

Stefan Steverding Sondermaschinen-  
und Vorrichtungsbau GmbH  
Gerhard-Hauptmann-Str. 41, 48703 Stadtlohn

**Entwicklung eines innovativen mobilen Schüttgut-  
Wärmespeichersystems an Biogas-BHKW (MWSP)**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 34219/01-24/0 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Stefan Steverding, Jan Wehling, Uwe Athmann

Stadtlohn im Juni 2023

Stefan Steverding Sondermaschinen-  
und Vorrichtungsbau GmbH  
Gerhard-Hauptmann-Str. 41, 48703 Stadtlohn

**Entwicklung eines innovativen mobilen Schüttgut-  
Wärmespeichersystems an Biogas-BHKW (MWSP)**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 34219/01-24/0 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Stefan Steverding, Jan Wehling, Uwe Athmann

Stadtlohn im Juni 2023

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Az **34219/01**Referat **24/0**

Fördersumme

**120.800 €**

**Antragstitel** **Entwicklung eines innovativen mobilen Schüttgut-Wärmespeichersystems an Biogas-BHKW (MWSP)**

**Stichworte** Mobiler Wärmespeicher, Schüttgut, Biogas

Laufzeit

**46 Monate**

Projektbeginn

**02.07.2018**

Projektende

**30.06.2023**

Projektphase(n)

**2: Technikum & Praxis**

Zwischenberichte

02.-06.2019, 07.-12.2019,  
01.-06.2020, 07.-12.2020,  
01.-06.2021, 07.-12.2021  
06.-12.2022

**Bewilligungsempfänger** **Stefan Steverding Sondermaschinen- und Vorrichtungsbau GmbH**  
**Gerhart-Hauptmann-Str. 41**  
**48703 Stadtlohn**

Tel **+49 2563 4-611**Fax **+49 2563 4-643**

Projektleitung  
**Stefan Steverding**

Bearbeiter  
**Jan Wehling**

**Kooperationspartner**  
**Unterauftragnehmer**

Hemsing Metallbau GmbH, Südlohn Oeding  
dezentec GmbH, Kassel  
Fachhochschule Münster, Fachbereich Maschinenbau, Steinfurt

9

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines mobilen Schüttgutwärmespeichers, mit dem Mitteltemperaturabwärme aus Biogas-BHKW mittels ISO-Containern über die Straße zu geeigneten Abnehmern transportiert werden kann. Die nutzbare thermische Leistung von Biogas-BHKW entspricht insgesamt etwa der elektrischen Leistung. Diese thermische Leistung kann zu etwa 45 % über das Abgas, bei Temperaturen von 450 bis 520 °C und zu etwa 55 % über das Kühlwasser, auf einem Temperaturniveau von etwa 80 °C, bereitgestellt werden.

Im Vorhaben soll ein Schüttgut, vorzugsweise (Quarz-) Kies, als Speichermedium eingesetzt werden. Eine enge Kornverteilung des angestrebten Rundkorns bewirkt ein gleichmäßiges Aufheizen und definierte Druckverluste bei der Durchströmung der Schüttung.

Zur Beladung des angestrebten mobilen Schüttgutspeichers wird das heiße Abgas eines Biogas-BHKWs in die Kiesschüttung geleitet. Die Durchströmung erfolgt durch den Überdruck im Abgastrakt ohne weitere Ventilatorunterstützung. Durch geeigneter Kiesqualitäten und -klassierungen kann der Differenzdruck in einem für Motor und Wärmeübergang und Gleichverteilung der Strömung optimalen Bereich von 3 bis 10 mbar gehalten werden.



### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

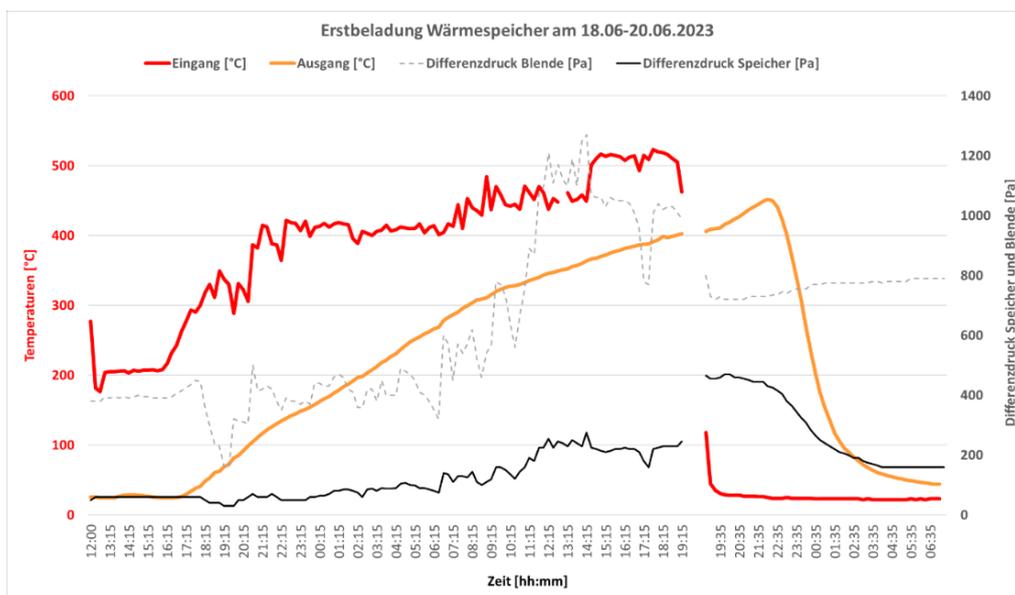
Arbeitsschwerpunkte sind die Auswahl geeigneter Kiesqualitäten und -klassierungen (Rundkorn verschiedener Kieswerke und Klassierverfahren) / Versuche im Technikum zu Druckverlusten für diese speziellen Kiese und Isoliermaterialien (zwischen Kies und Behälter bzw. zwischen Behälter und Container) / Entwicklung, Konstruktion, Fertigung sowie Montage Pilotspeicher im 20-Fuß-Container für Probebetrieb und praxisbasierte Alterungsversuche / Meilenstein „Proof of Concept“ im realen Maßstab / Optimierungen / Feldtests an Biogasanlage.

Die Bestimmung der erforderlichen Größe der Schüttgutkörner für angestrebte Druckverluste soll auf Basis der Ergun-Gleichung erfolgen, in die Gastemperatur, -druck, -dichte, -viskosität, Partikeldurchmesser, Lückengrad, die Sutherland-Konstante sowie weitere spezifische Parameter eingehen.

### ***Ergebnisse und Diskussion***

Die Verwendung von ISO-Containern (Standard-Überseecontainer) war ursprünglich vorgesehen. Zur Erhöhung der durch das zulässige Gesamtgewicht beim Straßentransport beschränkten Speicherkapazität wurde dies in einen Containerrahmen mit Planenaufbau geändert. Hierdurch wird Gewicht im Bereich der Seitenwände und des Daches eingespart, so dass mehr Kies und damit mehr Wärme transportiert werden kann. Im Rahmen der Technikumsversuche wurde kein Kondensatanfall beobachtet. Die an den Behälterböden angebrachten Entnahmestutzen für das Kondensat blieben immer trocken. Der Grund hierfür ist vermutlich, dass die beim Kontakt mit kaltem Kies lokal

auskondensierende Feuchte direkt wieder durch das nachströmende warme Gas verdampft wird. Da bei den Technikumsversuchen keine Kondensation von Wasser beobachtet werden konnte, wurde vom Projektteam angenommen, dass dieser Effekt auch beim mit Biogas-BHKW-Abgas beaufschlagten Prototypen nicht der Fall sein wird. Das Gleiche gilt für den Anfall von schwefliger Säure bzw. Schwefelsäure. Aus diesem Grunde wurde auch auf die Verwendung von Edelstahl als Material für den Speicherbehälter verzichtet. Die ursprüngliche Kiesmenge beruhte auf der Annahme vergleichsweise dünner Behälterwände. Da die diese Wände auf Basis der durchgeführten FEM-Berechnung ebenso wie die Verrippung deutlich stärker und damit schwerer ausgeführt wurden (knapp 12 Tonnen), musste zur Einhaltung des zulässigen Gesamtgewichts für den Straßentransport die Kiesmasse auf etwa 8 Tonnen bei 40 Tonnen Gesamtgewicht, etwa 12 Tonnen bei 44 Tonnen Gesamtgewicht verringert werden. Die durchgeführten Messungen bei der Entladung des Speichers ergeben eine Wärmeauskopplung des Speichers vom gut 2 MWh. Es wurde ursprünglich von einer Speicherkapazität von rund 2,5 MWh ausgegangen. Dieses Ergebnis ist beachtlich, da die Mehrmenge an Stahl über eine etwas geringere Wärmespeicherkapazität verfügt als die Mindermengen an Kies und der Speicher nicht vollständig beladen war.



### Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentationen im Rahmen von Kundenfachgesprächen, Messen etc. erfolgen im Nachgang zur Projektlaufzeit. Der Grund hierfür liegt darin, dass der mobile Wärmespeicher mit deutlicher Verzögerung fertiggestellt wurde und beispielsweise der Praxistest mit der Beladung an einer Biogasanlage und Entladung bei einem Industriebetrieb erst nach Ablauf der Projektlaufzeit durchgeführt wurde.

Die Firmen Steverding, Hemsing und dezentec betreiben die Entwicklung mit eigenen Mitteln weiter.

Daher haben die vorgenannten Firmen ein hohes Eigeninteresse an der Veröffentlichung der Entwicklungsergebnisse.

## **Fazit**

Die Eignung von Schüttgut, hier speziell (Quarz-)Kies als Wärmespeichermaterial für die Be- und Entladung im direkten Gas-Feststoffkontakt konnte sowohl im Technikum als auch bei dem Prototyp erfolgreich nachgewiesen werden. Besonders die Einsatzmöglichkeit von verschiedenen Korngrößen des Kieses für die jeweilige Be- und Entladesituation macht das System für viele Anlagen nutzbar. Hierdurch wird eine hohe Einsatzflexibilität gewährleistet.

Die Umweltbilanz der mobilen Wärmespeicherung ist, wie erwartet sehr gut. Die durch die mobile Speicherung genutzte Abwärmemenge ist um einen Faktor von etwa 20-30 größer als die für den LKW-Transport benötigte Energie. Selbst bei konservativen Annahmen, wie einer pro Fahrt transportierten Wärmemenge von nur 2.000 kWh und der betrachteten Maximaldistanz des Transports von 10 km, benötigt der LKW für Hin- und Rückweg nur vier Prozent der transportierten Energiemenge.

Die Konstruktion des Prototyps des mobilen Schüttgutwärmespeichers ist, bedingt durch die hohen Kräfte, die das Schüttgut durch die Wärmedehnung auf die Wandungen ausübt, sehr komplex, arbeits- und materialintensiv. Die FEM-Berechnung hat gezeigt, dass in dieser Ausführung ein großer Materialeinsatz gefordert wird, um eine ausreichend hohe Stabilität in das System zu bringen. Die aufwendige Konstruktion der Verrippung führt zu aufwendigen Schweißarbeiten, die sehr viele Arbeitsstunden erfordern. Die Kosten zur Erstellung des Prototyps sind daher sehr hoch und nicht marktfähig. Während des Projektes kam es durch den Fachkräftemangel, die Corona Krise, Turbulenzen am Stahlmarkt bezüglich Preisen und Lieferzeiten zur Zeit des Baubeginns des Wärmespeichers und durch erhebliche Lieferschwierigkeiten selbst einfacher Komponenten wie LKW-Planen zu einem Verzug in der Projektlaufzeit.

Die Firmen Steverding, Hemsing und dezentec werden auch nach Ablauf des DBU-Projektes weiter an der Optimierung des mobilen Schüttgutwärmespeichers arbeiten. Hierbei wird insbesondere eine Kostenreduktion durch Vereinfachung der Konstruktion im Vordergrund stehen.

Die allgemeine Situation am Wärmemarkt hat sich seit Projektbeginn 2018 deutlich verändert. Die deutlich gestiegene Nachfrage nach nachhaltigen Energiequellen führt umso mehr dazu, das Wärmespeichersystem weiter zu verbessern und somit eine zusätzliche Möglichkeit der Bereitstellung von Wärme zu bieten. Die mobile Wärmespeicherung wird in Zukunft einen Beitrag zum Ausbau der Wärmenetze leisten können.

Kurz zusammengefasst:

- Die untersuchte Technik der Wärmespeicherung in Kies-Schüttgut funktioniert gut.
- Der Prototyp besitzt noch keine Marktreife.
- Das Patent wurde im Februar 2023 erteilt.

