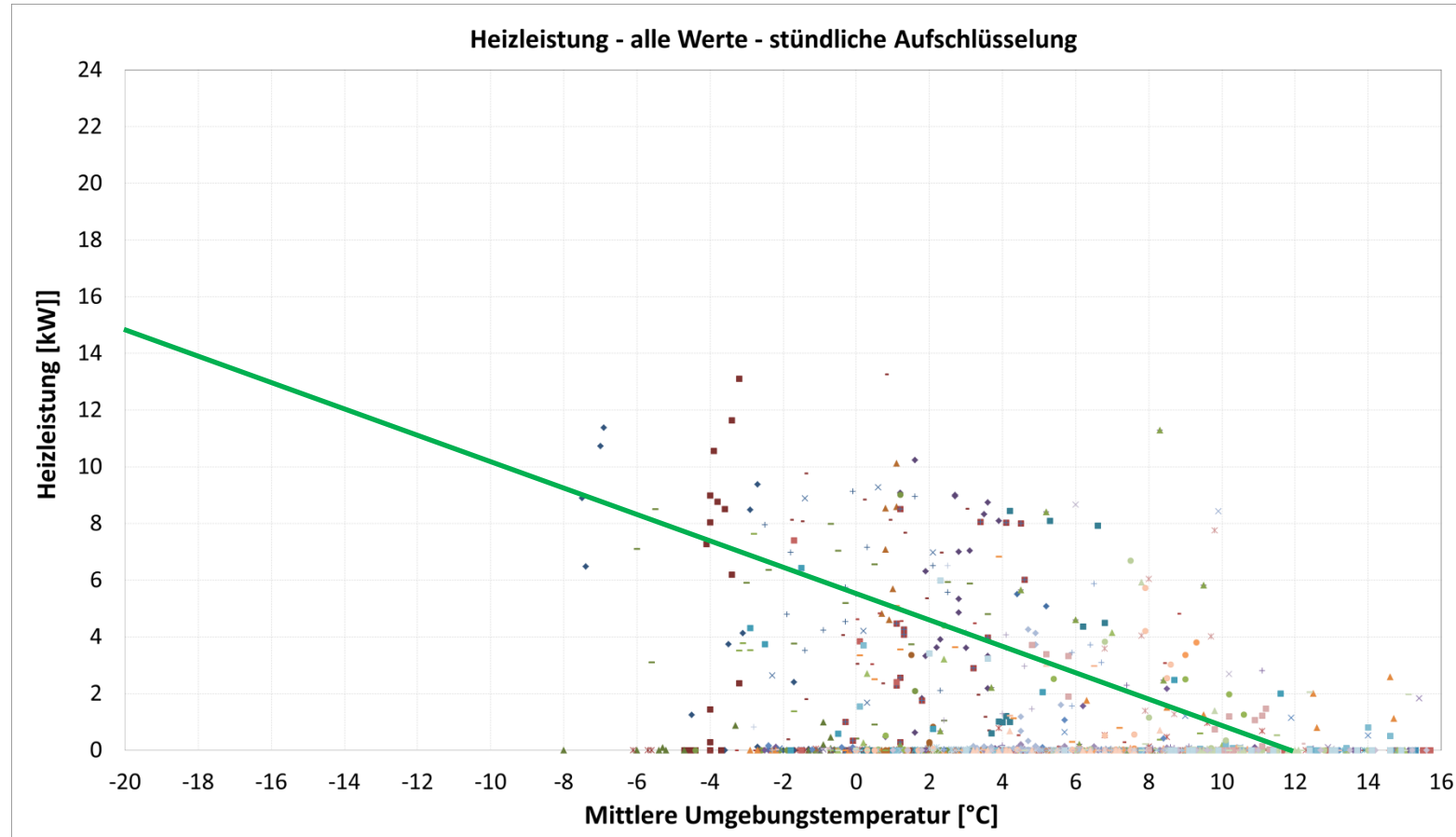


- **Häufig keine Heizleistung**
 - Bus war nicht in Betrieb
 - Kein Heizbedarf
- **Hohe Varianz der Heizleistung**
 - Türöffnung
 - Sonneneinstrahlung
 - Windgeschwindigkeit
 - Standort Bus
 - Anzahl Fahrgäste
 - Komfortbedarf Fahrer



