



Sachbericht
zum
F/E-Thema Reg.-Nr. 93/04

„Latentwärmespeicher für Nutzfahrzeuge“

Auftraggeber: Euro Norm GmbH
Stralauer Platz 34
10243 Berlin

Auftragnehmer: Kali-Umwelttechnik GmbH Sondershausen
(K-UTEC)
Am Petersenschacht 7
99706 Sondershausen

Sondershausen, den 25.06.2007

Dr. Thoma
Geschäftsführer

Dipl.-Phys. Bach
Abteilungsleiter Verfahrenstechnik

Dr. Scherzberg
Projektbearbeiter

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
2	Entwicklung von Stoffsystemen für eine Wärmespeicherung von Abwärme von Verbrennungsmotoren als latente und fühlbare Wärme und Festlegung des Wärmeübertragungsprinzips	8
2.1	Aufgabenstellung und Vorgehensweise	8
2.2	Ergebnis von Voruntersuchungen	9
2.3	Gesamtbewertung und Auswahl der für den Einsatz als Wärmespeichermaterial geeignetsten Stoffsysteme	14
3	Entwicklung von Speichern zur Speicherung von Motorabwärme im Temperaturbereich < 100 °C	16
3.1	Bau und Erprobung eines 10 l-Speichers mit Rohrschlange aus Glas (Typ I)	16
3.2	Bau und Erprobung eines 50 kg-Speichers mit Haarnadel-Rohrbündelaustauscher (Typ II)	19
3.3	Bau und Erprobung eines 100 kg-Wärmespeichers mit Plattenwärmeaustauscher (Typ III)	23
3.4	Bau und Erprobung eines Speichers mit hoher Entnahmeleistung (Hybrid-Speicher, Typ IV)	25
4	Untersuchungen zu Hochtemperatur-Wärmespeichern	32
4.1	Bewertung untersuchter PCM für Hochtemperaturzelle	33

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Abkühlkurven verschiedener Stoffe in 300 ml-Rundzelle im Vergleich zu Wasser ..	10
Abbildung 2:	Temperaturverlauf in 1l-Zelle mit Luftkühlung	11
Abbildung 3:	Wärmeabgabe des Stoffsystems NaOH · H ₂ O	12
Abbildung 4:	Abkühlkurven des Systems Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O (70 %) + MgCl ₂ · 6H ₂ O (30 %)	13
Abbildung 5:	Speicherzelle vom Typ I	17
Abbildung 6:	Abkühlung von PCM 70/60-Schmelze im Dewargefäß mit Luft (Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O + MgCl ₂ · 6H ₂ O 1 : 1)	18
Abbildung 7:	Aufbau der Speicherzelle vom Typ II	20
Abbildung 8:	Temperaturverlauf der 50 kg-Zelle (Typ II) bei 35 l/h Belastung	21
Abbildung 9:	Wärmeabgabe der 50 kg-Zelle (Typ II) bei 35 l/h Belastung	22
Abbildung 10:	100 kg Zelle vom Typ III	24
Abbildung 11:	Aufbau und Funktionselemente des Hybridspeichers vom Typ IV	26
Abbildung 12:	Aufbau des Prüfstandes – Laden des Speichers –	27

Abbildung 13: Aufbau des Prüfstandes – Entladen des Speichers –	28
Abbildung 14: Entladecharakteristik des 1,5 l-Hybridspeichers	30
Abbildung 15: Entladecharakteristik des 3 l-Hybridspeichers	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich von Speichersalzsystemen	15
Tabelle 2: Kurzzeitwärmespeicher für Kraftfahrzeuge vom Typ IV – Erprobungsdaten und Vorgaben –	29
Tabelle 3: Haupteigenschaften von Hochtemperatur-PCM-Schmelzen	33

1 Zusammenfassung

Durch die im Rahmen des Projektes entwickelten und erprobten Wärmespeicher wird folgender Anwendungsbereich abgedeckt:

- Speichertemperatur: + 50 bis + 300 °C
- Ladung: mit heißer Motorkühlflüssigkeit bzw. mit heißem Abgas aus dem Abgasstrang
- Entladung:
 - mit kalter Motorkühlflüssigkeit
 - mit kaltem Wasser
 - mit kalter Luft
- Speichergrößen: 1,5 bis 50 Liter, kombinierbar zu noch größeren Einheiten, falls erforderlich
- Speicherleistung: 0,1 bis 15 Kilowatt
- Gespeicherte Energiemenge: 500 kJ bis 25.000 kJ
- Austrittstemperatur bei Wärmeentnahme:
 - Luft: + 40 bis + 250 °C
 - Flüssigkeit: + 40 bis + 90 °C
- Speichermasse: 3 kg bis 100 kg
- Dauer der Wärmeentnahme: wahlweise zwischen 1 Minute bis 1 Woche
- Dauer der Lagerung bis zur Wärmeentnahme: 0 bis 2 Tage

Damit lassen sich alle aus heutiger Sicht denkbaren Anwendungen wie

- Motorwarmhaltung zwischen zwei Starts
- Motoraufwärmung bei Kaltstart bis – 20 °C
- Katalysatorwarmhaltung zwischen zwei Starts
- Katalysatoraufwärmung bei Kaltstart bis – 20 °C
- Kabinenheizung bei Fahrzeugstillstand

realisieren.

Die verschiedenen Speichertypen sind im Prinzip erprobt, bedürfen aber noch weiterer Vervollkommnung, insbesondere der Isolierung und Einpassung in konkrete Fahrzeuge sowie der in der Autoindustrie üblichen umfangreichen Prüfungen und Tests:

<u>Speichertyp I</u>	(Rundspeicher)
Behälter:	Rundzelle mit Doppelwandisolation
Wärmetauscher:	Rohrschlange aus Metall oder Glas
Speichermaterial:	NaOH · H ₂ O, Na-Acetat · 3H ₂ O, Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O, MgCl ₂ · 6H ₂ O und Gemische
Anordnung des PCM:	Im Behälter eingegossen
Speicherbereich:	+ 40 bis + 115 °C
PCM-Volumen:	2,5 Liter bis 10 Liter
Speicherkapazität:	bis 4.500 kJ
Entladeleistung:	min. 0,05 kW (bei Speicherzeiten bis zu 1 Woche)
Lademedium:	Motorkühlflüssigkeit, Wasser, Heißluft
Entlademedium:	Motorkühlflüssigkeit, Wasser, Luft
<u>Speichertyp II</u>	(prismatischer Speicher)
Behälter:	Prismabehälter mit Außenisolation
Wärmetauscher:	Haarnadel-Rohrschlängentauscher aus Metall
Speichermaterial:	NaOH · H ₂ O, Na-Acetat · 3H ₂ O, Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O, MgCl ₂ · 6H ₂ O und Gemische (wie Typ I)
Anordnung des PCM:	Im Behälter eingegossen
Speicherbereich:	+ 40 bis + 95 °C
PCM-Volumen:	bis 25 Liter
Speicherkapazität:	bis 6.500kJ
Entladeleistung:	bis 5 kW
Lademedium:	Motorkühlflüssigkeit, Wasser, Heißluft
Entlademedium:	Motorkühlflüssigkeit, Wasser, Luft

<u>Speichertyp III</u>	(prismatischer Speicher)
Behälter:	Prismabehälter mit Außenisolation
Wärmetauscher:	Profil-Plattenheizkörper aus Stahlblech
Speichermaterial:	wie Typ I
Anordnung des PCM:	Im Behälter eingegossen
Speicherbereich:	+ 40 bis + 95 °C
PCM-Volumen:	bis 40 Liter
Speicherkapazität:	bis 30.000 kJ
Entladeleistung:	bis 6 kW
Lademedium:	Motorkühflüssigkeit, Wasser, Heißluft
Entlademedium:	Motorkühflüssigkeit, Wasser, Luft

<u>Speichertyp IV</u>	(Hybridspeicher)
Behälter:	Rundzelle mit Doppelwandisolation
Wärmetauscher:	Innerer mit PCM-Schmelze gefüllter Metallbehälter
Speichermaterial:	NaOH · H ₂ O, Na-Acetat · 3H ₂ O, Mischungen von Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O und MgCl ₂ · 6H ₂ O
Speicherbereich:	+ 40 bis + 95 °C
PCM-Volumen:	0,5 Liter bis 1,0 Liter
Funktion des PCM:	Abdeckung der Wärmeverluste bei Lagerung
Speicherkapazität:	500 bis 1.000 kJ
Entladeleistung:	5 bis 15 kW
Lademedium:	Motorkühflüssigkeit, Wasser
Entlademedium:	Motorkühflüssigkeit, Wasser

<u>Speichertyp V</u>	
Behälter:	Rundzelle mit Doppelwandisolation
Wärmetauscher:	Doppelrohrtauscher aus Metall

Speichermaterial:	Binäre und ternäre Alkalinitrat-Nitritgemische
Anordnung des PCM:	Im Behälter eingegossen
Speicherbereich:	+ 80 bis + 300 °C
PCM-Volumen:	2,5 Liter
Speicherkapazität:	bis 2.500 kJ
Entladeleistung:	0,3 bis 0,5 kW
Lademedium:	Heißes Abgas aus dem Abgasstrang
Entlademedium:	Luft

Durch die Entwicklungsarbeiten wurden folgende innovativen Stoffsysteme untersucht und mit positivem Ergebnis erprobt:

- Natriumhydroxid-Monohydrat ($\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$)
Schmelzpunkt: 64 °C
Latentwärme: ca. 270 kJ/kg = ca. 460 kJ/h
Dichte: 1,72 kg/l
Preis: < 80 €/100 kg
Wasseranteil: 31 %
Der Speicherstoff $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ist annähernd leistungsfähig wie das wesentlich teurere und toxischere Stoffsystem $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ und übertrifft die spezifische Wärmespeicherfähigkeit von Natriumacetat-Trihydrat.
- Nichteutektische Stoffmischungen aus Magnesiumnitrat-Hexahydrat und Magnesiumchlorid-Hexahydrat, z.B. Mischung 50 : 50 Masseprozent mit variablem Erstarrungsbereich zwischen 72 und 59 °C.
- Lithiumfreie Salzmischungen für Hochtemperatur-PCM mit Erstarrungspunkten zwischen 120 und 235 °C und Verwendbarkeit bis + 400 °C bzw. + 500 °C ohne Zersetzung auf der Basis von Kaliumnitrat, Natriumnitrat und Natriumnitrit.
Die mit positivem Ergebnis erprobten Hochtemperatur-Wärmespeicherstoffe auf der Basis binärer oder ternärer Alkalinitrate und –nitrite haben nicht wie die Monostoffe LiNO_3 bzw. LiClO_4 die negative Eigenschaft der Gefäßzerstörung beim Phasenwechsel.