Die Entwicklung wird von den beteiligten Firmen nach dem Projektende eigenständig fortgeführt

# Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	8
Glossar und Abkürzungsverzeichnis .....	9
Zusammenfassung .....	10
Durchgeführte Untersuchungen .....	10
Erzielte Ergebnisse .....	10
Empfehlungen für das weitere Vorgehen .....	10
Durchführung, Kooperationspartner, Förderung .....	10
Einleitung.....	11
Hauptteil .....	14
Vorgehensweise der Entwicklung des mobilen Schüttgutwärmespeichers .....	14
Technikumsanlage – Wärmespeicher .....	15
Technikumsanlage – Kiespresse .....	20
Herstellung Prototyp .....	23
Praxistest Prototyp.....	35
Erstbeladung des Wärmespeichers.....	36
Diskussion der Ergebnisse insbesondere im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung .....	41
Literaturverzeichnis .....	46

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Technikumsanlage als 3D- CAD- Modell, 1- Eintritt Heißgas, 2-Austritt abgekühltes Gas.....	15
Abbildung 2: Schnittansicht Behälter Technikumsanlage .....	16
Abbildung 3: verschiedene Schaltungsvarianten der Technikumsanlage .....	17
Abbildung 4: reale Technikumsanlage.....	18
Abbildung 5: Auswertung eines Technikumsversuch .....	19
Abbildung 6:Aufbau Kiespresse.....	20
Abbildung 7:Verformung des Auflagerost .....	23
Abbildung 8:Wärmedehnung Verformung .....	24
Abbildung 9:Verformung durch Pressung an der Seitenwand .....	25
Abbildung 10:Wärmespeicher im Schnitt.....	25
Abbildung 11:Traggestell Wärmespeicher .....	26
Abbildung 12:Wärmespeicher auf Plattform .....	28
Abbildung 13:Unterkonstruktion und Auflagerost.....	29
Abbildung 14:Wärmespeicher außen .....	30
Abbildung 15:Wärmespeicher innen.....	31
Abbildung 16:Eingehängter Wärmespeicher .....	32
Abbildung 17:Fertiggestellter Wärmespeicher die Lage, der von der Plane verdeckten Ein- und Austrittsstutzen sind rot markiert, die in die Plane integrierten Öffnungsmöglichkeiten sind erkennbar .....	32
Abbildung 18:BHKW innen .....	33
Abbildung 19:BHKW am Testbetrieb .....	34
Abbildung 20:Versuchsaufbau realer Wärmespeicher, hier mit abgedeckter Plane und Eintritt des warmen Gases (roter Pfeil) und Austritt des bei der Beladung des Speichers abgekühlten Gases (blauer Pfeil), bei Entladung Eintritt Kaltluft (roter Pfeil) und Austritt Warmluft (blauer Pfeil) .....	35
Abbildung 21:Erstbeladung Wärmespeicher, Temperatur- und Druckwerte.....	38
Abbildung 22:Energiebilanz der Erstbeladung des Wärmespeichers, linker Teil: Beladung mit negativ dargestellten Leistungswerten für die Beladung (Brennwert und Heizwert), rechter Teil in orange: Entladung mit positiv dargestellter Entladeleistung. ....	39

## Glossar und Abkürzungsverzeichnis

FEM	Finite- Elemente- Methode
CAD	Computer Aided Design
kW	Kilowatt
kwh	Kilowatt Stunde
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
BHKW	Blockheizkraftwerk
KWK	Kraft- Wärme- Kopplung
ca.	Circa
mm	Millimeter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
kg	Kilogramm
to	Tonnen
°C	Grad Celsius

## **Zusammenfassung**

### **Durchgeführte Untersuchungen**

Im Rahmen des zweiphasigen Entwicklungsprojektes wurde die Eignung von Kies als Speichermedium für die mobile Wärmespeicherung sowohl in Technikumsversuchen als die Beladung des rund 20 Tonnen schweren Prototyps auf dem Werksgelände der Firma Steverding erprobt. Zudem wurden Festigkeitsberechnungen zum Wärmespeicher durchgeführt. Für die Festigkeitsberechnungen musste ein weiterer, nicht ursprünglich vorgesehener Versuchsaufbau, der sogenannte Kiespressenversuch durchgeführt werden. In diesem Versuch wurden die Auswirkungen verschiedener Kies- Korngrößen auf die Behälterwand des Wärmespeichers untersucht. Die Ergebnisse aus diesen Versuchen sind in die FEM- Berechnung eingeflossen. Die Konstruktion wurde auf den Ergebnissen der FEM- Berechnung aufgebaut.

### **Erzielte Ergebnisse**

In der Projektlaufzeit wurde ein ca.20 Tonnen schwerer Prototyp zur mobilen Wärmespeicherung entwickelt und gefertigt. Im Praxistest wurden die Be- und Entladung des Speichers positiv bestätigt. Bei diesen Prototypen handelt es sich um den ersten mobil einsetzbaren mit dem preiswerten Massengut Kies bestückten Schüttgutwärmespeicher, der auch eine Auskopplung von Temperaturen oberhalb von 100 °C ermöglicht. Dadurch ist eine Abwärmenutzung zur Dampferzeugung möglich, und kann somit zukünftig auch bei vielen industriellen Anwendungen eingesetzt werden. Zudem ist ein kombinierter Betrieb aus zuerst Dampferzeugung und anschließender Bereitstellung von Warmwasser möglich. Der in dem Projekt entwickelte mobile Schüttgutwärmespeicher erfüllt die technischen Erwartungen. Der Wirkungsgrad der Beladung kann durch eine zukünftige Reihenschaltung von Schüttungen weiter verbessert werden. Der Wirkungsgrad der Entladung liegt bauartbedingt bei nahe 100 Prozent, wenn die aus dem Speicher entladene Warmluft nach ihrer Abkühlung über einem kundenseitigen Wärmetauscher (zur Erzeugung von Dampf bzw. Warmwasser) wieder dem Wärmespeicher zugeführt wird. Ein marktfähiges Modell für die Serienfertigung liegt jedoch noch nicht vor, da die Konstruktion zur Beherrschung der Wärmespannungen einen zu hohen Einsatz an Material und Arbeitszeit erfordert und damit noch zu kostenintensiv ist

### **Empfehlungen für das weitere Vorgehen**

Es wird angestrebt den Speicherwirkungsgrad zu erhöhen, insbesondere bei der Beladung. Die Konstruktion soll zur Reduktion der Kosten für Material und Arbeit vereinfacht werden, da mit dem Erstellungspreis des entwickelten Prototyps aktuell noch keine konkurrenzfähigen Energiepreise zu erzielen sind.

### **Durchführung, Kooperationspartner, Förderung**

Die Entwicklung des mobilen Schüttgutwärmespeichers erfolgte durch die Stefan Steverding Sondermaschinen- und Vorrichtungsbau GmbH in Kooperation mit den Firmen Hemsing Metallbau GmbH und dezentec GmbH sowie mit der Fachhochschule Münster durchgeführt und durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Az.: 34219/01) gefördert

### **Bezugsmöglichkeit des Abschlussberichtes**

Dieser Abschlussbericht kann über den Projektbearbeiter der Firma Stefan Steverding Sondermaschinen- und Vorrichtungsbau GmbH, Herrn Jan Wehling, von interessierten Personen und Institutionen bezogen werden.

## Einleitung

Die Abwärmenutzung stellt neben der Sonnen- (PV, Thermie), Wind-, Wasser- Gezeitenenergie sowie der Nutzung von Biomasse und Geothermie eine der sieben Säulen der Energiewende dar. Die Abwärme spielt zurzeit eine noch untergeordnete Rolle in der Energiewende. Ein Ausbau der Wärmenetze ist zwingend erforderlich, um die Klimaschutzziele erreichen zu können. Die Verwendung ungenutzter Abwärme führt zu einer deutlichen Ersparnis an fossilen Energieträgern. In dem Projekt soll speziell die Abwärmenutzung von Biogas BHKW betrachtet werden. Da hier noch ein großer Anteil an Abwärme ungenutzt in die Umwelt gelangt, ist dieses Projekt ein Schritt in die Richtung diese Abwärme besser zu Nutzen und in die Wärmenetze bei geeigneten Wärmesenken einzusetzen.

Die Firma Steverding GmbH ist seit langer Zeit Zulieferer von Produkten für den Biogasanlagenbau. Aus diesem Grund ist die Entwicklung eines mobilen Schüttgutwärmespeichers interessant, um somit das Produktportfolio für diesen Bereich erweitern zu können.

Die Firma dezentec GmbH hat Vorversuche im Bereich der Schüttgutwärmespeicher mit Quarzkies durchgeführt und den hier bearbeiteten Wärmespeicher zum Patent angemeldet. Die Ergebnisse aus diesen Vorarbeiten wurden im Rahmen der Technikumversuche sowie Großmaßstab vollumfänglich bestätigt, es wurden keine abweichenden Erkenntnisse erzielt. Dieses Patent wurde mittlerweile erteilt und Steverding und Hemsing wurden als zusätzliche Teilhaber mitaufgenommen [Ath11].

Die Firma Hemsing Metallbau GmbH bietet BHKW an und führt Planungen, die Produktion, die Anpassung an individuelle Situationen, Montage und Wartung an diesen Anlagen an.

Die bei Biogasanlagen nutzbare Wärmeenergie ist in der Motorabwärme, d.h. im Kühlwasser und im heißen Abgas der Motoren der BHKW enthalten. Allein in Deutschland gibt es zurzeit knapp 9900 Biogasanlagen [FVB23], wovon ein Großteil zur Erzeugung von Strom mittels BHKW verwendet werden. Von der üblichen Verstromung von Biogas in Blockheizkraftwerken können höchstens 40% der eingesetzten Energie in Strom umgewandelt werden. Ein Großteil der Energie fällt als Abwärme an. Nur etwa 36% der Anlagen nutzen mehr als 50% der Wärme, nur ca. 1/3 nutzt maximal 10% [Rau 16]. Überwiegend wird die Wärme zur Fermenterheizung, Beheizung von landwirtschaftlichen Gebäuden oder öffentlicher Gebäude genutzt. Oftmals lassen sich keine oder nur schwierig Wärmenetze über Rohrleitungen rentabel installieren, da die Wärmekunden die Wärme in diesen Größenordnungen Nutzen können zu weit entfernt sind oder es nicht möglich ist Rohrleitungen zum Wärmekunden zu verlegen. Dieser Grund führt dazu, die Wärme mobil zu machen und mittels mobiler Wärmespeicher die Abwärme zu den Wärmekunden zu liefern.

Die thermische Leistung der BHKW kann zu ca.45% über das Abgas bei Temperaturen von 450°C – 520°C, und zu etwa 55% über das Kühlwasser auf ein Temperaturniveau von etwa 80°C bereitgestellt werden. Eine Nutzung der Abwärme mittels mobiler Wärmespeicherung schont zum einen die Umwelt, und zum anderen kann der

Biogasanlagenbertreiber durch eine bessere Nutzung der Abwärme einen zusätzlichen Erlös über den sog. KWK- Bonus generieren.

Neben den in diesem Projekt bearbeiteten mobilen Schüttgutwärmespeichern gibt es weitere Speichersysteme. Latente Wärmespeicher nutzen im Vergleich zu Wasserpufferspeichern den Phasenübergang bei dem eingesetzten Speichermedium. In den latenten Wärmespeichern wird Natriumacetat-Trihydrat (NaOAc) als Speichermedium verwendet. Dieses hat eine Schmelztemperatur von 58,5°C. Bei der Temperatur findet der Phasenwechsel statt, was auch bedeutet, dass hier die größte Wärmemengenabgabe stattfindet. Das bei der Entladung des Speichers erzielbare Temperaturniveau liegt bei etwa 40 bis 50°C. Da für die Bereitstellung für Brauchwasser, z.B. zum Duschen, zur Vermeidung der Legionellenbildung mindestens eine Wassertemperatur von 60°C gefordert ist [DVG 2015], ist diese Form der mobilen Wärmespeicherung in der Anwendung begrenzt auf die Beheizung von Schwimmbädern, Raumheizungen mittels Niedertemperaturheizungen.

Im Vorfeld zum Projekt waren keine kommerziell nutzbaren Anwendungen für mobile Schüttgutwärmespeicher bekannt. Während der Projektlaufzeit wurden verschiedene Lösungsvorschläge zur mobilen Wärmespeicherung bekannt und in den jeweiligen Zwischenberichten benannt und bewertet. Hierzu zählen u.a. der Transport von erwärmtem Wasser durch die Firma aha aus Ennigerloh und ein Prototyp eines mobilen Wärmespeichers der Firma Kraftblock aus dem Saarland, bei der Wärme bis 1.300 °C auf der Straße transportiert werden soll. Über weitere Prototypen der Firma Kraftblock oder eine Serienfertigung liegen keine Informationen vor. Gemäß dem aktuellen Auftritt der Firma Kraftblock, beispielsweise auf der Hannover Messe 2023, scheint sich der Fokus der Firma auf stationäre Anwendung und in Richtung Power-to-X-Anwendungen verschoben zu haben.

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines neuartigen mobilen Schüttgutwärmespeichers, mit dem Wärme auf einem mittleren Temperaturniveau (450-520°C) [LfU07], wie sie das Abgas von Blockheizkraftwerken aufweist, über moderate Entfernung bis ca. 10km wirtschaftlich zu geeigneten Abnehmern transportiert werden kann. Ein Vorteil des in dem Projekt entwickelten mobilen Wärmespeichers ist es, dass Temperaturen oberhalb von 100°C ausgekoppelt werden können. Dies kann zur Dampferzeugung für die Industrie genutzt werden. Nach der Dampferzeugung ist noch die Bereitstellung von Warmwasser möglich. Somit ist auch eine kombinierte Wärmebereitstellung als Dampferzeugung und der Bereitstellung von Warmwasser möglich. Dadurch gibt es viele Einsatzmöglichkeiten, beispielsweise an Brauereien oder andere lebensmittelverarbeitende Betriebe.

Durch die zeitliche und räumliche Entkopplung von Erzeugung und Nutzung der Wärme wird eine hohe Flexibilität, ohne die für Fernwärmenetze typischen Wärmeverluste erreicht. Durch die mobile Wärmespeicherung kann der Wärmeabnehmer über die Zeit variieren und man ist nicht an einen Wärmeabnehmer über Rohrleitungen gebunden.