Projekt THS-Bus

Messung Heizleistung

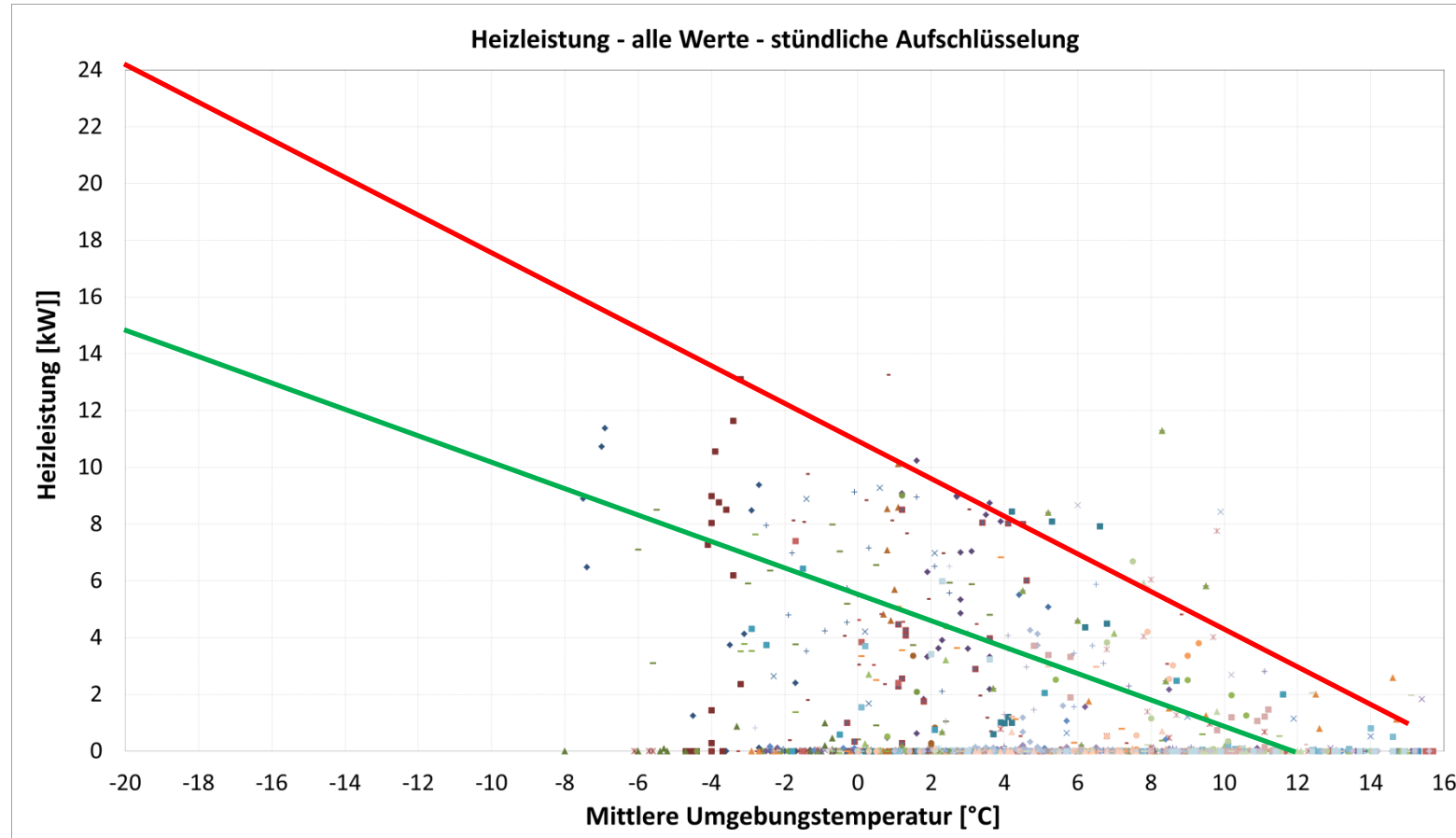


- **Mittelwert Heizleistung**
 - 4 kW @ +5 °C
 - 6 kW @ 0 °C
 - 8,5 kW @ -5 °C
 - 11 kW @ -10 °C
 - 13 kW @ -15 °C
 - 15 kW @ -20 °C



Projekt THS-Bus

Messung Heizleistung



- Mittelwert Heizleistung**

1 kW	@ +10 °C
4 kW	@ +5 °C
6 kW	@ 0 °C
8,5 kW	@ -5 °C
11 kW	@ -10 °C
13 kW	@ -15 °C
15 kW	@ -20 °C