2 Entwicklung von Stoffsystemen für eine Wärmespeicherung von Abwärme von Verbrennungsmotoren als latente und fühlbare Wärme und Festlegung des Wärmeübertragungsprinzips

2.1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Die Abwärme von Verbrennungsmotoren fällt prinzipiell in zwei Formen mit unterschiedlichem Temperaturniveau an:

1. als heiße Motorkühlflüssigkeit mit Temperaturen ≤ 90 °C
2. als heiße Verbrennungsgase mit Temperaturen von bis etwa 500 °C im Abgasstrang.

Diese Wärme wird mit Ausnahme der Heizung des Fahrzeuges während der Fahrt nicht verwertet. Eine Verwertung dieser Wärmen setzt eine Speicherung in einem gegenüber der Umgebung isolierten Stoffsystem voraus, das in der Lage ist, Wärme in möglichst großem Umfang reversibel aufzunehmen, die Wärme als fühlbare oder latente Wärme über eine bestimmte Zeit zu speichern und diese bei Bedarf langsam oder auch in kurzer Zeit an einen Wärmeträger, etwa kalte Motorkühlflüssigkeit oder kalte Luft abzugeben und diese vorzuwärmen.

Die Speicherung als Latentwärme hat den großen Vorteil, dass in einer vorgegebenen Masse bzw. einem vorgegebenen Volumen über die mit einer Temperaturerhöhung einhergehende Wärmespeicherung als fühlbare Wärme hinaus noch zusätzlich Wärme bei einer konstanten Temperatur latent gespeichert und wieder entnommen werden kann. Solche latente Wärmespeichereffekte sind stets an eine Phasenumwandlung, meistens ein Schmelzen oder Erstarren eines Stoffes, gebunden.

Nach Erreichen des Schmelzpunktes beginnt das Speichermaterial zu schmelzen und erhöht trotz weiterer Einspeicherung von Wärme seine Temperatur nicht, bis das Material komplett geschmolzen ist. Die einphasige Schmelze verhält sich wie eine Flüssigkeit und nimmt Wärme unter stetigem Temperaturanstieg auf. Bei Wärmeentzug wird zunächst die fühlbare Wärme der flüssigen Schmelze abgegeben, bis die Temperatur den Erstarrungspunkt erreicht hat.

Zur Wärmespeicherung geeignete Stoffsysteme müssen innerhalb des Temperaturintervalls, in welchem der Speicher arbeiten soll, einen Phasenumwandlungspunkt haben, wobei bei gegebener Masse die Menge der gespeicherten Wärme von drei Teilbeträgen abhängt:

1. der Wärmekapazität des Festkörpers
2. der Wärmekapazität der flüssigen Schmelze
3. der Schmelzenthalpie (Latentwärme).

2.2 Ergebnis von Voruntersuchungen

Durch Voruntersuchungen mit Salzschnelzen verschiedener Art in einer 300 ml Rundzelle wurden ausgewählte Stoffsysteme untersucht. Die heiÙe Salzschnelze wurde extern aufgeschmolzen und mit vorgegebener Temperatur in die Zelle eingefüllt, die Zelle abgedeckt und der Zeit-Temperaturverlauf mit einer Temperaturmessung im Kern sowie am Zellenrand bestimmt. Im Vergleich wurden Salzschnelzen in einer 1 l-Kupferzelle von Würfelform untersucht, die durch einen definierten Luftstrom über eine seitliche Kammer gekühlt wurde.

Abbildung 1: Abkühlkurven verschiedener Stoffe in 300 ml-Rundzelle im Vergleich zu Wasser