Das Prinzip des Feststoffwärmespeichers (Regenerator) ist von Winderhitzern für Hochöfen bekannt und langjährig erprobt. Statt der im Hochofen verwendeten gemauerten Wärmespeicher (Schamotte) wurde in dem Projekt als Speichermedium ein

Schüttgut, vorzugsweise Quarzkies, eingesetzt werden, welches beim Transport nicht beschädigt werden kann. Durch die große Oberfläche der Schüttung werden ein sehr guter Wärmeübergang und somit eine Aufheizrate gewährleistet. Eine enge Kornverteilung des Schüttgutes bewirkt ein gleichmäßiges Aufheizen.

Während des Projektes wurden insbesondere die Themen thermische Spannungen, mechanische und chemische Stabilität von Speichermaterial und Behälter betrachtet. Zudem wurde die Konstruktion des Transportbehälters, Sicherheitstechnik und Kondensatanfall geprüft.

Für die Bearbeitung des Projektes wurden verschiedenste Arbeitspunkte bearbeitet und die Ergebnisse dokumentiert.

Ein Lastenheft wurde mit verschiedensten technischen Anforderungen erstellt und bearbeitet. Ein wichtiger Bearbeitungspunkt war die Beurteilung von verschiedensten Kiesqualitäten. Zum einen musste hier die Korngröße zur Bestimmung des Druckverlustes betrachtet werden, zum anderen spielte die Korngröße zur Festigkeitsberechnung eine große Rolle, siehe hierzu auch das Kapitel mit dem sogenannten Kiespressen-Versuch. Vorabversuche in einer kleineren Technikumsanlage haben die Funktion der Wärmespeicherung mit Quarzkies bestätigt.

Durch die Unterstützung der Fachhochschule Münster Fachbereich Maschinenbau konnte der reale mobile Wärmespeicher mittels FEM-Berechnungen berechnet, und somit zur Fertigung freigegeben werden.

Auch der abschließende Praxistest bestätigte die Funktion des Wärmespeichers. Langandauernde Tests werden im Anschluss des Projektes durchgeführt.

## **Hauptteil**

### **Darstellung einzelner Arbeitsschritte, angewandter Methoden und tatsächlich erzielter Ergebnisse**

#### **Vorgehensweise der Entwicklung des mobilen Schüttgutwärmespeichers**

Im Vorfeld zum Projekt wurden in einer kleinen Technikumsanlage Vorversuche mit Quarzkies als Schüttgut im Wärmespeicher erprobt. Die Versuche bestätigten die Funktion des Schüttgutwärmespeichers und die Eignung von Quarzkies als Speichermedium. Zu Beginn wurde eine neue Technikumsanlage mit größeren Speichern gebaut, um weitere Kenntnisse zu sammeln.

In der Projektzeit wurde die Festigkeitsberechnung viel diskutiert. Bei so hohen Temperaturen musste die Wärmedehnung besonders betrachtet werden. Eine händische Berechnung der Konstruktion wurde abgelehnt, da diese zu viele Unsicherheiten aufgrund der Vielzahl von kritischen Punkten in der Konstruktion mit sich bringen würde. Um eine verlässliche Festigkeitsberechnung zu erhalten, wurde die Expertise der Fachhochschule Münster Fachbereich Maschinenbau herangezogen. Durch die FEM-Analyse konnten die kritischen Punkte herausgearbeitet werden, und durch konstruktive Veränderungen verbessert werden.

Die Fertigung des realen Wärmespeichers war sehr zeitaufwendig und kostenintensiv. Die Baugruppen wurden vorab einzeln gefertigt und später zusammengefügt. Verschiedene Isoliermaterialien wurden geprüft. Eine gute Wärmedämmung, einfache Verarbeitung und relativ kostengünstig waren Hauptargumente für die Steinwolle. Als Witterungsschutz wurde ein Planen Gestell mit einer speziell gefertigten LKW-Plane verwendet. Da der in Steinwolle isolierte Wärmespeicher die Werkshalle ohne die LKW-Plane nur stundenweise und bei sicheren Wetterbedingungen verlassen durfte, konnte die geplante Beladung an der Biogasanlage nicht mehr innerhalb des Projektzeitraums stattfinden. Das eine Standardkomponente, wie eine LKW-Plane zuzüglich zur Lieferzeit 9-10 Wochen Lieferverzögerung haben würde, wurde nicht erwartet. Im Anschluss an die Projektlaufzeit werden die Firmen Steverding, Hemsing und dezentec das Projekt aus eigenen Mitteln fortführen, einen vereinfachten Prototyp des Wärmespeichers erstellen und die Beladung an landwirtschaftlichen Biogasanlagen durchführen.

# Technikumsanlage – Wärmespeicher

## 1. Nutzen

Zu Anfang des Projektes wurde eine im Maßstab kleinere Technikums Anlage gebaut, um die Funktion des Wärmespeichers zu überprüfen. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse konnten später genutzt werden, um den realen mobilen Wärmespeicher an die verschiedenen Größen der Biogasanlagen anzupassen. Zudem sollten Kenntnisse gesammelt werden, um die Entladestation am Wärmeabnehmer auslegen zu können. Durch die Technikumsanlage sollten die theoretischen Annahmen, die zuvor aufgestellt wurden, bestätigt werden.

## 2. Konstruktion/ Aufbau

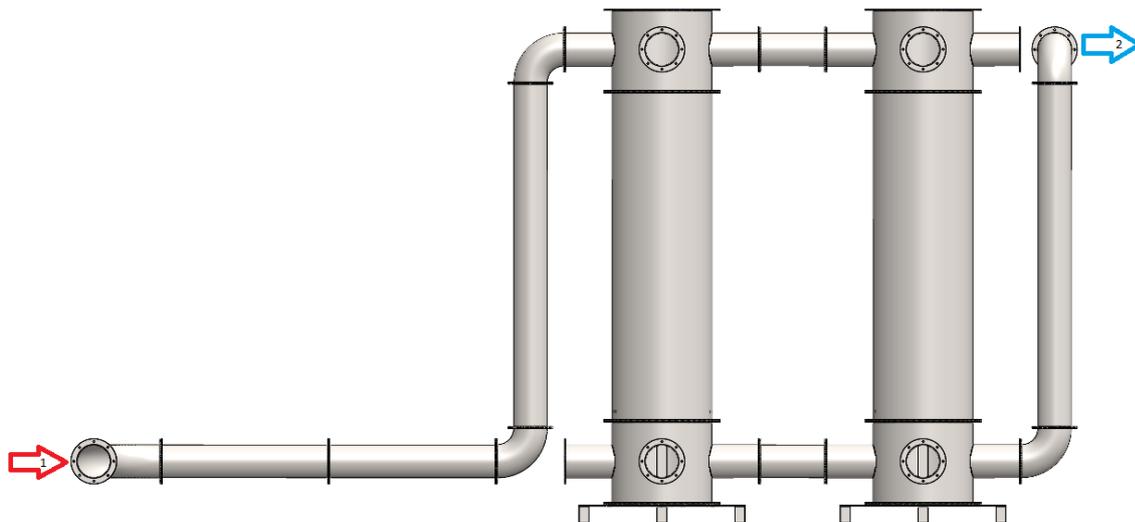


Abbildung 1: Technikumsanlage als 3D- CAD- Modell, 1- Eintritt Heißgas, 2-Austritt abgekühltes Gas

Die Technikumsanlage besteht aus zwei identischen Speichern, die in verschiedenen Konfigurationen miteinander verschaltet werden können. Um das Abgas eines Blockheizkraftwerks simulieren zu können, wurde ein Propanbrenner und ein Ventilator eingesetzt. Hiermit konnten die hohen Abgastemperaturen zwischen 400°C bis 500°C realisiert werden. In der hinter den Propanbrenner angeschlossenen Rohrstrecke ist eine Blende verbaut, die zur Messung des Volumenstroms dient. Zudem dient die Rohrstrecke zur Einstellung eines geradlinigen Strömungsprofils, bevor die Strömung durch die Wärmespeicher verläuft.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der bei der Technikumsanlage und auch bei dem realen mobilen Wärmespeicher beachtet werden musste, ist die Wärmedämmung. Hier wurde eine Hochtemperatur Steinwolle verwendet. Sämtliche Rohrleitungen und die Speicher mussten mit Steinwolle eingewickelt werden, um hohe Temperaturverluste zu verhindern. Die Stärke der Dämmung beträgt 50mm.

Die Konstruktion der Rohrleitungen spielt sowohl bei der Technikumsanlage als auch beim realen Wärmespeicher eine wichtige Rolle. Der Druckverlust wird maßgeblich durch die Rohrleitungen beeinflusst. Daher wurde hier auf eine möglichst kurze Rohrleitung mit möglichst wenigen Bögen oder scharfkantigen Übergängen geachtet.

Zwischen den Flanschen der Rohrleitungen wurden ISOPLAN 750 Dichtungen verwendet, um mögliche Leckagen an den Flanschen zu vermeiden.

Die komplette Technikumsanlage wurde aus einem S235 JR Stahl gefertigt. Für die Technikumsversuche war dies vollkommen ausreichend, da dort keine äußeren Belastungen (Bremskräfte oder Beschleunigungskräfte) auf den Speicher wirkten.

Da bei den Versuchen mit einem Gas gearbeitet wurde, das bei Undichtigkeiten des Systems unverbrannt frei in die Atmosphäre austreten kann, mussten weitreichende Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden. Hierzu wurde hinter dem Propanbrenner eine Flammüberwachung installiert, wodurch die Gaszufuhr unterbrochen wird, sobald die Flamme erlischt. Als zweite Sicherheit wurden Gaswarngeräte in dem Versuchsgebäude installiert. Während den Versuchen wurde die Versuchsanlage weiträumig abgesperrt, damit niemand durch die hohen Temperaturen gefährdet werden kann. Wichtig war auch, dass die verbrannten Gase, die hinter dem zweiten Speicher austreten sicher nach oben aus der Halle herausgeleitet werden.

Ein Speicher besteht aus einem oberen und unteren Gas- Einlass und Gas- Auslass Bereich, der sich oberhalb bzw. unterhalb der Kiesschüttung befindet. Zwischen diesen Bereichen befindet sich der Kies. Dieser liegt auf einem mit Langlöchern versehenen Auflagerost. Die Höhe der Kiesschüttung eines Speichers sollte zwei Meter betragen, damit diese Höhe ähnlich der realen Schütthöhe liegt, und der Strömungswiderstand ähnlich dem realen Speicher liegt.

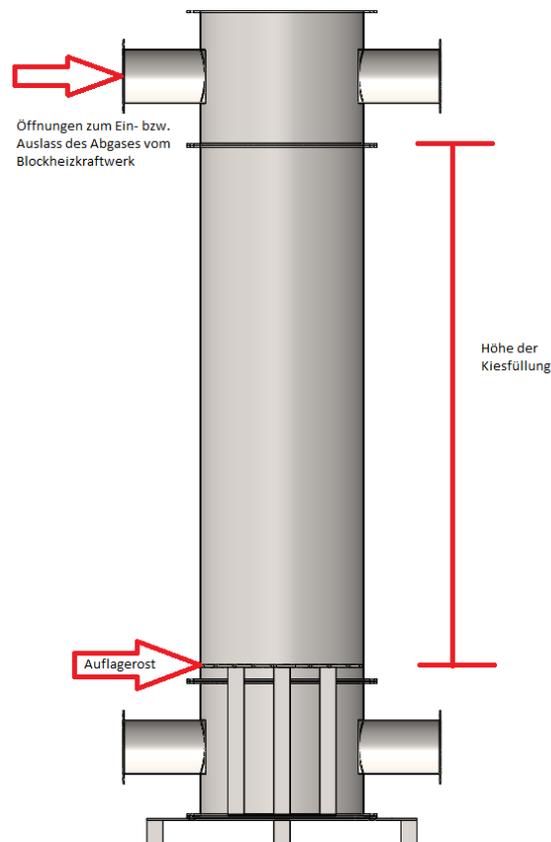


Abbildung 2: Schnittansicht Behälter Technikumsanlage

### 3. Schaltungsvarianten

Die Technikumsanlage wurde so aufgebaut, dass es mehrere Möglichkeiten gibt die einzelnen Speicher miteinander zu verschalten. Die Versuche mit verschiedenen Schaltungsvarianten waren wichtig, um die Druckverluste über der Kiesschüttung messen zu können. Hieraus konnten später die Anlagengröße der Biogasanlage auf dem Wärmespeicher angepasst werden.