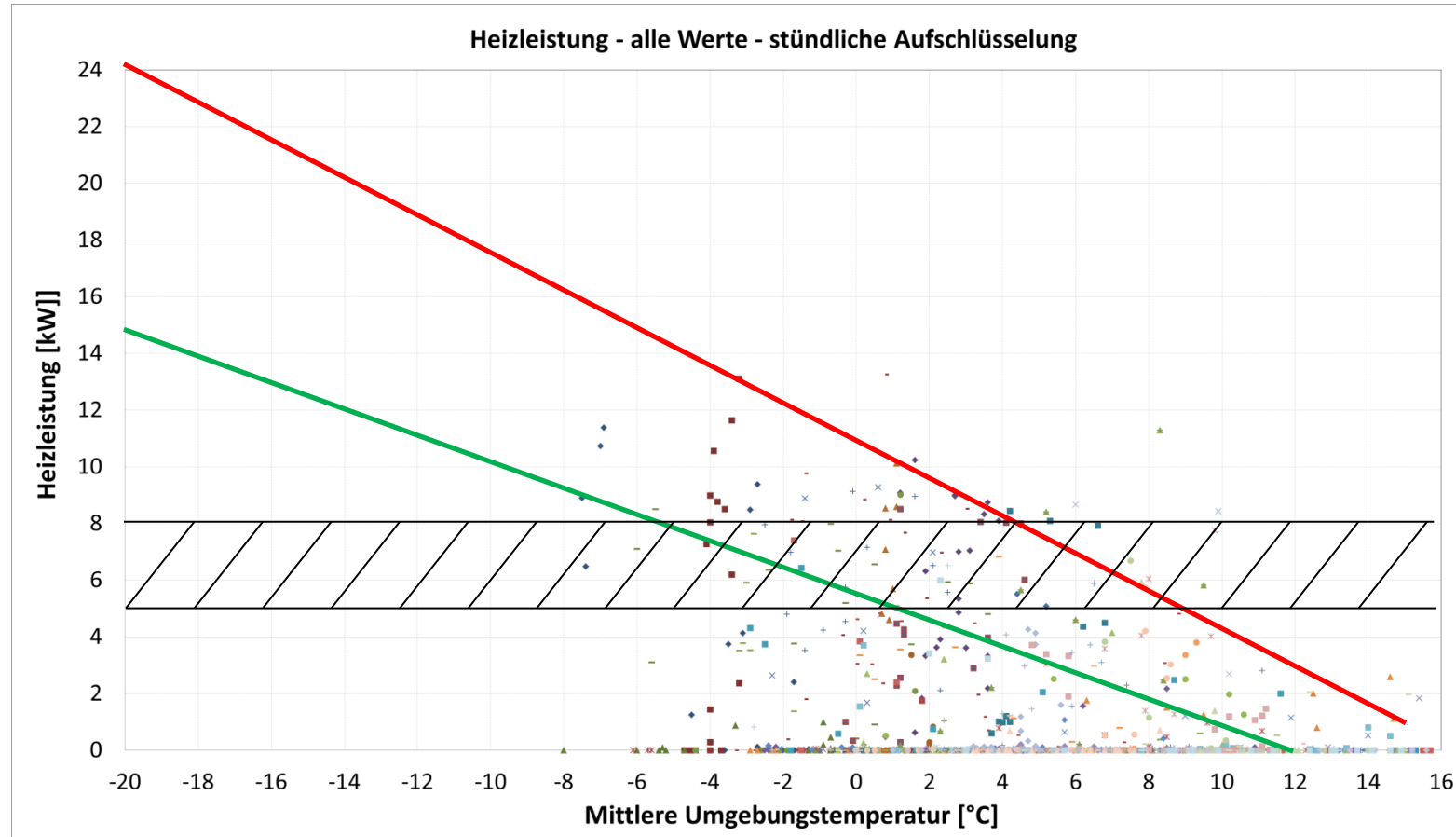
- Maximalwert Heizleistung**

4 kW	@ +10 °C
8 kW	@ +5 °C
11 kW	@ 0 °C
14 kW	@ -5 °C
17 kW	@ -10 °C
21 kW	@ -15 °C
24 kW	@ -20 °C



Projekt THS-Bus

Messung Heizleistung



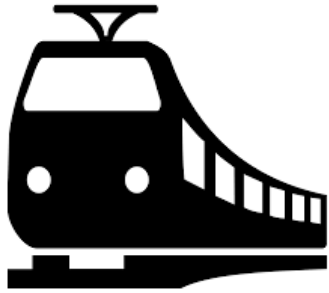
- Leistungsbedarf für Traktion und sonstige Verbraucher zwischen 5 und 8 kW
- Heizleistungsbedarf bereits bei moderaten Umgebungstemperaturen ähnlich hoch wie Leistungsbedarf für Traktion
- Höherer Heizleistungsbedarf bei niedrigen Umgebungstemperaturen im Vergleich zum Leistungsbedarf für Traktion



Weitere Anwendungsmöglichkeiten

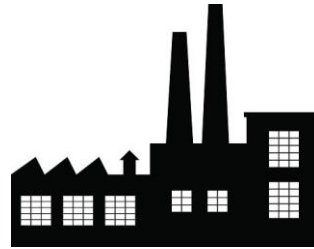


Weitere Anwendungsmöglichkeiten



[1]

Bahn



[3]

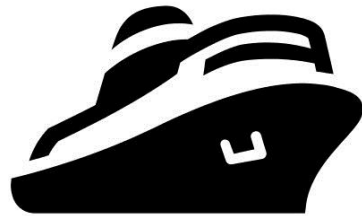
Industrieprozesse



[6]

[5]

Gebäudeheizung /
Erneuerbare Energien



[2]

Schiff



[4]

Portable Wärme

[1] : https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Bahn_aus_Zusatzzeichen_1024-15.svg; Letzter Zugriff: 15.03.2019

[2]: <https://www.royalcaribbean.com/deu/de/cruise-ships>; Letzter Zugriff: 15.03.2019

[3]:<https://de.clipartlogo.com/istock/black-factory-icon-1764723.html>; Letzter Zugriff: 15.03.2019

[4]: <https://de.kisspng.com/png-dhqe6/>; Letzter Zugriff: 15.03.2019

[5]: <https://de.kisspng.com/png-v1onbp/>; Letzter Zugriff: 15.03.2019

[6]: <https://gamesageddon.com/stock/media?id=33814672>; Letzter Zugriff: 15.03.2019



Mono Therm

Werner Kraft M.Sc.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Institut für Fahrzeugkonzepte

Pfaffenwaldring 38-40

70569 Stuttgart

werner.kraft@dlr.de

+49 (0)711 6862 - 273