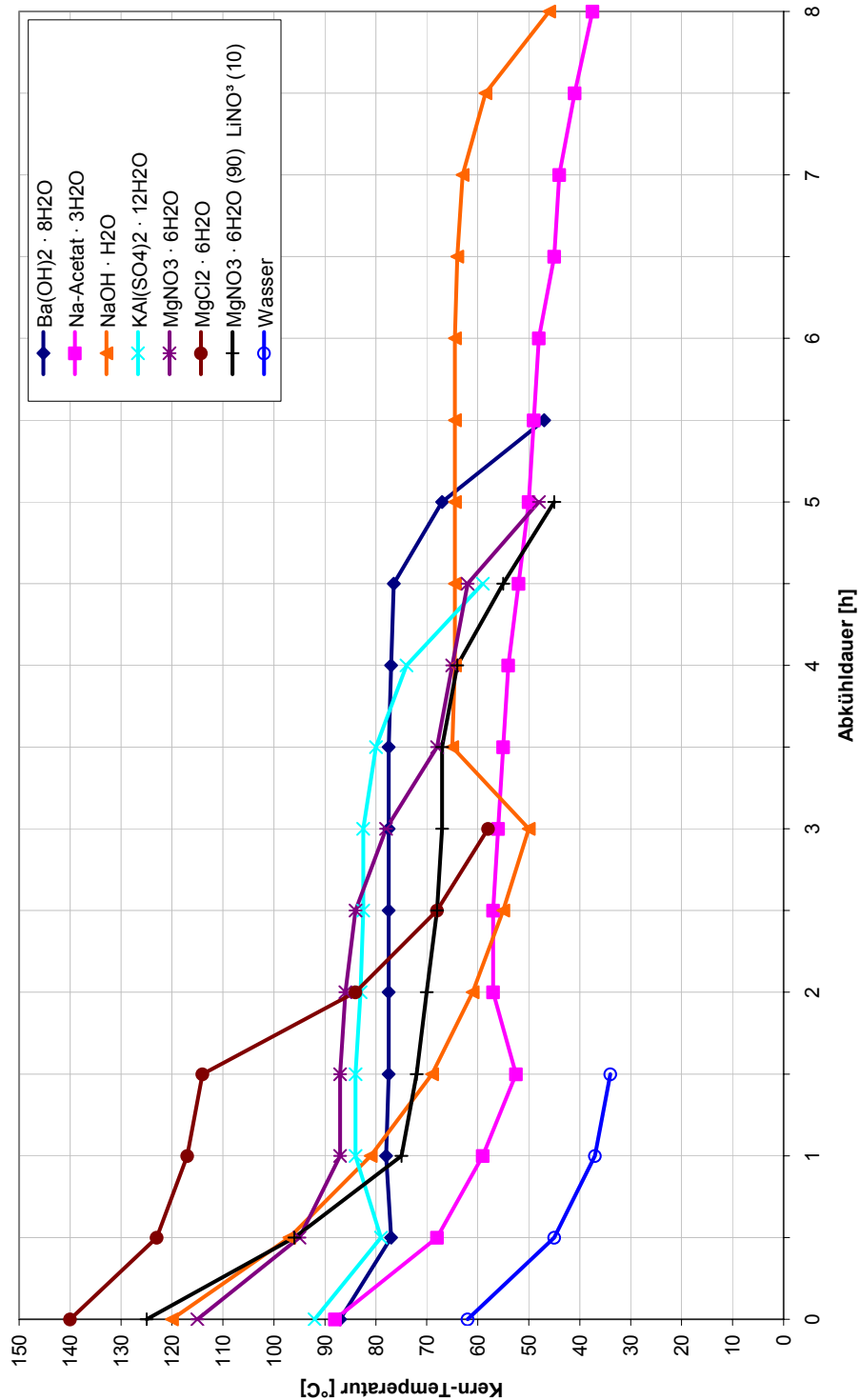


Abbildung 2: Temperaturverlauf in 1l-Zelle mit Luftkühlung

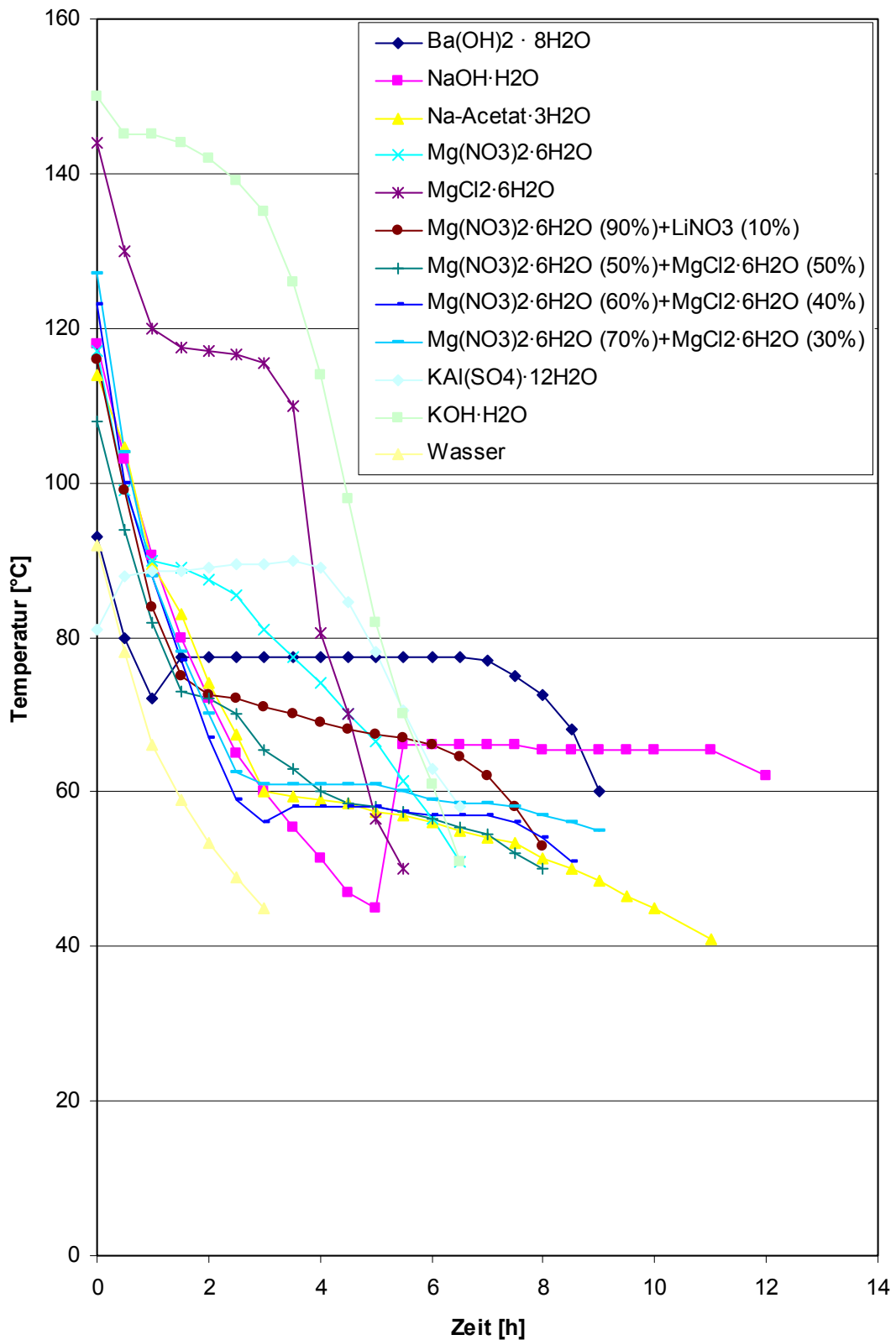


Abbildung 3: Wärmeabgabe des Stoffsystems NaOH · H₂O

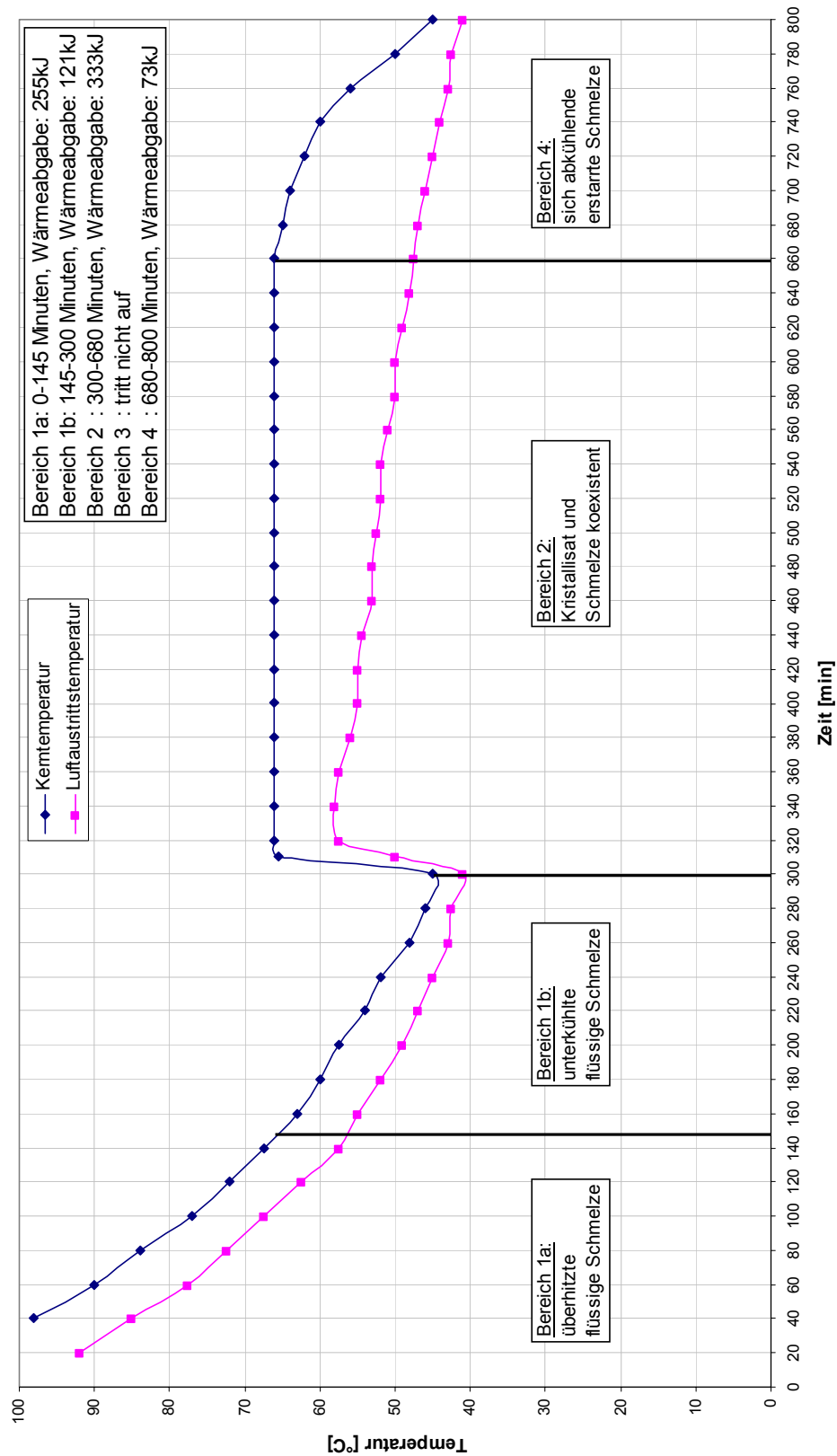
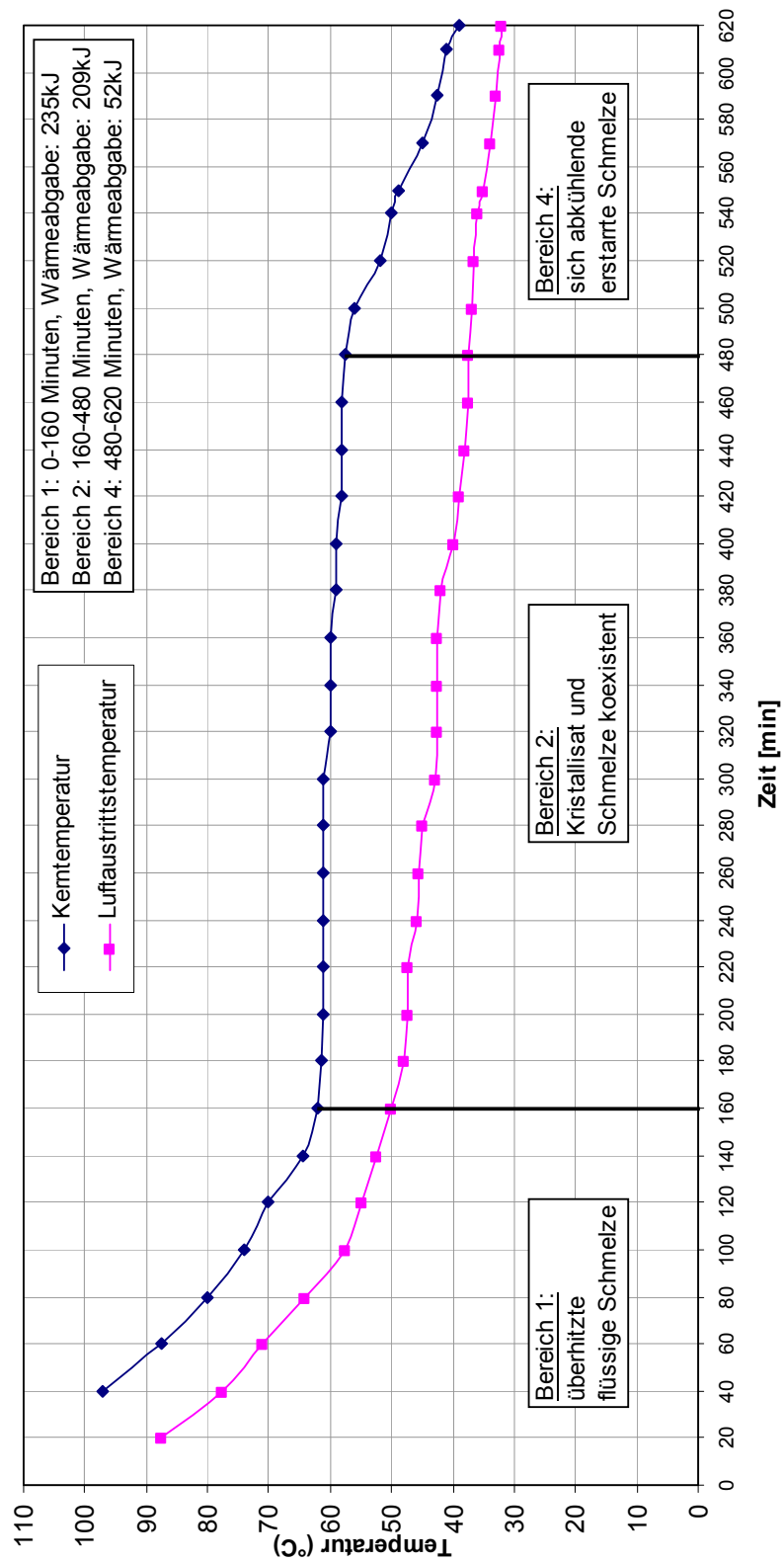


Abbildung 4: Abkühlkurven des Systems $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (70 %) + $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (30 %)



2.3 Gesamtbewertung und Auswahl der für den Einsatz als Wärmespeichermaterial geeignetsten Stoffsysteme

Scheidet man die aus preislichen und physikalischen Eigenschaften ungeeigneten Stoffe Bariumhydroxid-Oktahydrat, Kalium-Alaun und Aluminiumsulfathydrat sowie das Magnesiumchlorid-Hexahydrat als Einzelsalz aus, so verbleiben die in der folgenden Tabelle 1 miteinander verglichenen Stoffsysteme für eine bevorzugte Anwendung.