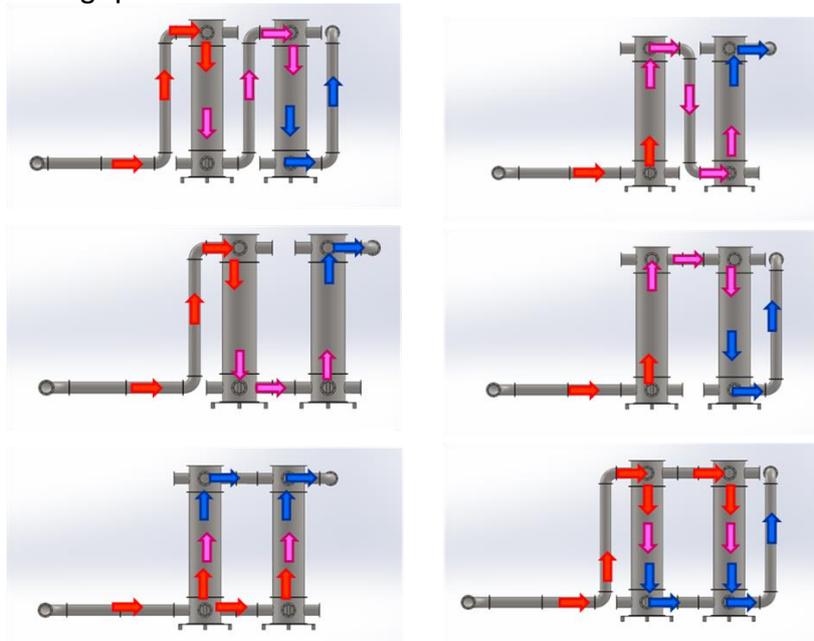


Abbildung 3: verschiedene Schaltungsvarianten der Technikumsanlage

Zu diesen sechs verschiedenen Schaltungsvarianten gibt es noch weitere Möglichkeiten den Wärmespeicher aufzubauen und an die Größe des Blockheizkraftwerks anzupassen. Eine weitere Möglichkeit ist es die Korngröße des Kieses zu variieren und über die Kiesgrößen den Druckverlust einzustellen. Eine große Kiesgröße würde zu einem geringeren Druckverlust führen. Des Weiteren gibt es die Möglichkeit nur einen Wärmespeicher zu nutzen und in diesem Speicher mit verschiedenen Korngrößen zu befüllen. Je nach Blockheizkraftwerk Größe kann somit die Kiesschüttung angepasst werden. Ein weiterer Punkt, der bei den verschiedenen Schaltungsvarianten geprüft werden sollte, ist die Kondensatbildung. Da bei der Technikumsanlage nur mit einem Abgas, welches durch einen Propanbrenner erzeugt wurde, wurde im Rahmen des Antrags nur ein Anfall von wässrigem Kondensat, das an den Unterseiten der Schüttungen austreten kann, erwartet.

Diese konservative Annahme konnte im Rahmen der Technikumsversuche widerlegt werden. An den Unterseiten beider Schüttungen waren Stutzen angebracht, über die ausfallenden Kondensat hätte abgeleitet werden können. Zu keinem Zeitpunkt konnte an diesen Stutzen ein Austritt von Kondensat beobachtet werden. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass kondensierende Feuchtigkeit von der vom Brenner nachströmenden Wärme direkt wieder verdampft wurde, so dass es zu keiner Feuchtigkeitsansammlung kam.

Nach jeder Versuchsdurchführung wurden die Wärmespeicher auf eine andere Konfiguration umgebaut und der Versuch wurde bei gleichbleibenden Bedingungen erneut gestartet. Über den beiden Wärmespeichern lag der Druckverlust bei der Reihenschaltung deutlich höher als bei der Parallelschaltung. Das war zuvor erwartet worden, da

sich die Strömung gleichmäßig aufteilt und der angeströmte Querschnitt sich verdoppelt hat.

#### 4. Versuche und Durchführung



Abbildung 4: reale Technikumsanlage

Im Laufe der Technikumsphase wurden zahlreiche Versuche durchgeführt. Hierbei wurde das Aufheiz- und Abkühlverhalten des Wärmespeichers geprüft. Bei der Versuchsdurchführung wurden mehrere Druck- und Temperaturmessungen durchgeführt. Die Temperaturen wurden jeweils vor dem Eintritt in die Wärmespeicher und am Austritt aus dem Wärmespeicher gemessen. Es wurden zudem Druckmessungen an der Blende und über den Wärmespeichern durchgeführt. Die Druckmessung an der Blende diente zur Volumenstrombestimmung. Der Volumenstrom konnte über den Ventilator vergrößert oder verringert werden. Über einen Frequenzumrichter konnte die Drehzahl variiert werden. Die Druckverlustmessung wurde über einen Druckstutzen vor dem Eintritt in den ersten Speicher und über einen Druckstutzen hinter dem zweiten Speicher gemessen. In Abbildung 4 sieht man vorne den schwarz lackierten Ventilator. Links im Bild sieht man den Anwärmebrenner, worüber die Heißluft in Kombination mit dem Luftstrom des Ventilators erzeugt wurde.

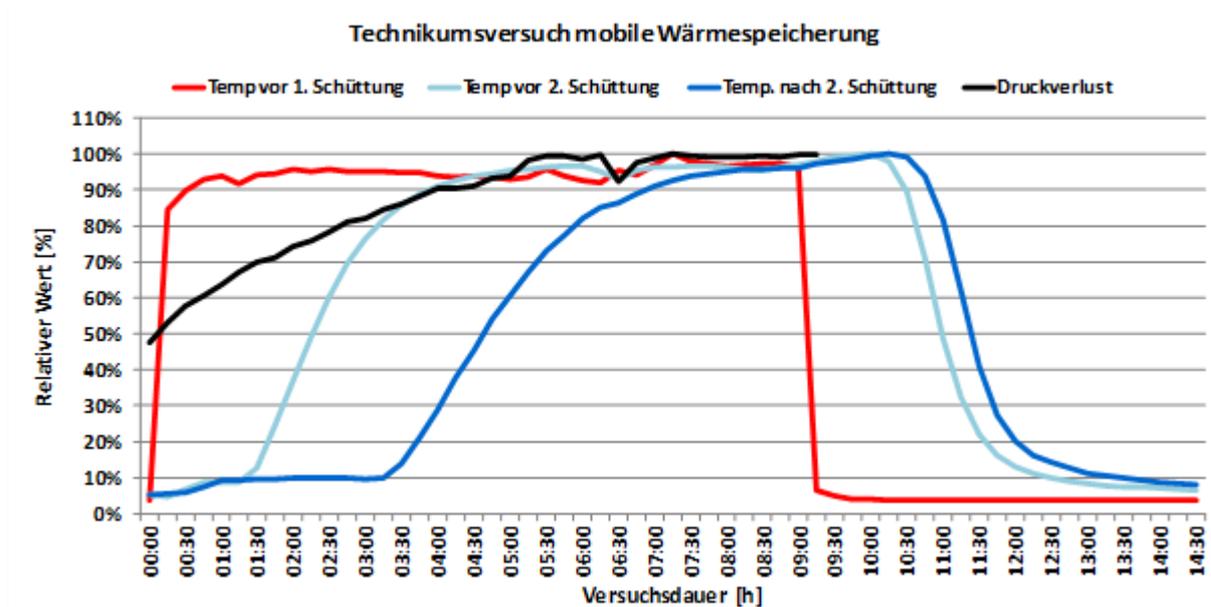


Abbildung 5: Auswertung eines Technikumsversuch

In der Abbildung 5 ist ein beispielhafter Versuchstag über 14,5 Stunden abgebildet. Zum Start wurde der Brenner angestellt, das erkennt man an dem steilen Anstieg der roten Kurve. Nach neun Stunden wurde der Brenner ausgeschaltet (abruptes Abfallen der roten Kurve). Die hellblaue Kurve gibt die Temperatur nach der ersten bzw. vor der zweiten Schüttung an. Hier steigt die Temperatur erst nach circa einer Stunde an. Die ganze Wärme wird bis zu diesem Zeitpunkt von der ersten Schüttung aufgenommen. Nach circa 4,5 Stunden ist die erste Schüttung durchgewärmt. Das zeigt sich dadurch, dass die hellblaue Kurve sein Maximum erreicht und nicht weiter ansteigt. Nach 3,5 Stunden beginnt die Temperatur nach der zweiten Schüttung zu steigen. Die zweite Schüttung ist nach acht Stunden gesättigt und somit ist der gesamte Wärmespeicher komplett beladen. Nach dem Abschalten des Brenners nach neun Stunden beginnt das Entladen der beiden geladenen Speicher bei weiterhin laufendem Ventilator. Die Entladung ist nach 13 bis 14 Stunden Gesamtzeit abgeschlossen. Die blauen Kurven nähern sich der Umgebungstemperatur an. Durch den Verlauf der Temperaturkurven zeigt sich, dass die Annahmen die Erwartungen an den Versuch bestätigen, und es keine unerwarteten Vorkommnisse gab.

## Technikumsanlage – Kiespresse

### 1. Nutzen

Neben der ohnehin im Vorhaben geplanten Technikumsanlage – Wärmespeicher musste eine weitere Technikumsanlage gebaut werden, die zur Unterstützung der Auslegung des realen mobilen Wärmespeichers dienen sollte. Zur Berechnung des Wärmespeichers fehlten Annahmen zu den Kräften, die auf der Behälterwand des Wärmespeichers anliegen.

Diese Kräfte werden durch die Kiesschüttung auf Behälterwand ausgeübt.

Aus diesem Grund wurde eine zusätzliche, im Projektantrag nicht vorgesehene, Technikumsanlage, die sog. „Kiespresse“ entwickelt, mit deren Hilfe die innerhalb der Kiesschüttung anliegenden mechanischen Spannungen ermittelt werden können.

Hieraus kann der Druck der Schüttung auf die Behälterwand abgeleitet werden und als Auslegungsgrundlage für die Dimensionierung des Behälters mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode (FEM) genutzt werden.

### 2. Konstruktion/ Aufbau



Abbildung 6: Aufbau Kiespresse

Die Kiespresse besteht aus einem Behälter, an dem drei Seiten fest miteinander verschweißt sind. Die vierte Seite des Behälters ist eine bewegliche Wand. Die bewegliche Wand und die gegenüberliegende Seite verlaufen wie der reale Wärmespeicher konisch zueinander. An der Vorderseite ist eine Halterung angeschweißt, die zur Aufnahme eines oder mehrerer Hydraulikzylinder dient. Der Hydraulikzylinder dient zur Aufbringung der notwendigen Seitenkraft auf die bewegliche Vorderwand, um diese zu verschieben.

### 3. Versuche und Durchführung

In den Versuchen wurden drei verschiedene Kiessorten getestet, die später auch im realen Wärmespeicher infrage kommen. Es wurde erwartet, dass die vom Hydraulikzylinder aufzubringende Kraft auf die bewegliche Vorderwand abnimmt, je kleiner die Körnung des Kiesel ist.

Zur Durchführung der Versuche wurde der Behälter mit einer Kiessorte befüllt, und ein Steuergerät zur Bedienung des Hydraulikzylinders betätigt. Eine Druckmessung für den Hydraulikzylinder an dem Steuergerät hat den hydraulischen Druck gemessen, der auf der Kolbenseite des Zylinders wirkt. Der Messwert wurde abgelesen, sobald sich die bewegliche Vorderwand verschoben hatte. Hierdurch wurde sichtbar, dass die Spannungen innerhalb der Kiesschüttung sich nach oben hin abgebaut hatten.

Diese Maximalspannung bis zur Bewegung innerhalb der Kiesschüttung wurde, neben dem hydrostatischen Druck der Kiesschüttung, als Auslegungsgrundlage für die FEM-basierte Festigkeitsberechnung genutzt.

Messwerte:

Kies 16/32mm Öldruck an der Kolbenseite 95bar

Kies 5,6/8mm Öldruck an der Kolbenseite 55bar

Kies 2/8mm Öldruck an der Kolbenseite 40bar

Die Berechnung der Flächenpressung an der Seitenwand aus dem Versuch Kiespresse ergibt:

Bei einem mit Kies gefüllten Behälter mit den Maßen 0,68 m · 0,65 m · 0,65 m wurde eine bewegliche Vorderwand mit einem Hydraulikzylinder eingedrückt. Im Zylinder stellte sich ein Druck von etwa 95bar an einer Kolbenfläche mit dem Durchmesser 100 mm ein.

- Daraus ergibt sich eine Kolbenkraft von  $F = p \cdot A = 95 \cdot 105 \text{ N/m}^2 \cdot (\pi \cdot 0,12\text{m}^2/4) = 74613 \text{ N}$
- Damit ergibt sich eine Flächenpressung an der Wand, die eingedrückt wurde, zu
- $p = F/A = 74613 \text{ N} / (0,68 \text{ m} \cdot 0,65 \text{ m}) = 168807 \text{ N/m}^2 = 1,68 \text{ bar}$
- Hydrostatischer Druck durch den Kies:
- Der Kies im Container erzeugt eine Pressung an der Seitenwand, die mit der Tiefe zunimmt. Geht man zunächst von einem Druckaufbau wie bei einer Flüssigkeit aus, so führt dies zu einem linear ansteigenden Druck gemäß:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

- welches einen Druck in Bodenhöhe ergibt von  $p = \rho \cdot g \cdot h = 1500 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 1,65 \text{ m} = 24280 \text{ N/m}^2 = 0,243 \text{ bar}$

- Nach VDI-Richtlinie ist ein Fahrzeug so auszulegen, dass es die zweifache Erdbeschleunigung der Last erträgt. Dies erhöht den angenommenen hydrostatischen Druck auf das Zweifache, also:  $p = 0,243 \text{ bar} \cdot 2 = 0,486 \text{ bar}$
- Wie zuvor erwartet, steigt die am Hydraulikzylinder anliegende Kraft mit zunehmender Korngröße. Die aus dem Versuch gewonnenen Ergebnisse konnten später in der FEM – Berechnung genutzt werden.
- Damit beträgt der Auslegungsdruck für den Behälter in Boden- Rostnähe:  $1,68 \text{ bar} + 0,49 = 2,17 \text{ bar}$ . Auf Basis dieses Werte wurde den die FEM-Berechnungen sowie die nachfolgende Konstruktion durchgeführt.

## Herstellung Prototyp

### CAD/FEM Berechnung

Durch den komplexen Aufbau des Mobilten Wärmespeichers wurden hohe Anforderungen an die Auslegung des Wärmespeichers gelegt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde sich darauf geeinigt, anstelle einer händischen Berechnung eine FEM-Berechnung durchzuführen. Diese Berechnung wurde vom Fachbereich Maschinenbau im Konstruktionslabor unter Leitung von Herrn Professor Baalman von der Fachhochschule Münster am Standort Steinfurt durchgeführt. Die FEM- Berechnung hat den Vorteil, dass es schnell möglich ist Änderungen in das Modell einzufügen. Zudem können sämtliche kritischen Bereiche schnell erkannt und verbessert werden.

Durch die ersten Berechnungen stellte sich schnell heraus, dass die Verrippung des Wärmespeichers deutlich größer ausfallen muss als zuvor angenommen. Der Einsatz der größeren Verrippung erhöhte das eingesetzte Stahlgewicht, wodurch sich die Kiesmasse und somit die maximal transportierbare Wärmemenge verringert. Aus diesem Grund wurde entschieden von zwei kleinen in Reihe geschalteten Speichern auf einen großen Speicher zu wechseln. (Siehe Zwischenbericht)

Ein Großteil der FEM-Berechnung befasste sich mit der Auslegung des Auflagerostes. Auf diesem Rost liegt später die komplette Kiesschüttung, wodurch diese Baugruppe extremen Belastungen ausgesetzt ist. Diese Belastung besteht zum einen aus dem Gewicht der Schüttung, und zum anderen aus der Wärmebelastung von bis zu 550°C.

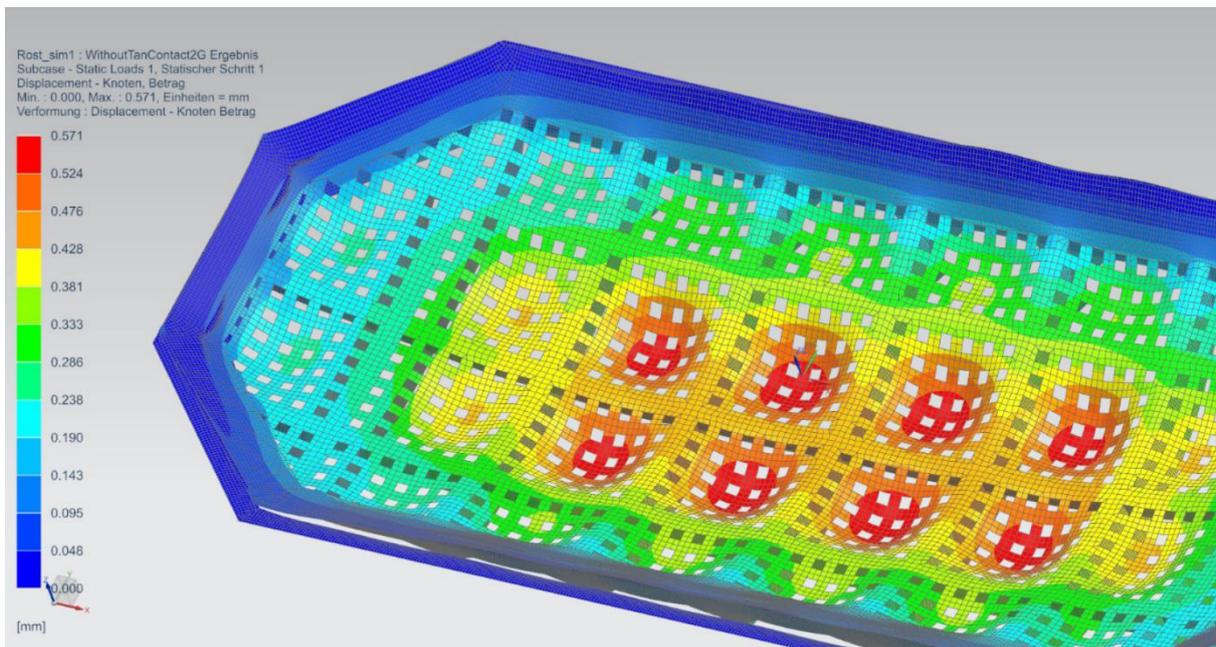


Abbildung 7: Verformung des Auflagerost

Die Abbildung 7 zeigt verdeutlicht, wie stark sich das Auflagerost verformt. Wie erwartet tritt die größte Verformung in der Mitte des Auflagerostes auf. Die hier angegebene maximale Verformung in der Mitte von 0,571mm kann als unbedenklich betrachtet werden.

Das Auflagerost wird lose in den Wärmespeicher eingelegt. Durch die eingebrachte Wärme kann sich das Auflagerost ausdehnen und würde den Wärmespeicher bei einer

zu hohen Ausdehnung zu stark belasten. Aus diesem Grund wurde das Rost als einzelne Baugruppe so in den Wärmespeicher eingebaut, dass dieses sich in alle Richtungen weit genug ausdehnen kann ohne andere Bauteile zu belasten.

Durch die sehr hohen Temperaturen wurden hohe Ausdehnungen des Wärmespeichers erwartet. Ein Problem hierbei war, dass sich der Wärmespeicher ungleichmäßig ausdehnt.

An dem Wärmeeintritt dehnt sich der Wärmespeicher schneller aus als am Wärmeaustritt. Das hat zur Folge, dass der Wärmespeicher ungleichmäßig belastet wird. Die in der Abbildung 8 gezeigten Verformungen wurden durch den Einsatz größerer Rippen kompensiert. Dadurch verringert sich die Verformung deutlich, und die Spannungen im Wärmespeicher befinden sich in einem zulässigen Bereich.

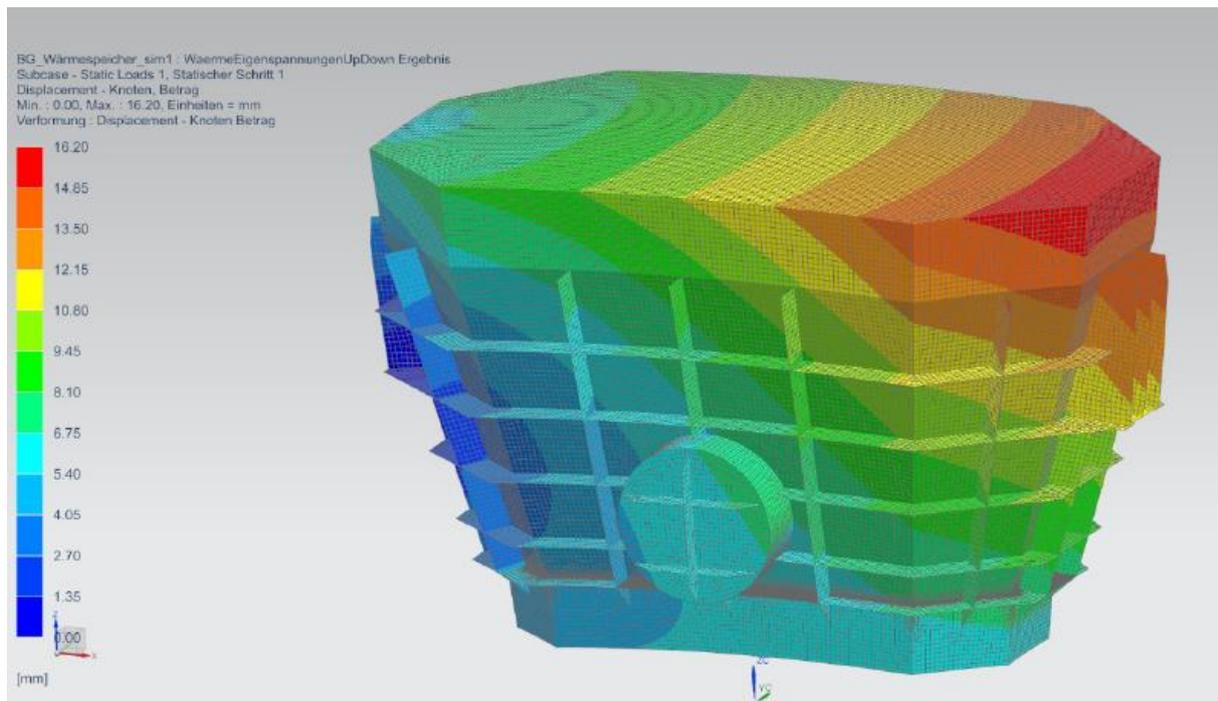


Abbildung 8:Wärmedehnung Verformung

Neben den oben genannten Verformungen durch Wärmeeinbringung des durchströmenden Abgases treten zusätzliche Verformungen durch den Kies, welcher an die Speicherwand drückt, auf. Dieser Druck wurde zuvor in der Kiespresse ermittelt.

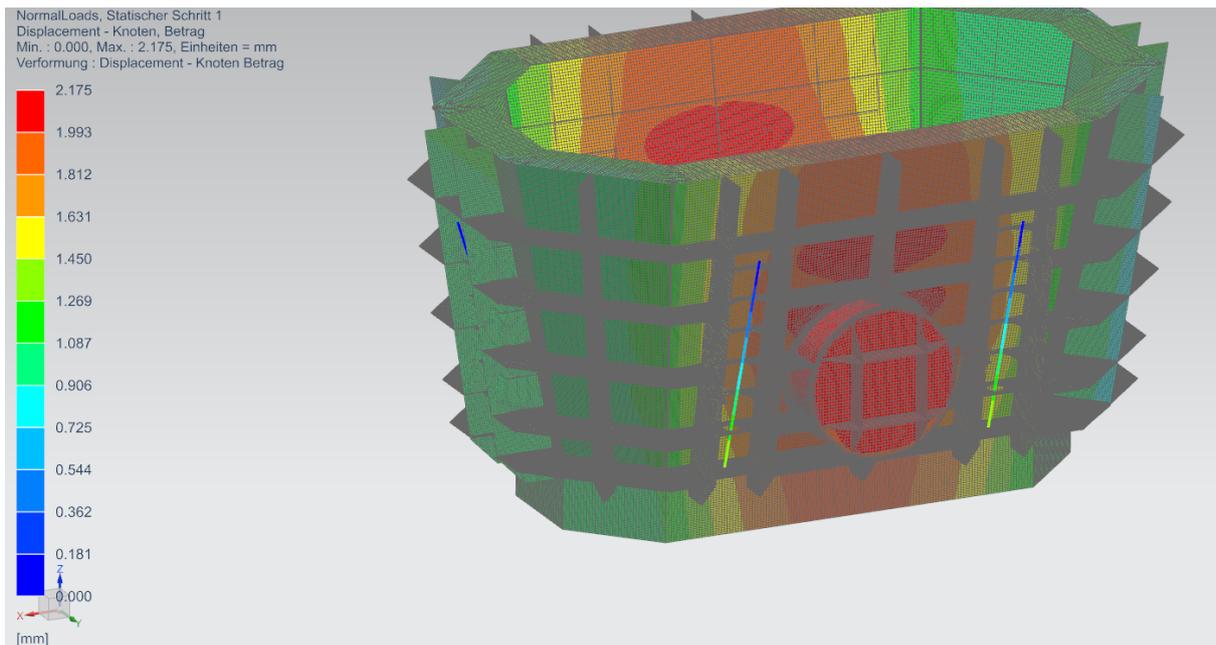


Abbildung 9: Verformung durch Pressung an der Seitenwand

In Abbildung 9 wird die Verformung durch die Pressung an der Seitenwand dargestellt. Wie zuvor erwartet ist die größte Verformung in der Mitte des Speichers. Hier liegt die größte Verformung bei maximal 2,175mm. Diese geringe Verformung ist als unbedenklich zu betrachten.

### Konstruktion

Die Größe und das hohe Gewicht des Wärmespeichers trugen zu einer sehr aufwendigen Konstruktion bei. Des Weiteren musste die hohe Wärmebelastung auf den Wärmespeicher besonders berücksichtigt werden.