Tabelle 1: Vergleich von Speichersalzsystemen

Stoffsystem (Chemische Formel)	Schmelzpunkt [°C]		Latentwärme [kJ]		Preis [€/100 kg]	Korrosivität	Neigung zur Unterkühlung	Max. Temperatur- belastbarkeit [°C]
	Beginn	Ende	[kJ/kg]	[kJ/l]				
Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	89	89	160	260	141	gering	gering	ca. 150
80 % Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O 20 % MgCl ₂ · 6H ₂ O	72	57	162	262	16	gering	gering	ca. 150
70 % Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O 30 % MgCl ₂ · 6H ₂ O	63	57	164	265	103	gering	gering	ca. 155
60 % Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O 40 % MgCl ₂ · 6H ₂ O	58	57	166	267	91	gering	gering	ca. 155
50 % Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O 50 % MgCl ₂ · 6H ₂ O	72	57	168	270	78	gering	gering	ca. 160
90 % Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O 10 % LiNO ₃	72	72	182	298	884	gering	gering	ca. 150
NaOH · H ₂ O	65	64	272	468	85	mittel	mittel	ca. 180
Na-Acetat · 3H ₂ O	58	57	265	382	14	gering	mittel	ca. 120

3 Entwicklung von Speichern zur Speicherung von Motorabwärme im Temperaturbereich < 100 °C

3.1 Bau und Erprobung eines 10 l-Speichers mit Rohrschlange aus Glas (Typ I)

Die Versuchsanordnung bestand aus

1 Dewargefäß (1) mit folgenden Abmessungen

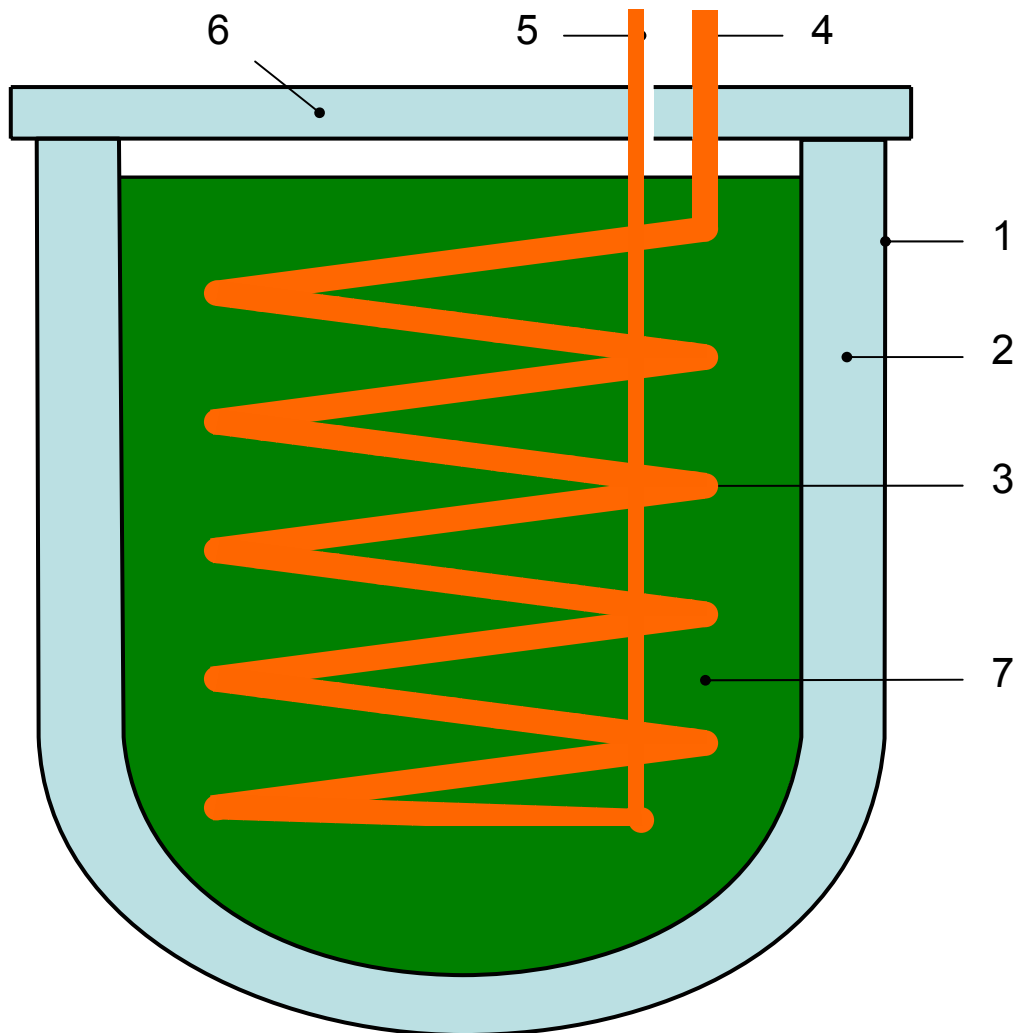
- Innendurchmesser: 200 mm
- Tiefe: -
- Gesamtvolumen: -
- Nutzbares Volumen: 10 l
- Material: Borasilikatglas -

1 Heizschlange (3) mit folgenden Abmessungen

- Durchmesser außen: 185 mm
- Durchmesser innen: 160 mm
- Windungsanzahl: 17
- Rohrinne Durchmesser: 10 mm
- Wandstärke: 1 – 1,2 mm
- Gesamtrohrlänge: 10 m
- Wärmetauschfläche: 0,40 m²

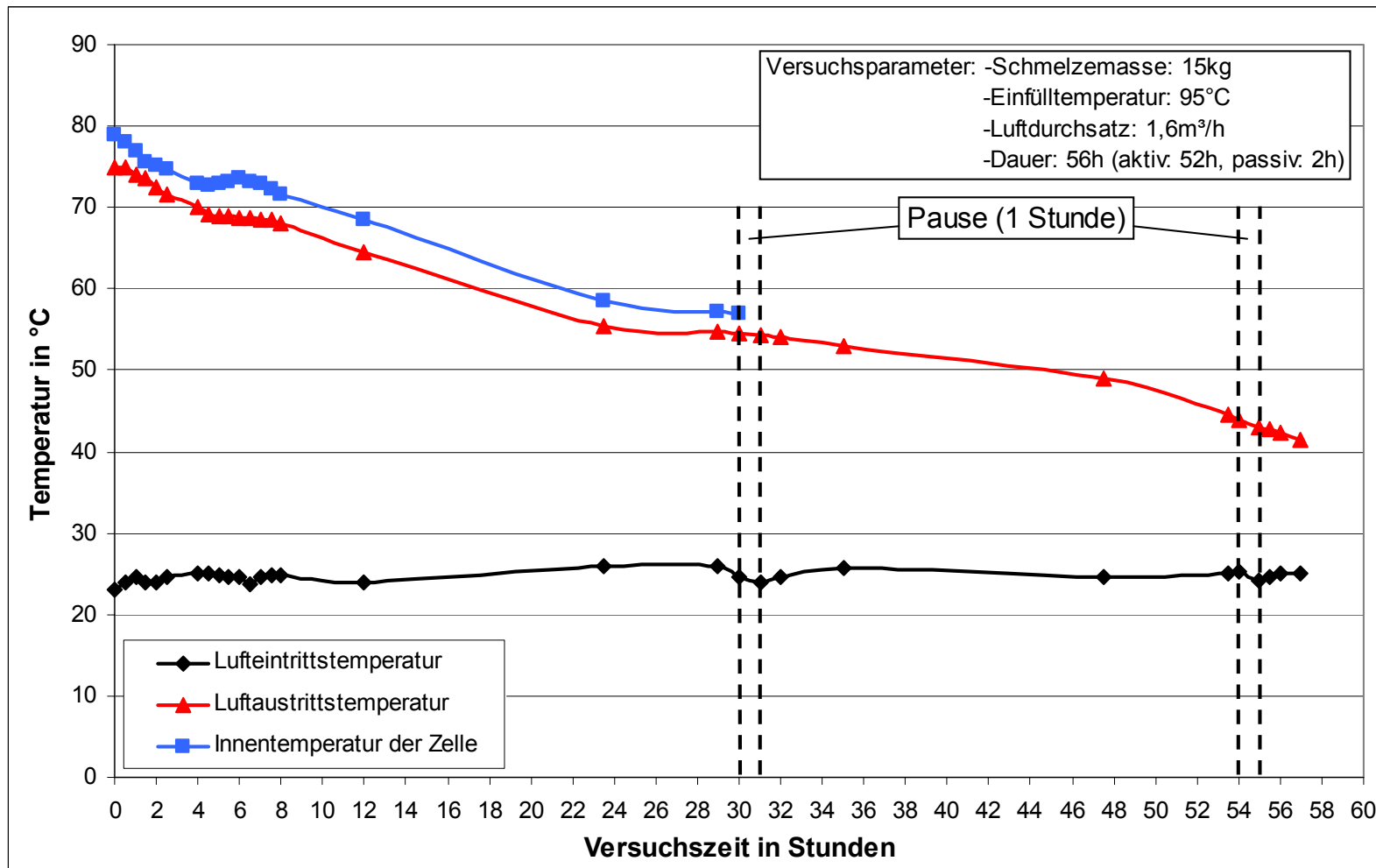
Die Rohrschlange wurde 1,6 bzw. 2,4 m³/h Luft durchströmt. Dadurch ergab sich als Strömungsgeschwindigkeit 5,7 bzw. 8,5 m/s. Das Dewar-Gefäß war in einem handelsüblichen Behälter mit Deckel eingelassen (Durchmesser 250 mm, Höhe 600 mm). Die erforderliche Luft wurde mit einem Labor-Gebläse erzeugt und mit einem Durchflussmesser gemessen. In einem Parallelversuch wurde mit 10 l/h Wasser gekühlt.