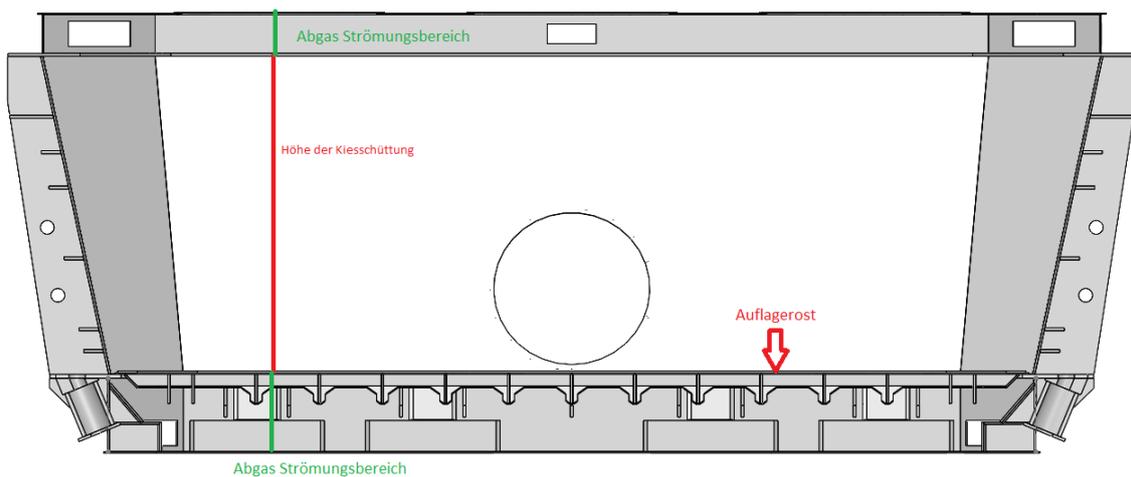


Abbildung 10: Wärmespeicher im Schnitt

Die Abbildung 10 zeigt den fertig konstruierten Wärmespeicher, so wie dieser gebaut wurde. Dieser wurde nach den Vorgaben, die sich aus den FEM-Berechnungen ergeben haben, gebaut. Die FEM-Berechnungen gaben die Wandstärken der einzelnen Baugruppen vor. Der untere Abgas Strömungsbereich wurde massiv ausgelegt, da

hierüber der komplette Wärmespeicher getragen wird. Die Wandstärken hier betragen 10mm-25mm. Auf diesen unteren Strömungsbereich wurde das Auflagerost aufgelegt, der auch in Abbildung 7 zu sehen ist. Über den unteren Strömungsbereich befindet sich ein konischer Behälter, in dem sich die Kiesschüttung befindet. Dieser Bereich wurde bei dem Prototyp volumenmäßig größer ausgeführt, um verschiedenste Kiessorten und Kiesmengen in den Versuchen testen zu können. In dem konischen Behälter befinden sich an jeder Seite zwei große Mannlöcher zum Entleeren des Kieses. Zur Befüllung mit Kies hat der Wärmespeicher oben drei große Öffnungen. Über diese Öffnungen kann mit einem Gabelstapler ein Big Pack mit Kies gefahren werden und in den Speicher gefüllt werden. Dadurch das der Wärmespeicher Brems- und Beschleunigungsvorgängen ausgesetzt ist kann es wie bei Flüssigkeiten zu einem Vor- und Zurücklaufen der Kieselsteine kommen. Um ein Anhäufen von Kieselsteinen an einer Seite zu verhindern und somit eine Erhöhung einer einseitigen Kraft zu verhindern, wurden im oberen Bereich der Schüttung Schwallbleche eingeschweißt. Diese verhindern ein übermäßiges Wandern der Steine zu einer Seite, und halten den Füllstand der Steine über den gesamten Querschnitt konstant. Eine konstante Füllstandshöhe ist zudem wichtig, um einen gleichmäßigen Strömungsverlauf über die gesamte Schüttung zu erhalten. Ein einseitiges Anhäufen des Kieses würde zu einer ungleichmäßigen Erwärmung des Kieses führen.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Straßentransport. Die Wärme des Wärmespeichers darf sich nicht auf das Fahrgestell übertragen. Zudem konnte der Wärmespeicher nicht direkt an dem Fahrgestell angebunden werden, da der Wärmespeicher sich in sämtliche Richtungen ausdehnt und somit zusätzliche Kräfte in das Fahrgestell einleitet. Hierzu wurde ein komplett neues Traggestell entwickelt, das den Wärmespeicher über Zugstangen und Tellerfedern in der Schwebelage hält. Ein weiterer großer Vorteil dieses Systems ist, dass sich die Wärme über die Zugstangen abbauen kann und somit nicht weiter auf die Träger und Tellerfedern überträgt.

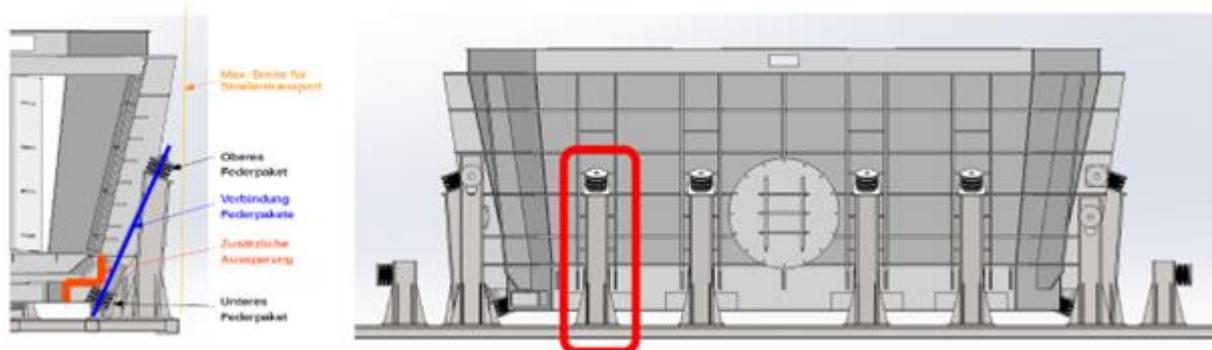


Abbildung 11: Traggestell Wärmespeicher

In Abbildung 11 ist das Traggestell des Wärmespeichers zu sehen. Rundum dem Wärmespeicher sind Stützen verteilt, über die Kräfte auf die Plattform des Aufliegers und darüber auf das Fahrgestell übertragen werden können. Um die großen Kräfte vom Wärmespeicher auf die Stützen einleiten zu können wurden die Tellerfedern in zwei Federpakete aufgeteilt. Aufgrund der maximal zulässigen Transportbreite war es nicht möglich alle Tellerfedern in einem Federpaket unterzubringen. Daher wurde sich dazu entschieden ein Federpaket auf der Stütze anzubringen, und ein Federpaket unten an dem Wärmespeicher anzubringen. Die Anbringung eines Federpaketes unterhalb des Wärmespeichers führte dazu, dass der untere Strömungsbereich geändert werden musste, um genügend Platz für die Tellerfedern zu haben.

Als Zugstangen werden M42 Gewindestangen genutzt, die ausreichend groß dimensioniert sind. Die Zugstangen werden durch die Stütze in das Federpaket unter dem Wärmespeicher geführt. Der Vorteil von Gewindestangen als Zugstangen besteht darin, dass über diese die Höhe des aufgehängten Wärmespeichers eingestellt werden kann.

Als Material für den Wärmespeicher wurde ein 16Mo3 (1.5415) verwendet. Dieser Stahl hat auch bei höheren Temperaturen eine hohe Festigkeit, und wird oftmals im Kesselbau oder für Wärmetauscher verwendet. Wichtig ist hier die Vorwärmtemperatur von 200°C bei Materialstärken größer 10mm zu beachten. Das führte zu einer deutlich verlängerten Bauzeit des Wärmespeichers, da sämtliche Teile vorgewärmt werden mussten, um Risse zu vermeiden. Ein Mitarbeiter hat die Bauteile vorgewärmt und ein weiterer hat die Bauteile verschweißt.

Aufgrund der Größe des Wärmespeichers ist eine Verlegung der Rohre nur vor und hinter dem Speicher möglich. Durch die seitlichen Stützen ist die Verlegung der Rohre an der Seite des Wärmespeichers entlang nicht möglich. Somit befinden die Eingangs- und Ausgangsöffnung zum Anschluss an der Beladestation vorne und hinten am Anhänger.

Zur Isolierung des Wärmespeichers dient eine Hitzebeständige Steinwolle. Mit der Steinwolle werden sämtliche Bauteile eingewickelt. Diese dient zum einen zur Isolierung damit die Wärmeverluste möglichst gering sind, und zum anderen um die Verletzungsgefahr durch Verbrennungen zu minimieren. Die Isolierstärke beträgt 100mm. Um die Isolierung und die Wärmeverluste beim Straßentransport und bei der Be- bzw. Entladung zu verringern wurde ein Planen Aufbau für das Plateau gefertigt. Dieses besteht aus einer Rahmenkonstruktion, die komplett schraubbar ist. Eine schraubbare Lösung wurde aus Wartungsgründen bevorzugt.

## Fertigung

Sowohl die Fertigung der Technikumsanlagen als auch die Fertigung des mobilen Wärmespeichers wurden in der Firma Steverding durchgeführt. Zuerst wurde das Grundgestell mit Stützfüßen für die Aufhängung des Wärmespeichers gefertigt. Hierzu wurde ein 30 Fuß Grundrahmen mit Gussecken zur Aufnahme des Gestells an dem Container Chassis gefertigt. Für die Stützen sowie den restlichen Grundrahmen wurde ein S355 (1.0045) Baustahl verwendet. Hier war kein Vorwärmen der Bauteile erforderlich.



Abbildung 12: Wärmespeicher auf Plattform

Nach dem Traggestell wurde begonnen die einzelnen Baugruppen des Wärmespeichers zu verschweißen.

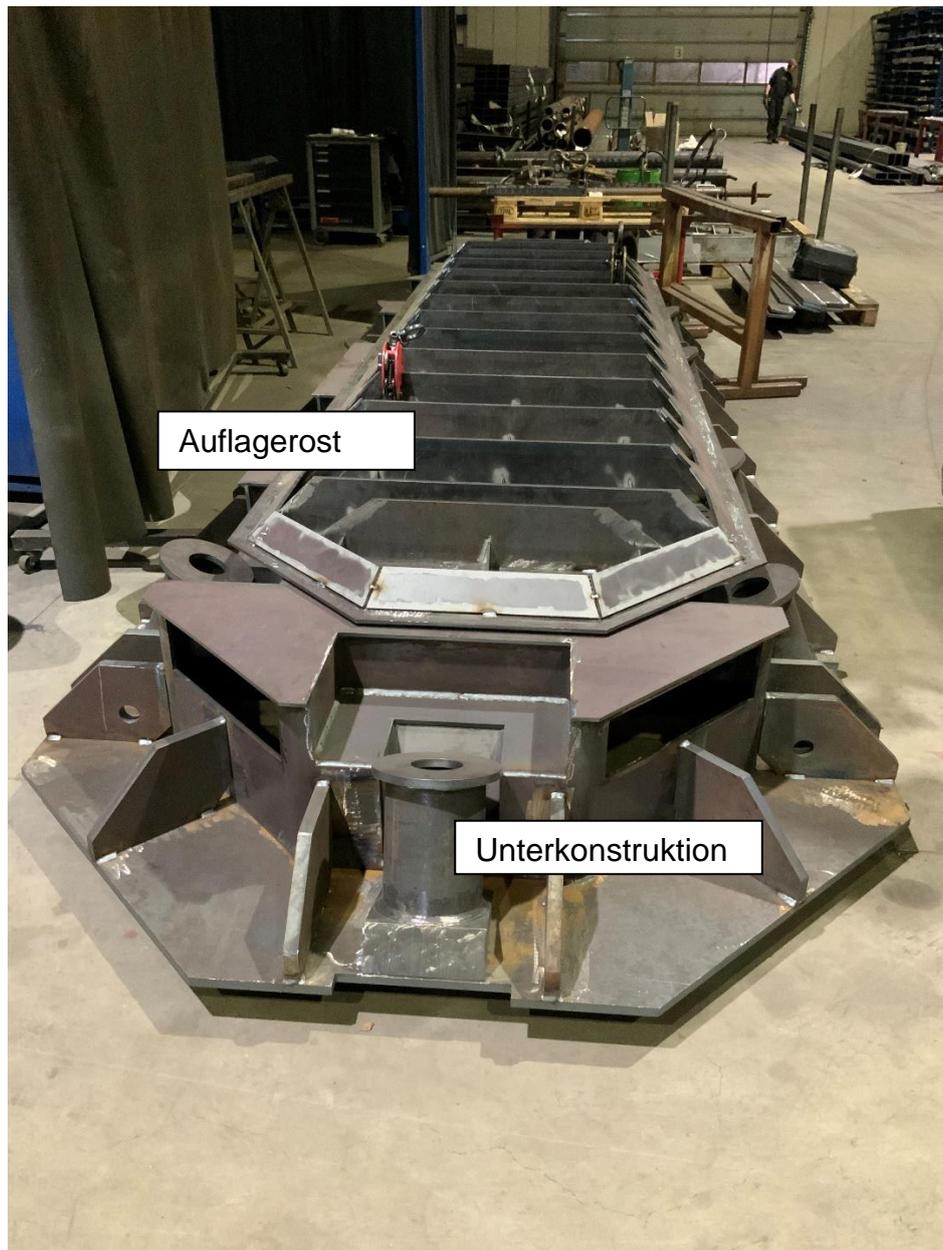


Abbildung 13: Unterkonstruktion und Auflagerost

In der Abbildung 13 ist die Unterkonstruktion und das Auflagerost zu sehen. Zu sehen ist jeweils die Unterseite. Dieses Bild macht die strake Verrippung der Bauteile deutlich. Da diese Komponenten aus einem 16Mo3 bestehen war ein Vorwärmen erforderlich. Zudem musste bei diesen Bauteilen besonders auf den Verzug geachtet werden. Aufgrund der Größe der Bauteile mussten die Einzelteile zum Teil nachgerichtet werden.



*Abbildung 14: Wärmespeicher außen*

Die Abbildung 14 zeigt den Wärmespeicher von außen. Oben und unten sind die Öffnungen zum Einlass oder Auslass des Abgases zu sehen. Der oberste Teil des Wärmespeichers wurde aus einem 5mm starken Blech gefertigt. Da dort keine Belastungen (bis auf Wärmebelastung) anliegen, konnte dieser Teil aus dünnerem Material gefertigt, und auf zusätzliche Rippen verzichtet werden. Alle tragenden Bauteile sind mit größeren Rippen verstärkt worden. Diese verlaufen horizontal in mehreren Lagen umlaufen. Zudem sind in Stützennähe dichter angeordnete senkrechte Rippen zu sehen. Diese sorgen für eine gleichmäßige Kraftverteilung auf den Rahmen. Das Mannloch in der Mitte steht nach außen weiter hervor, um ein einfacheres Ablassen der Kiesschüttung zu ermöglichen.



*Abbildung 15:Wärmespeicher innen*

In Abbildung 15 sieht man den Wärmespeicher von innen. Das Auflagerost liegt lose in dem Wärmespeicher auf der Unterkonstruktion. Die Kiesschüttung kann beidseitig durch die beiden Mannlöcher entleert werden. An den Stellen, an denen die Stützen stehen und die Zugstangen angreifen, wurden auch von innen zusätzlichen Rippen angebracht und verschweißt. Oben in dem Wärmespeicher sind Bleche eingeschweißt, die ein Anhäufen der Schüttung an einer Seite verhindert. Nach Fertigstellung der Schweißarbeiten am Wärmespeicher, wurde dieser in das Traggestell eingehangen. Über die M42 Gewindestangen lässt sich der Wärmespeicher in seiner Ausrichtung verstellen.