Abbildung 5: Speicherzelle vom Typ I



- 1 Dewargefäß
- 2 Vakuum
- 3 Rohrschlange
- 4 Lufteintritt
- 5 Luftaustritt
- 6 Deckel mit Isolation
- 7 PCM-Schmelze

Abbildung 6: Abkühlung von PCM 70/60-Schmelze im Dewargefäß mit Luft ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1 : 1)

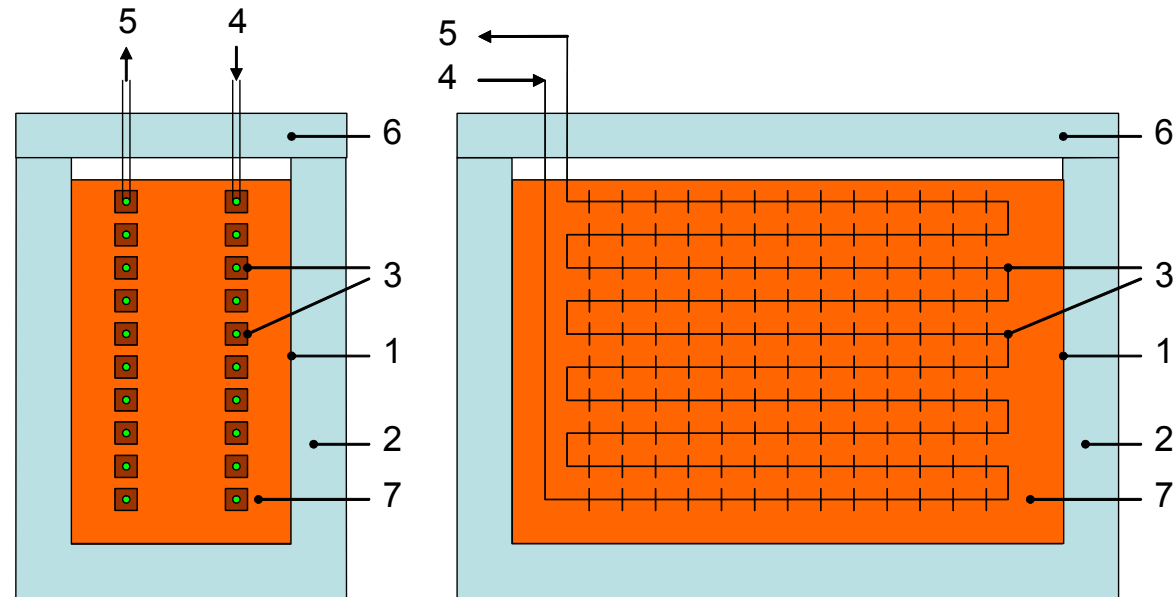


3.2 Bau und Erprobung eines 50 kg-Speichers mit Haarnadel-Rohrbündelaustauscher (Typ II)

Der Wärmespeicher besteht aus folgenden Bauelementen:

- | | | |
|---|--------------------------------------|----------------------------------|
| 1 | Prismatischer Behälter aus Blech (1) | |
| | Länge: | 500 mm |
| | Höhe: | 400 mm |
| | Breite: | 125 mm |
| | Volumen: | 25 l |
| | Gewicht des Behälters: | 8,7 kg |
| 1 | Haarnadel-Rohrbündelaustauscher (2) | |
| | Rohrlänge: | 24 m |
| | Rohrdurchmesser: | 10 mm |
| | Plattenabmessung: | 20 x 400 mm |
| | Gewicht des Wärmeaustauschers: | 10,5 kg |
| | Volumen: | 2,9 Liter |
| | | Gesamtfläche: 9,6 m ² |
| 1 | Isolierhülle aus Styropor-Platten: | 1,0 kg (3) |

Abbildung 7: Aufbau der Speicherzelle vom Typ II



- 1 Gefäß aus Stahlblech
- 2 Isolation
- 3 Rohrschlange mit Wärmeleitplatten
- 4 Lufteintritt
- 5 Luftaustritt
- 6 Deckel mit Isolation
- 7 PCM-Schmelze

Abbildung 8: Temperaturverlauf der 50 kg-Zelle (Typ II) bei 35 l/h Belastung

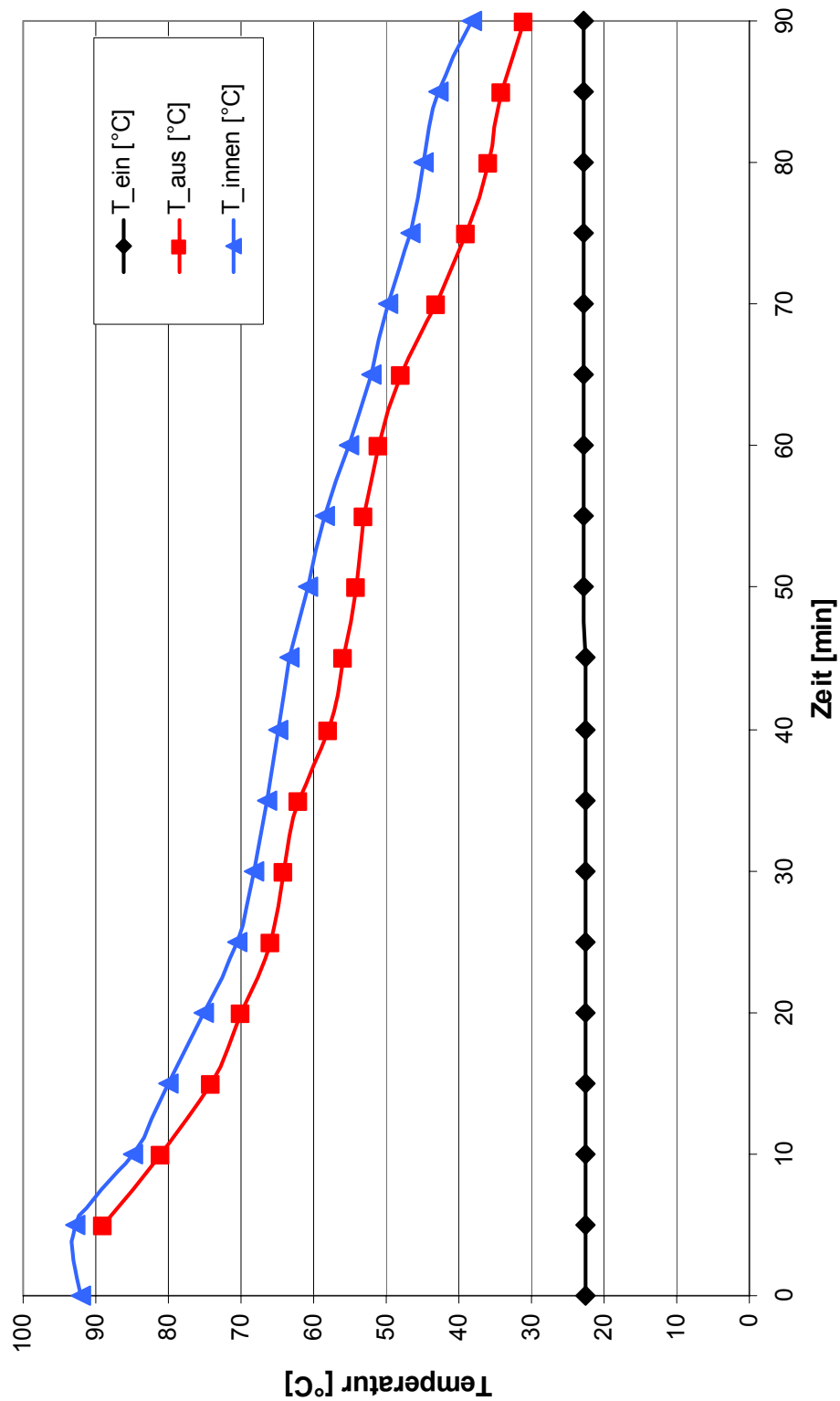
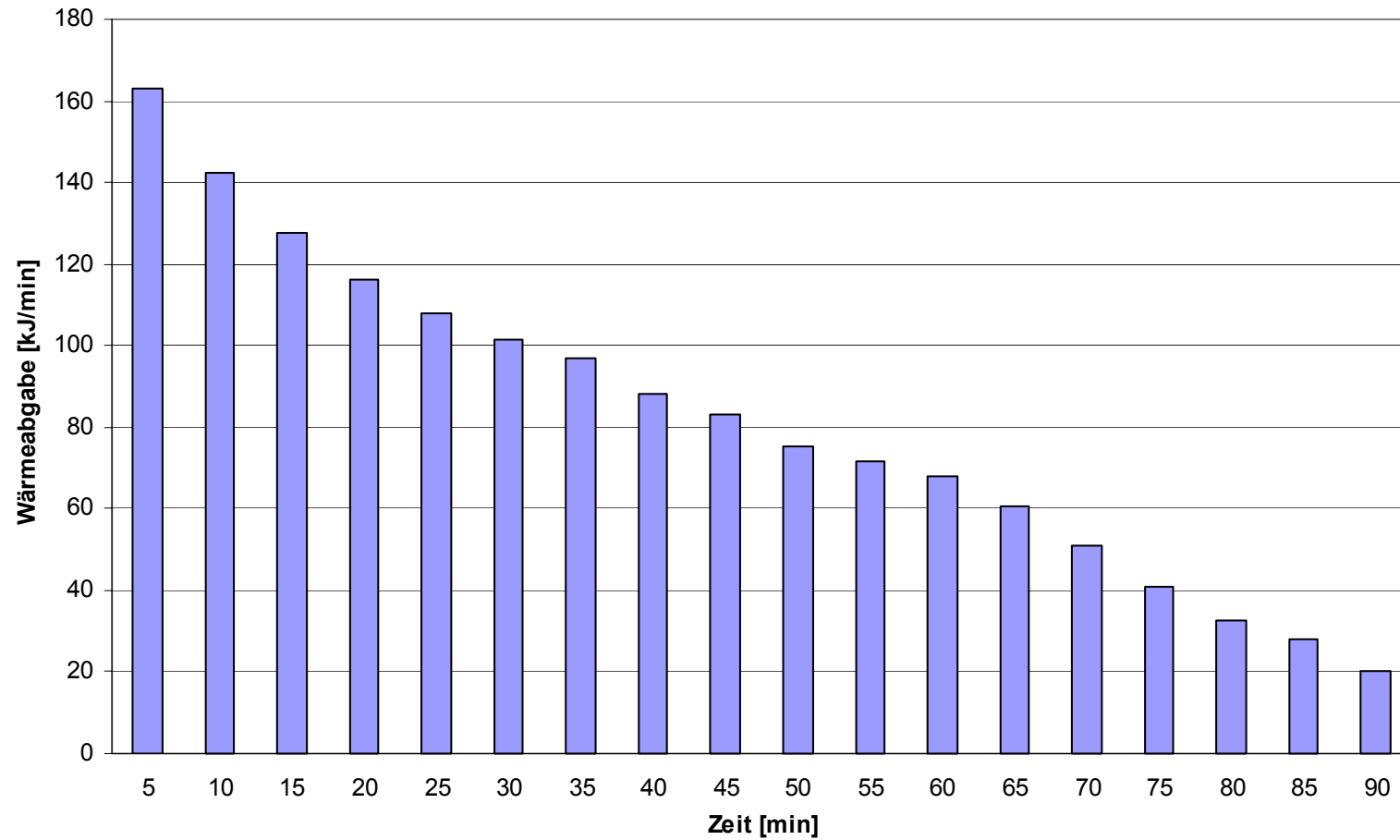


Abbildung 9: Wärmeabgabe der 50 kg-Zelle (Typ II) bei 35 l/h Belastung



3.3 Bau und Erprobung eines 100 kg-Wärmespeichers mit Plattenwärmeaustauscher (Typ III)

Die 100 kg Wärmespeicherbatterie bestand aus einer Wärmespeicherzelle und war aus folgenden Bauteilen aufgebaut:

1 Stck. prismatischer Schmelzebehälter aus Stahlblech mit den Abmessungen:

Länge:	650 mm
Breite:	150 mm
Höhe:	550 mm
Volumen:	53,6 l
Nutzvolumen:	50 l
Material:	Stahlblech
Gewicht, leer:	11,0 kg

1 Stck. Profil-Plattenwärmeaustauscher nach DIN mit den Abmessungen:

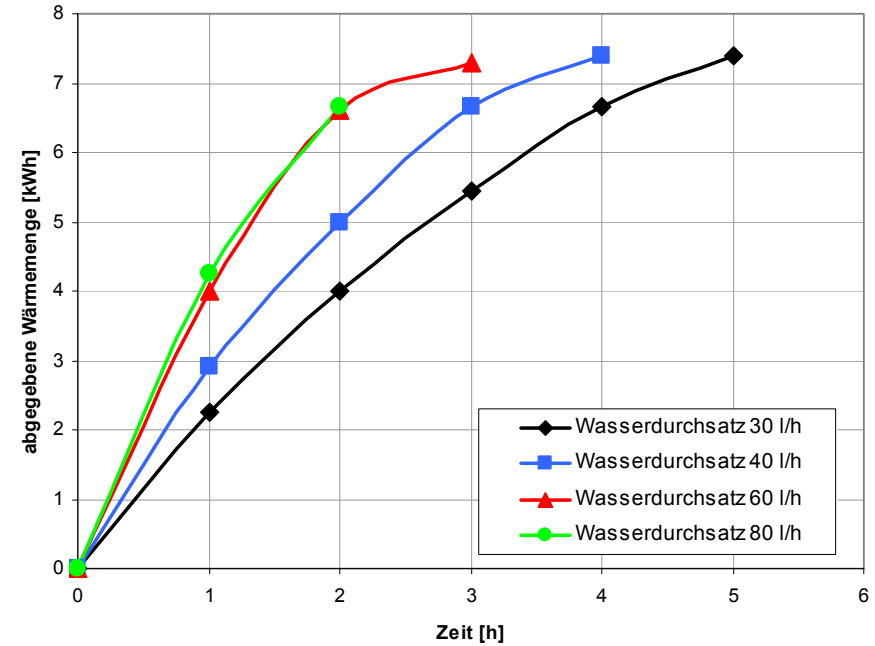
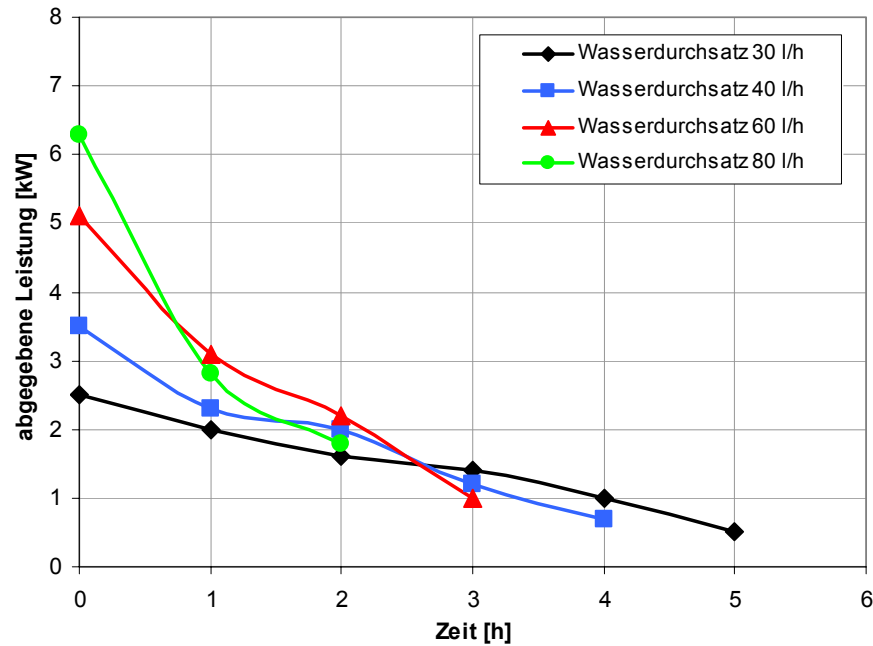
Länge:	600 mm
Breite:	40 mm
Höhe:	500 mm
Anzahl der Platten:	2
Anzahl der Lamellen:	2
Material:	Stahlblech mit Korrosionsschutzanstrich
Gewicht, leer:	16,5 kg
Wärmetauschfläche ohne Lamellen:	1,2 m ²
Wärmetauschfläche mit Lamellen:	3,8 m ²

- PCM-Füllung
 - Art des PCM: NaOH · H₂O, Mg - NO₃ - Cl · 6H₂O (50 : 50)
 - Volumen des PCM: ca. 40 l
- Wasser-Füllung: 6 l
- Isolationshülle aus Styroporplatten + Deckel: 3 kg
- Gesamt-Betriebsgewicht: 100,5 kg

Abbildung 10: 100 kg Zelle vom Typ III

PCM-65 (NaOH · H₂O)

Abhängigkeit von Leistung und Energieabgabe von der Belastung



3.4 Bau und Erprobung eines Speichers mit hoher Entnahmeleistung (Hybrid-Speicher, Typ IV)

Aufgrund der Kontakte zur Automobil-Zulieferindustrie wurde die Aufgabe der Entwicklung eines für den Fahrzeugeinsatz geeigneten Speichers mit einer hohen Entnahmeleistung bei extrem kurzer Dauer der Wärmeabgabe zusätzlich in das Arbeitsprogramm aufgenommen. Dieser Speicher kann allein oder in Kombination mit einem thermischen Brennergerät arbeiten. In letzterem Fall übernimmt der Speicher die Wärmeabgabe im Zeitraum 0 bis 25 Sekunden, in welchem das Brennergerät noch keine ausreichende Wärme abgibt.

Diese Anforderungen erfüllt ein hybrider Wärmespeicher für automotiv Anwendungen, der bei geringem Platzbedarf, geringer Masse und geringem Fertigungsaufwand möglichst viel Wärme speichert, diese bei der Entladung selbst bei tiefen Außentemperaturen mit hoher Leistung innerhalb kürzester Zeit in Form heißer Motorkühflüssigkeit abgibt und zusätzlich in der Lage ist, die unvermeidbaren Wärmeverluste an die Umgebung weitgehend auszugleichen, ohne dass der Speicherinhalt völlig auskühlt.

Abbildung 11: Aufbau und Funktionselemente des Hybridspeichers vom Typ IV

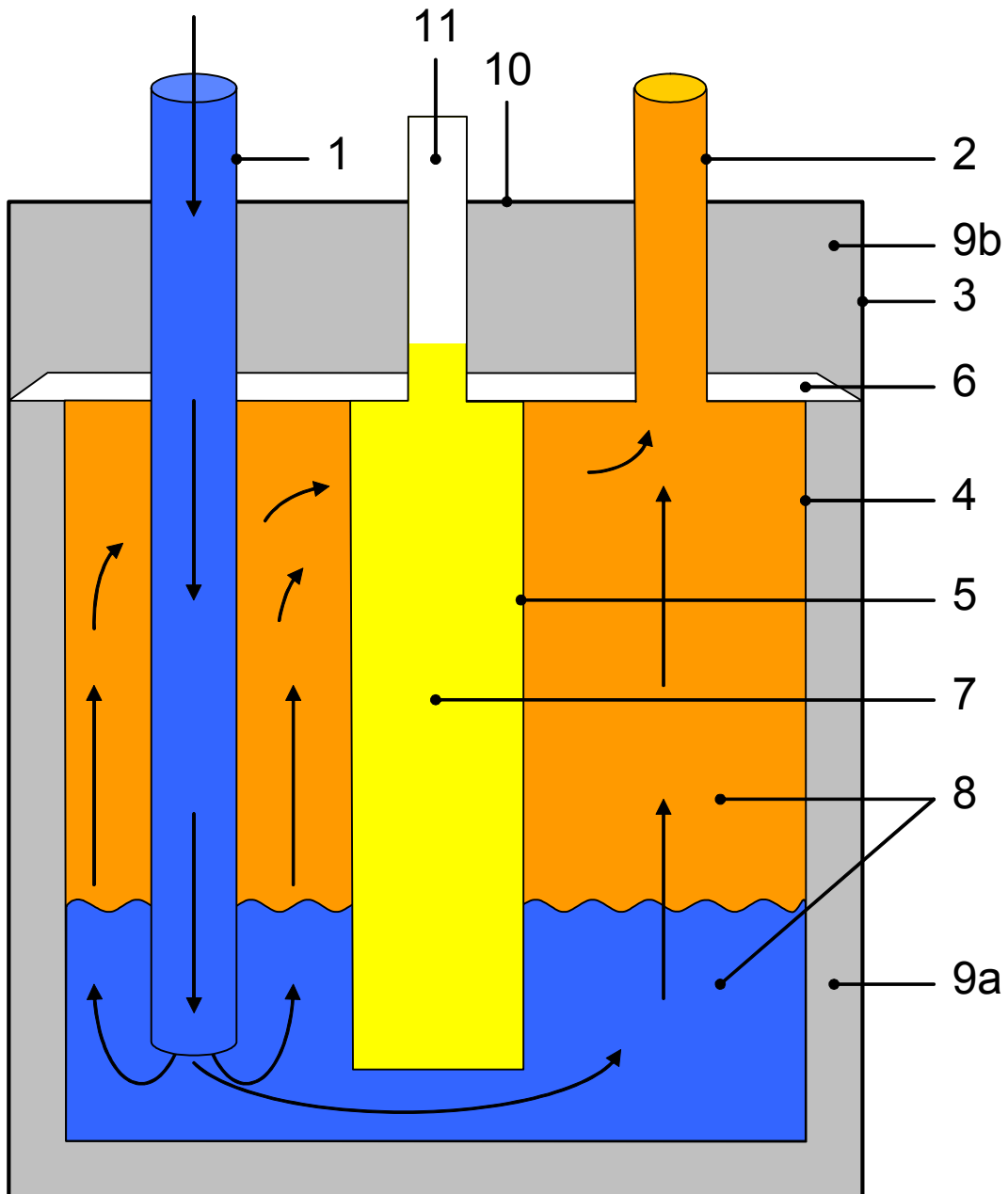


Abbildung 12: Aufbau des Prüfstandes – Laden des Speichers –

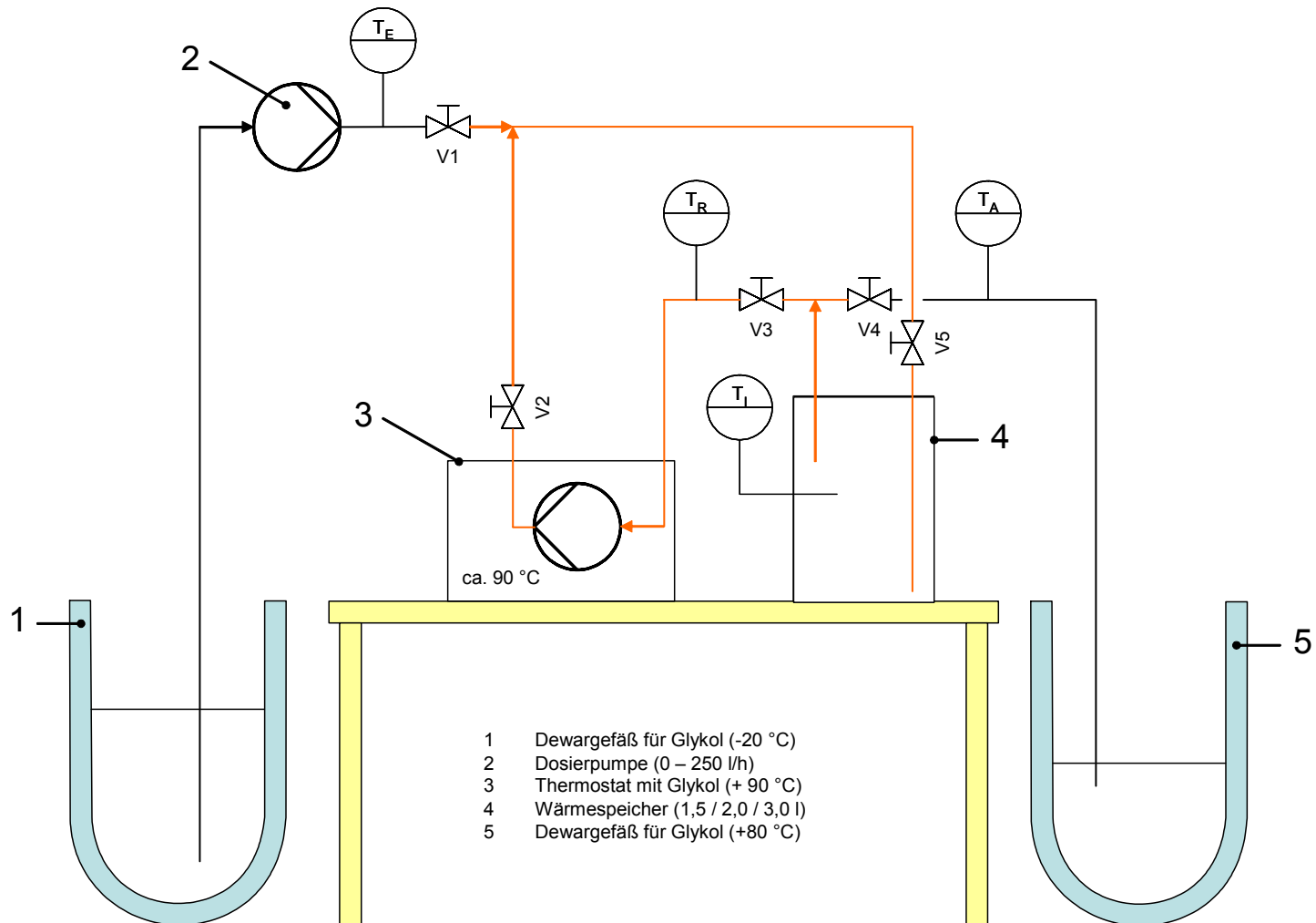


Abbildung 13: Aufbau des Prüfstandes – Entladen des Speichers –

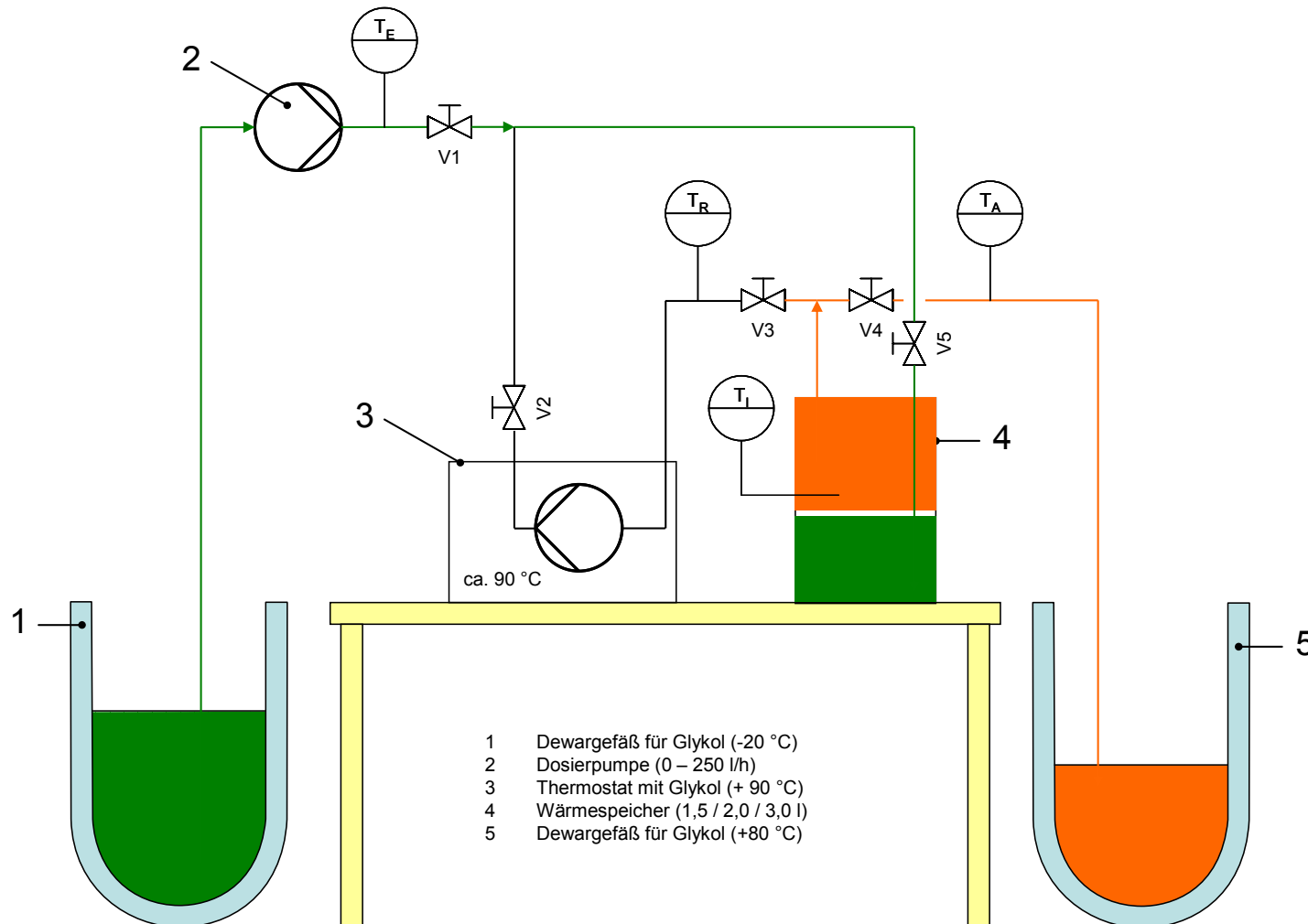


Tabelle 2: Kurzzeitwärmespeicher für Kraftfahrzeuge vom Typ IV – Erprobungsdaten und Vorgaben –

Parameter	Vorgabe	Ø Ergebnis 3 l –Speicher	Ø Ergebnis 1,5 l Speicher
Abmessungen incl. Isolation	150 x 150 x 150 mm	Ø 150 mm, H 250 mm	Ø 125 mm, H 200 mm
Volumen incl. Isolation	3,375 l	Nutzvolumen: 3,0 l Isolation: 1,2 l Gesamt: 4,2 l	Nutzvolumen: 1,5 l Isolation: 1,0 l Gesamt: 2,5 l
Wärmeabgabeleistung	> 5 kW zu Beginn	nach 5 Sekunden: 10 ± 2 kW nach 10 Sekunden: 10 ± 2 kW nach 30 Sekunden: 10 ± 2 kW nach 60 Sekunden: 10 ± 2 kW	nach 5 Sekunden: 4 ± 1 kW nach 10 Sekunden: 6 ± 2 kW nach 30 Sekunden: 6 ± 2 kW nach 60 Sekunden: 4 ± 1 kW
Dauer der Wärmeabgabe	möglichst innerhalb 100 Sekunden besser < 30 Sek.	< 100 Sekunden	< 60 Sekunden
Wärmeentnahme	> 400 kJ innerhalb 100 Sekunden	nach 10 Sekunden: 100 kJ nach 30 Sekunden: 300 kJ nach 60 Sekunden: 600 kJ nach 100 Sekunden: 850 kJ	nach 10 Sekunden: 60 kJ nach 30 Sekunden: 180 kJ nach 60 Sekunden: 340 kJ nach 100 Sekunden: 440 kJ
Gesamt-Energieinhalt	> 500 kJ	900 – 1.000 kJ	450 – 550 kJ
Wärmeabgabeleistung nach 1 Tag	> 5 kW zu Beginn	nach 5 Sekunden: 8 - 10 kW nach 10 Sekunden: 8 – 10 kW nach 30 Sekunden: 8 – 9 kW nach 60 Sekunden: 3 – 4 kW	nach 5 Sekunden: 4 - 5 kW nach 10 Sekunden: 4 – 5 kW nach 30 Sekunden: 3 -. 4 kW nach 60 Sekunden: ca. 2 kW
Wärmeentnahme nach 1 Tag	> 250 kJ	nach 30 Sekunden: 250 – 300 kJ nach 60 Sekunden: 400 – 450 kJ	nach 30 Sekunden: ca. 120 kJ nach 60 Sekunden: ca. 200 kJ
Gewicht	keine Vorgabe	Leergewicht m. Einbauten: 2.100 g Betriebsgewicht: 4.700 g	Leergewicht m. Einbauten: 1.400 g Betriebsgewicht: 2.500 g