Abbildung 16: Einghängter Wärmespeicher

Zur Isolierung des Wärmespeichers und den daran angeschlossenen Rohrleitungen wurde Steinwolle verwendet. Die eingesetzte Steinwolle kann bis zu einer Temperaturobergrenze von  $640^{\circ}\text{C}$  verwendet werden. Die Wärmeleitfähigkeit im oberen Temperaturbereich ( $400^{\circ}\text{C} - 600^{\circ}\text{C}$ ) beträgt  $0,112-0,192 \text{ W/mK}$ . Problematisch bei dem Anbringen der Isolierung war die Befestigung der äußersten Isolierschicht. Diese wurde an Anschweißbolzen, welche auf die Rippen aufgeschweißt wurden, angedrückt und mittels Klemmplättchen gegen Verrutschen gesichert.

Nach dem Anbringen der Strömungsrohre und Isolierung wurde begonnen das Planen Gestell zu montieren. Das Planen Gestell dient zur Befestigung der LKW-Plane. Durch die LKW-Plane ist der Wärmespeicher mit Isolierung nicht der Witterung ausgesetzt. In der LKW-Plane sind beidseitig, vorne und hinten Öffnungen (rote Kreise) angebracht, um die Anschlüsse zur Verbindung nutzen zu können.



Abbildung 17: Fertiggestellter Wärmespeicher die Lage, der von der Plane verdeckten Ein- und Austrittsstutzen sind rot markiert, die in die Plane integrierten Öffnungsmöglichkeiten sind erkennbar

## Beladestation

Nachdem die Fertigung des Prototypen Speichers, wurde damit begonnen die Be- und Entladestation zu fertigen. Zurzeit wird ein Teil der Wärme zur Beheizung des Fermenters genutzt. Das Blockheizkraftwerk (kurz BHKW) am Testbetrieb eignet sich besonders für den Prototypen Test, da es sich in unmittelbarer Nähe zum Fertigungsbetrieb befindet, und somit eine einfache Überwachung im Testbetrieb möglich ist. Das BHKW vom Hersteller 2G (Typ: Avus 500 plus mit 526kW elektrischer Leistung) ist auch von der Leistung in einem weit verbreiteten Bereich einzuordnen. In dieser Leistungsklasse werden viele Biogasanlagen betrieben.

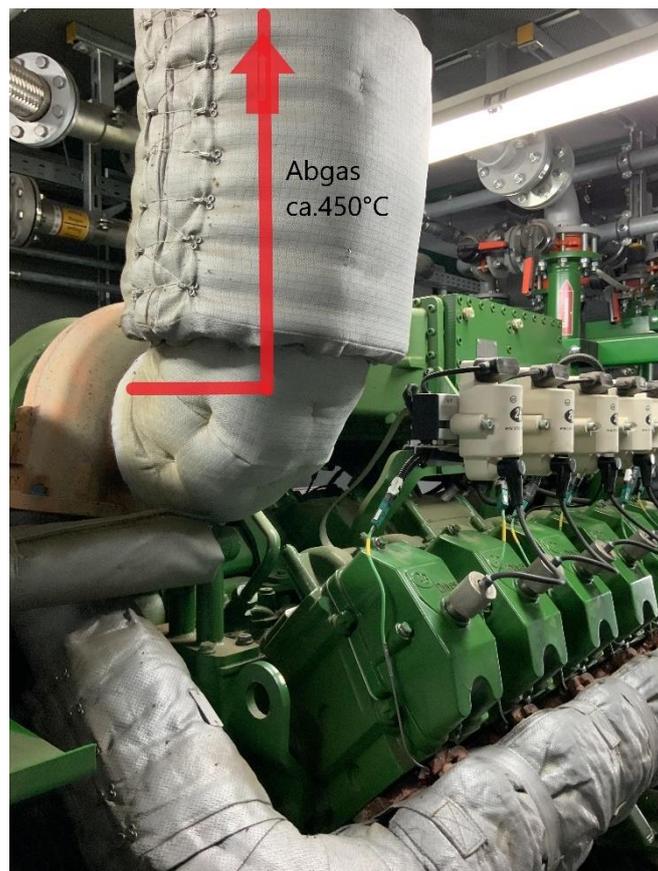


Abbildung 18: BHKW innen

Die Abbildung 16 zeigt das BHKW von innen. Dort ist der Motor zu sehen, der mit dem Biogas, das in den Fermentern und in dem Nachgärer entsteht, betrieben wird. Das bei der Verbrennung entstehende Abgas wird über den Turbolader aus dem BHKW-Innenraum nach draußen geleitet. Hinter dem Turbolader beträgt die Abgastemperatur ca.450°C.

Der Motor dieses BHKWs ist für einen Abgasgedruck von 40mbar ausgelegt. Dieser Wert darf nicht überschritten werden, um den Motor nicht zu schädigen. Daher muss die Rohrleitungsverlegung zum Wärmespeicher möglichst geradlinig verlaufen, um höhere Druckverluste in der Rohrleitung zu verhindern. Zudem muss eine Überdrucksicherung verbaut werden, um einen plötzlichen Druckanstieg des Abgasgedrucks durch ein Verschließen der Rohrleitung zu verhindern. Hierzu wurde eine Überdrucksicherung entwickelt, die mit einem Sperrmedium funktioniert. Eine zwei geteilte Kammer wird bis zu einer bestimmten Höhe mit Wasser gefüllt. Beide Kammern sind

im unteren Teil des Behälters über eine Öffnung miteinander verbunden. Dadurch stellt sich bei Stillstand des Motors in beiden Kammerhälften die gleiche Füllstandshöhe ein. Eine Kammerhälfte wird direkt mit der Rohrleitung verbunden. Die andere Kammerhälfte hat eine Öffnung nach draußen. Steigt der Druck an der Motorseitigen Kammer an, so drückt das Abgas das Wasser aus der Motorseitigen Kammer in die andere Kammer. Steigt der Druck noch weiter an, so kann auch das Abgas von der Motorseitigen Kammer durch die andere Kammer nach draußen entweichen. Somit kann das Abgas bei zu hohem Abgasgegendruck über die Überdrucksicherung entweichen und der Motor wird geschützt.



Abbildung 19: BHKW am Testbetrieb

Vom Turbolader aus wird das Abgas durch die Containerdecke des BHKWs nach draußen geleitet. Von dort aus wird es über zwei 90° Bögen durch den Katalysator und den Abgaswärmetauscher über den Kamin in die Umwelt geleitet. Im Katalysator wird das Abgas nachbehandelt, um den NO<sub>x</sub>-Wert zu reduzieren. Um den mobilen Wärmespeicher dort anschließen zu können, muss das Abgas, nachdem es aus dem Container herausgeführt wird durch den Katalysator geleitet werden und am Austritt des Katalysators in den Eintritt des Wärmespeichers geleitet werden. Hierzu müssen die beiden 90° Bögen und der Katalysator um 700mm höher gelegt werden. In dieser Erhöhung müssen dann Stützen für eine DN 300 Leitung eingebaut werden. An diesen Stützen kann eine feste Leitung seitlich am BHKW-Container herunter gelegt, um den Wärmespeicher unten anschließen zu können.

Durch die Aufzeichnungspflicht der NO<sub>x</sub>-Werte muss das Abgas, bevor es den Wärmespeicher durchlaufen hat, zwangsläufig durch den Katalysator geleitet werden. Daher ist ein Abgreifen des Abgases vor dem Katalysator quasi ausgeschlossen. Der Großteil der Leitungen wird aus dünnwandigem Stahlrohr gefertigt. Zum Anschluss an den mobilen Wärmespeicher wird das letzte Rohrstück aus flexiblen Rohren gefertigt, damit ein Einfaches anschließen des Wärmespeichers möglich ist. Durch lang andauernde Bauarbeiten und Lieferzeiten am Testbetrieb war eine Aufladung im Projektzeitraum nicht möglich, und soll nach Fertigstellung der Bauarbeiten nachgeholt.

## Praxistest Prototyp

Da lang andauernde Umbauarbeiten an der Biogasanlage mit dem Test -BHKW stattfinden, war während der Projektlaufzeit kein Testbetrieb an einem realen BHKW möglich. Aus diesem Grund wurde der Praxistest am Betriebsgelände der Firma Steverding durchgeführt. Dadurch konnte zudem kontrolliert werden, ob bislang unbekannte Störgrößen während des Praxistests auftreten die zuvor nicht berücksichtigt wurden. Durch den Testbetrieb auf dem Firmengelände konnte sichergestellt werden, dass ein Betrieb an einem realen BHKW problemlos möglich ist.

Der mobile Schüttgutwärmespeicher wurde so umgebaut, damit ein Testbetrieb möglich war. Die Heißluft wurde wie im Technikum über Anwärmbrenner, die mit Propan betrieben wurden, erzeugt. Ein Ventilator hat die Heißluft in den mobilen Schüttgutwärmespeicher geblasen. Eine Messblende und je ein Druckmessstutzen wurden auf der Vorder- und Rückseite der Messblende installiert, um über den Differenzdruck über der Blende laufend den Volumenstrom bestimmen zu können. Zudem wurde der Druckverlust über den gesamten Speicher inklusive Rohrleitung gemessen. Hierzu wurde am Einlass- und Ablassstutzen Druckmessstutzen installiert. Die Temperaturen wurden an sechs verschiedenen Stellen gemessen:

- Einlass
- Auslass
- Oberhalb der Schüttung (vorne, mitte, hinten) -> Temperaturfühler jeweils ca.150mm in die Schüttung eingetaucht
- Oberhalb der Speicherisolierung

In dem mobilen Schüttgutwärmespeicher befinden sich ca. 8to Kies. Das Gewicht des Stahls, der mit Wärme beaufschlagt werden kann beträgt ca. 12to. Das Gesamtgewicht des Gespannes inklusive einer Zugmaschine beträgt ca.40to. Somit ist Das Gesamtgewicht für den Straßenverkehr zulässig.

Auf der Auslassseite wurde ein Kamin installiert, um die Luft in die Umgebung abzuführen.



Abbildung 20: Versuchsaufbau realer Wärmespeicher, hier mit abgedeckter Plane und Eintritt des warmen Gases (roter Pfeil) und Austritt des bei der Beladung des Speichers abgekühlten Gases (blauer Pfeil), bei Entladung Eintritt Kaltluft (roter Pfeil) und Austritt Warmluft (blauer Pfeil)

## Erstbeladung des Wärmespeichers

### Allgemeine Beschreibung und Versuchsaufbau

Die Erstbeladung des mobilen Wärmespeichers fand planmäßig und unter ständiger Beaufsichtigung auf dem Werksgelände der Firma Steverding statt. Das für die Beladung des Wärmespeichers erforderliche Abgas konnte hierbei zielgenau nach Menge und Temperatur vorgegeben werden. Der Aufheizvorgang konnte so unter definierten Bedingungen materialschonend mit einem allmählich ansteigenden Temperaturprofil und Abgasdurchsatz erfolgen. Bei der Beladung an einer Biogasanlage könnte, unter Umständen, die dem Speicher zugeführte Abgasmenge variiert werden, während die Abgastemperatur sofort zu Beladungsbeginn und ohne Regelungsmöglichkeit mit dem Maximalwert ansteht.

Aufgrund des Fertigungsprozesses, der das Schweißen dicker Bleche mit erheblichem Wärmeeintrag und auch ein Nachziehen aufgrund von Schweißverzug beinhaltet, konnte nicht ausgeschlossen werden, dass der Gesamtspeicher noch über fertigungsbedingte mechanische Spannungen verfügte. Die in der Technik häufig angewandte Methode des sogenannten Lösungsglühen zum Abbau dieser fertigungsbedingten Spannung war aufgrund der Bauteilgröße nicht möglich. Von daher wurde entschieden, dass der Wärmespeicher vorsichtig mit langsam ansteigender Temperatur und zunehmendem Volumenstrom aufgeheizt werden sollte.

Das zum Aufheizen verwendete Abgas konnte weiten Temperatur- und Mengenbereichen flexibel durch einen drehzahlgesteuerten Ventilator und zwei, im Stahlbau gebräuchliche, Anwärmbrenner bereitgestellt werden. Maximale Durchsatz an Propan der Brenner beträgt  $2 \times 9,6 \text{ kg/h} = 19,2 \text{ kg/h}$  bei 4 bar. Zur Brenngasversorgung standen für die Erstbeladung insgesamt 18 Propanflaschen à 33 kg zur Verfügung, die zusammengefasst in sogenannten Bündeln vor und nach der Versuchskampagne gewogen wurden, so dass ein gesamter Propandurchsatz von 330,4 kg für die Erstbeladung des Wärmespeichers erforderlich war.

In den umgangssprachlich bezeichneten Propanflaschen liegt das Gas als eine Mischung von Propan und Butan in nicht näher spezifiziertem Mischungsverhältnis vor, das zumindest für manche Anwendungen auch jahreszeitlich als Sommer- und Wintermischung schwanken kann. Bezogen auf den Energiegehalt ist diese Schwankungsbreite jedoch gering, so dass hier von einem Mischungsverhältnis von 50% Propan und 50% Butan ausgegangen wird, was zu einem Heizwert  $H_i$  von 12,79 kWh/kg und einem Brennwert  $H_s$  von 13,87 kWh/kg führt (die Differenz 100% Propan zu 50% Propan und 50% Butan ist kleiner ein Prozent und wird daher hier vernachlässigt). Beim Brennwert wird, im Gegensatz zum Heizwert, der Energiegehalt des verdampfenden bzw. kondensierenden Wasser(dampf-)gehaltes mitberücksichtigt, der beim Verbrennen des Kohlenwasserstoffs entsteht und im Bereich von etwa neun Prozent liegt.