Abbildung 14: Entladecharakteristik des 1,5 l-Hybridspeichers

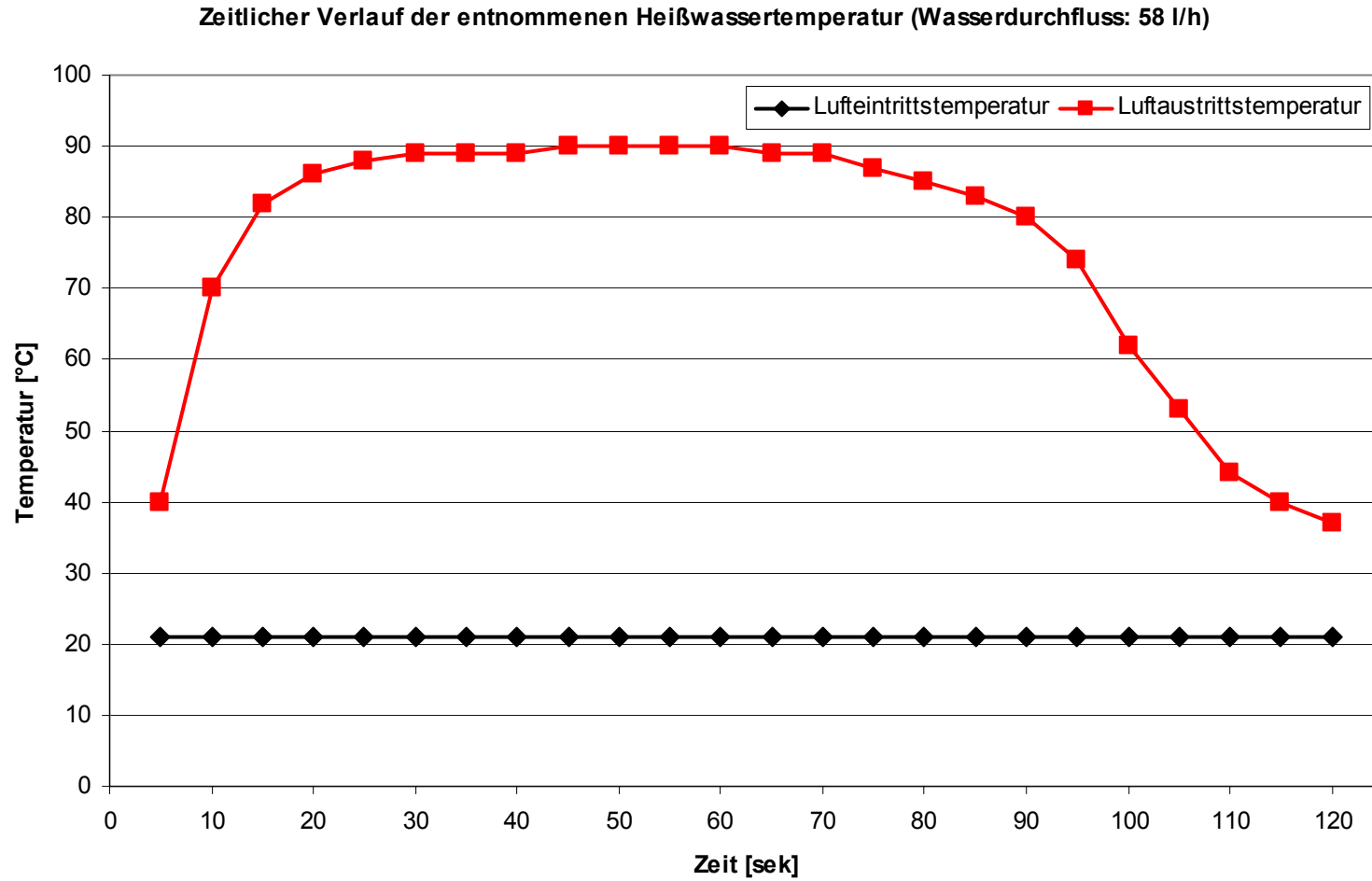
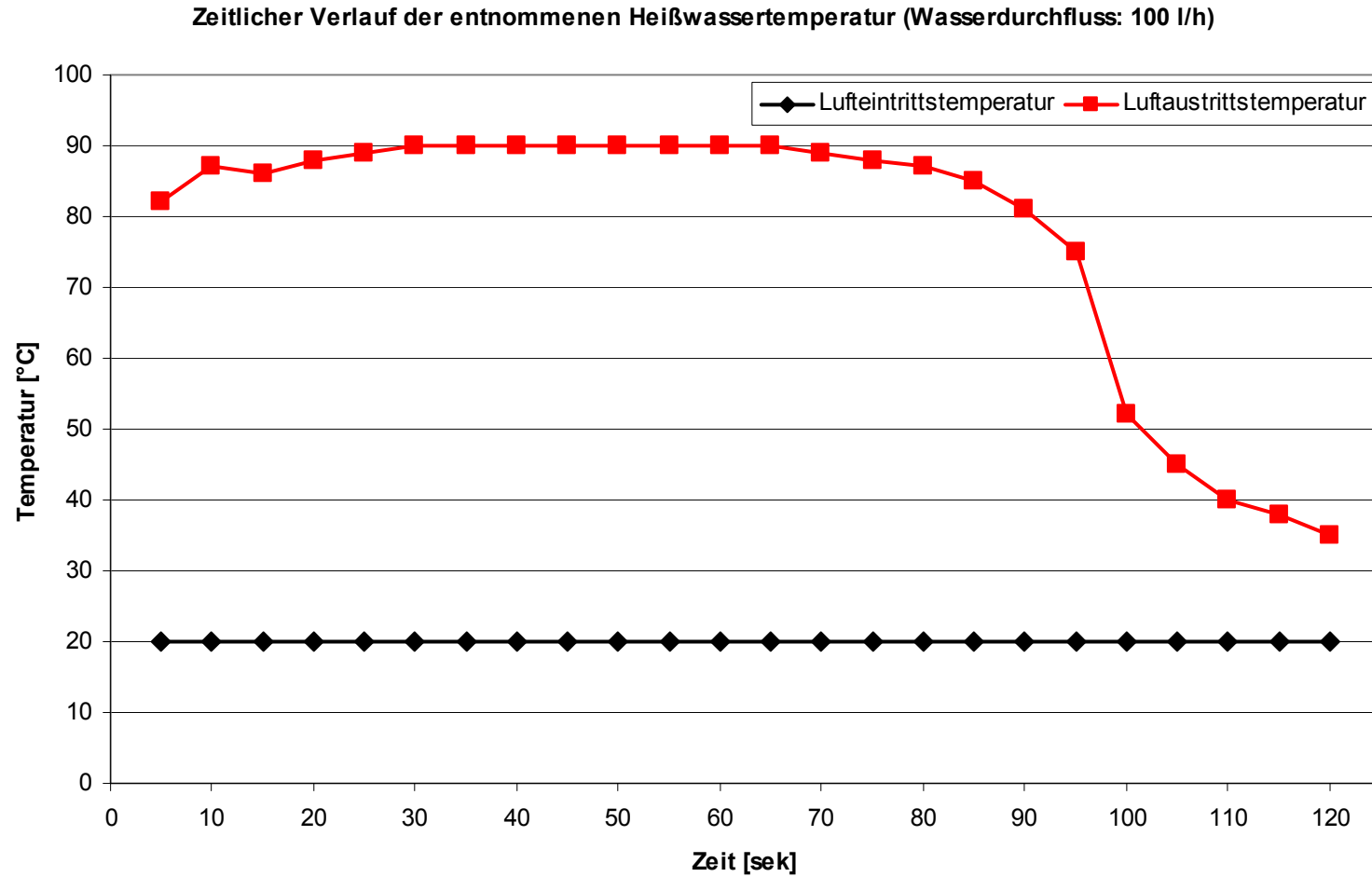


Abbildung 15: Entladecharakteristik des 3 I-Hybridspeichers



4 Untersuchungen zu Hochtemperatur-Wärmespeichern

Als Alternative zur Speicherung von Motorabwärme in Form heißer Motorkühlflüssigkeit bietet sich die Speicherung von Wärmeenergie auf höherem Temperaturniveau an, die in der Ladephase dem Abgasstrang entnommen wird. Beim Entladevorgang kann die als fühlbare und latent gespeicherte Wärme als Heißluft entnommen werden und damit entweder Motor oder Katalysator in der Startphase schneller erwärmt werden, als das ohne Wärmespeicher der Fall ist. Zunächst wurden Stoffsysteme untersucht, welche die Anforderungen erfüllen.

Geeignete Stoffe sind Lithiumnitrat sowie verschiedene Schmelzrezepturen mit Phasenumwandlungspunkten zwischen 120 und 240 °C. Allerdings zerstört LiNO_3 in der Regel beim Phasenwechsel das Gefäß.

Die Erprobung erfolgte mit einem Heißluftstrom von 500 °C, der in einer handelsüblichen elektronisch geregelten Heißluftpistole vom Typ Steinel HL 2010 E erzeugt wurde.

Das Abkühlen erfolgte mit einem Kaltluftstrom (ca. 20 °C), dessen Menge bei den meisten Versuchen auf 1.800 l/h (0,5 l/s) eingestellt wurde.

4.1 Bewertung untersuchter PCM für Hochtemperaturzelle

Die wichtigsten Bewertungskriterien sind im Folgenden dargestellt.

Tabelle 3: Haupteigenschaften von Hochtemperatur-PCM-Schmelzen

Lfd.-Nr.	Zusammensetzung		Fp [°C]	Eigenschaften / Bewertung				
			(gemessen)	Speicherbare Wärmemenge	Gefäßzerstörung	Aggressivität zu Werkstoffen	Temperaturstabilität	Preis
HT - 1	100 %	LiNO ₃	254	++	--	+	++	--
HT - 2		binär	228	-	+	+	++	+
HT - 3		binär	232	+	+	+	++	+
HT - 4		binär	223	-	+	+	++	++
HT - 5		mono	244	+	+	+	-	--
HT - 6		binär	173	-	+	+	++	-
HT - 7		ternär	ca. 120	0	+	++	++	0
HT - 8		ternär	143	0	+	++	++	+
++	sehr günstig			0	mittel	--	sehr ungünstig	
+	günstig			-	ungünstig			