Der Energieeintrag in den Wärmespeicher betrug daher bezogen auf den Heizwert  $330,4 \text{ kg} \cdot 12,79 \text{ kWh/kg} = 4.225,8 \text{ kWh}$  und bezogen auf den Brennwert  $330,4 \text{ kg} \cdot 13,87 \text{ kWh/kg} = 4.582,6 \text{ kWh}$ .

Der maximale Wärmeeintrag bei vollem Durchsatz beider Brenner beträgt  $19,2 \text{ kg/h} \cdot 12,79 \text{ kWh/kg} = 245 \text{ kW}$ . Dies entspricht dem Wärmeeintrag über das Abgas eines Biogas-BHKWs mit einer elektrischen Leistung von rund 550 kW und liegt damit im Bereich von in der Praxis üblichen Größen von Biogasanlagen.

Hierzu ist anzumerken, dass durch das bewusste langsame und materialschonende Aufheizen sowohl die Beladungszeit als auch die Propanmenge größer ausfällt als bei direktem Beginn mit der maximalen Abgasmenge und Abgastemperatur.

## Versuchsdurchführung

Die Erstbeladung des Wärmespeichers wurde unter freiem Himmel durchgeführt, so dass das Wetter für den Zeitpunkt der Durchführung von wesentlicher Bedeutung war. Starke Niederschläge, speziell in Verbindung mit hohen Windgeschwindigkeiten wurden als ungünstig für die Technik, speziell die elektronische Datenerfassung, aber auch für das Bedienpersonal angesehen. Aufgrund der zu dieser Zeit verfügbaren Wetterprognose wurde die Erstbeladung des Wärmespeichers daher in der Zeit vom 18.06 bis zum 20.06.2023 durchgeführt.

Die bei der Erstbeladung ermittelten Temperatur- und Druckwerte sind in Abbildung 21 dargestellt.

Auf der linken y-Achse ist die Temperatur des Gasstroms am Eingang des Speichers in rot und an dessen Ausgang in orange dargestellt.

In den linken Teil der Grafik, die sich über etwa 3/4 des dargestellten Zeitraums erstreckt, ist ein Anstieg der roten Kurve (Gastemperatur am Eingang des Wärmespeichers) von zunächst etwa 200°C auf bis zu über 500°C zu erkennen. Die rote Kurve endet mit dem Ausschalten der Gasbrenner nach rund 31 Stunden Beladung.

Die deutlichen Schwankungen in der roten Kurve deuten darauf hin, dass es vor allem zu Beginn des Beladungsprozesses immer wieder Schwierigkeiten mit dem Einfrieren der Gasflaschen aufgrund der hohen Gasentnahme gab. Hierdurch wurde der Durchsatz verringert und ein häufigerer Wechsel der Gasflaschen ebenso erforderlich wie eine Anpassung der Ventilator Drehzahl um die Temperatur des Abgas-Luft-Gemisches. Während der Beladung wurden mehrere Warmluftheizungen erfolgreich in die Anordnung integriert, so dass etwa im letzten Drittel der Beladungszeit deutlich höhere Gasdurchsätze und Temperaturen realisiert werden konnten. Dies ist sowohl an der roten Kurve als auch vor allem an der grau gestrichelten Kurve, die den Differenzdruck über die Messblende angibt, deutlich zu erkennen.

Der rechte und tiefere Teil der roten Kurve zeigt die Temperatur der Luft an, die durch den Ventilator nach Abstellen der Brenner in den Speicher gefördert wird. Es ist gut zu erkennen, dass die Luft zu Beginn noch durch die warme Rohrleitung erwärmt in den Speicher eintritt, jedoch nach kurzer Zeit das Niveau der Umgebung annimmt.

Die orangene Kurve stellt die Gastemperatur am Ausgang des Wärmespeichers dar. Dieser Wert bleibt etwa fünf Stunden lang bei der Umgebungstemperatur von etwa 25 °C und steigt dann kontinuierlich auf bis rund 400 °C beim Abschalten der Brenner an. Nach dem Ausschalten der Brenner steigt die orangene Kurve über rund zweieinhalb Stunden bis auf etwa 450°C an. Dieses Ansteigen der Austrittstemperatur nach dem Abschalten der Brenner zeigt, dass der untere Einströmbereich der Schüttung wärmer war als der darüberliegenden, d.h. dass die Schüttung zum Zeitpunkt des Ausschaltens noch nicht vollständig durchgewärmt und die Temperaturschichtung im Speicher deutlich stärker als angenommen war. Damit ist auch die bei der Entladung des Speichers ermittelte Energieentnahme aus dem Speicher nicht der Wert der maximalen Speicherkapazität. Es wurde entschieden aufgrund einer ungünstigen Wetterprognose auf die vollständige Beladung des Speichers zu verzichten, so dass der Abkühlprozess sicher abgeschlossen werden konnte.

Die orangene Kurve fällt nach dem Maximalpunkt von rund 450 °C ab. Nach rund 12 Stunden Entladezeit wurde der Versuch bei Lufttemperaturen am Ausgang von 44 °C

beendet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde hier auf die Darstellung weiterer Temperaturwerte an der Oberseite der Schüttung verzichtet, die dazu dienen, während der Beladung die Gleichverteilung der Gasströmung zu beurteilen. Im Wesentlichen liegen diese Werte im Bereich um die hier dargestellte orangene Linie.

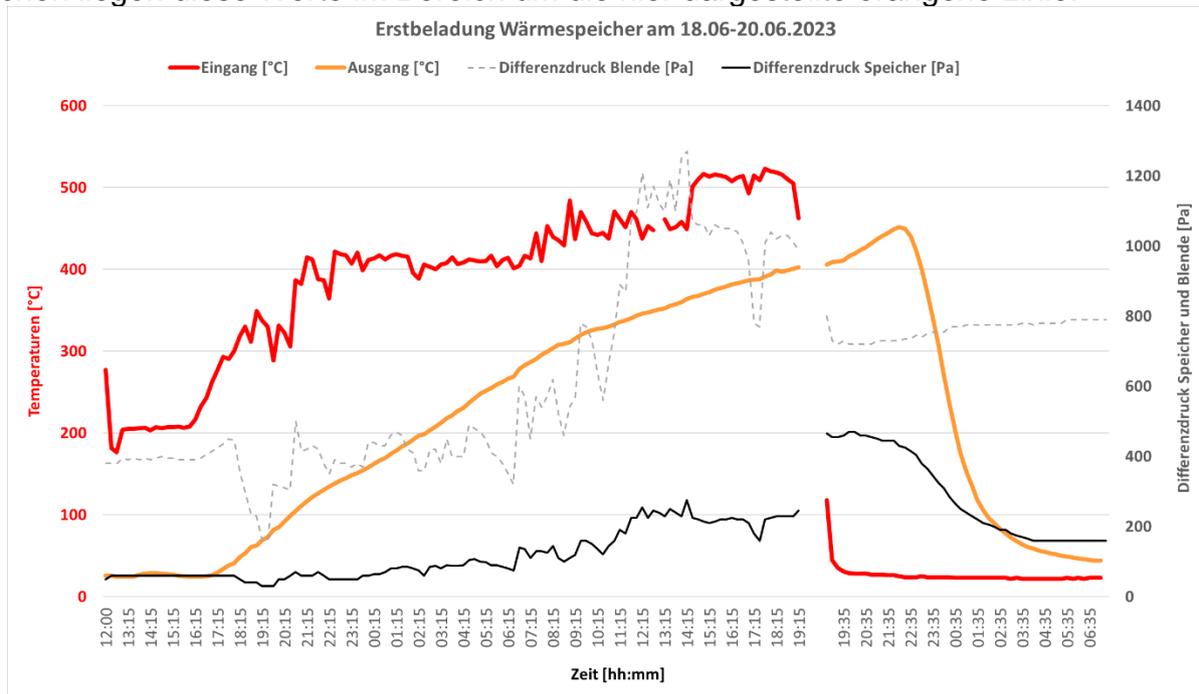


Abbildung 21: Erstbeladung Wärmespeicher, Temperatur- und Druckwerte

Die Beladung des Speichers dauert hier deutlich länger als die Entladung. Dies liegt zu einem Teil an dem bewusst durchgeführten vorsichtigen Aufheizen auch mit deutlich verminderter Brennerleistung.

Der Hauptgrund für die unterschiedlichen Dauern liegt jedoch in der Leistungsregelung des Ventilators, der während der Beladung im Mittel etwa auf halber Drehzahl lief, während die Entladung auf voller Drehzahl stattfand. Dies ist auch an dem Verlauf der schwarzen durchgezogenen Kurven, die den Differenzdruck über den Speicher und damit indirekt auch den Volumenstrom innerhalb des Speichers angeben – während der viel kürzeren Entladezeit liegt die schwarze Kurve deutlich über der wesentlich längeren Beladezeit.

Die graue gestrichelte Kurve, die den Differenzdruck über die Messblende darstellt, zeigt stark temperaturabhängige Werte an, die in diesem Zusammenhang weniger anschaulich sind.

In Abbildung 22 ist die Energiebilanz des Be- und Entladevorgangs grafisch dargestellt. Auf der x-Achse ist Versuchszeit angetragen. Die Zeitpunkte wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit hier nicht erneut aufgeführt. Auf der y-Achse ist thermischen Leistungen in Kilowatt aufgetragen. Die blaus-roten Flächen im linken Teil sind negativ dargestellt, da es sich um den Energieeintrag in den Speicher handelt. Der Unterschied zwischen den Bezügen auf den Heizwert bzw. den Brennwert ist relativ gering.

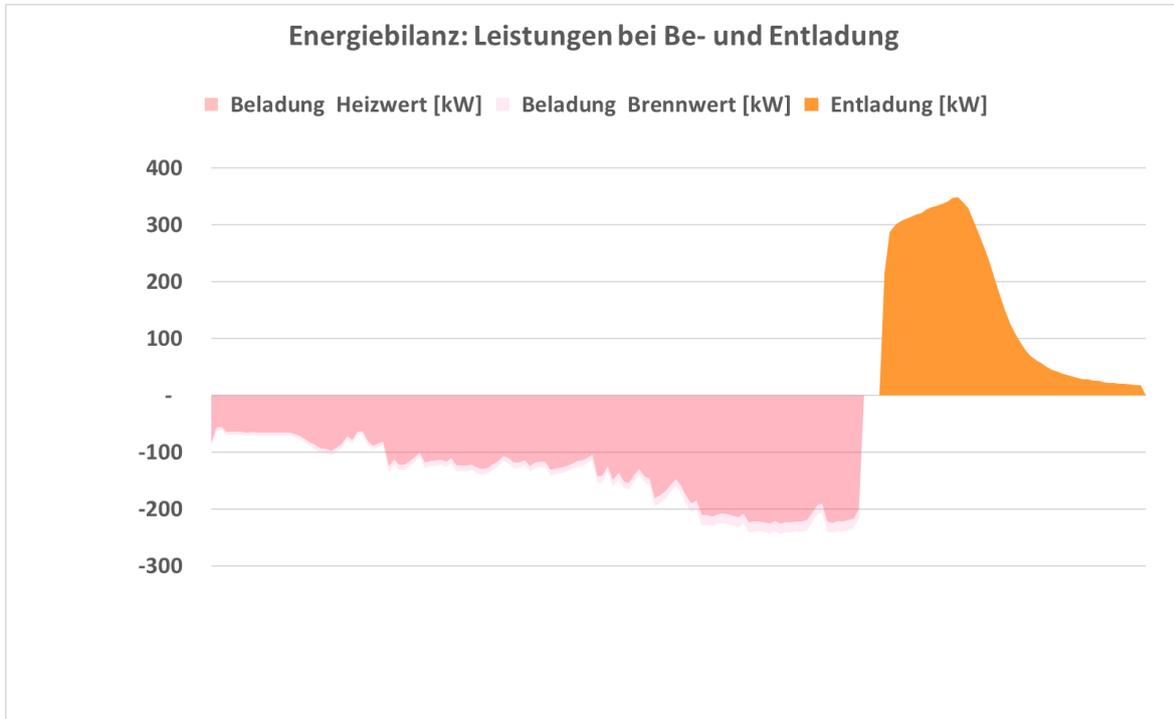


Abbildung 22: Energiebilanz der Erstbeladung des Wärmespeichers, linker Teil: Beladung mit negativ dargestellten Leistungswerten für die Beladung (Brennwert und Heizwert), rechter Teil in orange: Entladung mit positiv dargestellter Entladeleistung.

Die Flächen zwischen den Kurven und der x-Achse geben die Energiemengen der Be- und Entladung aus Produkt von Leistung und Zeit an. Hier fällt wiederum auf, dass die orangene, die Entladung beschreibende Fläche sich über einen kürzeren Zeitraum jedoch mit einer höheren Amplitude im Vergleich zu den blaus-roten, die Beladung beschreibenden Flächen erstreckt.

Die Fläche zwischen der Kurve und der x-Achse ist bei den blaus-roten Kurven gut doppelt so groß wie bei der orangenen Kurve. Die blaus-roten Flächen ergeben einen Energieeintrag von gut 4.200 kWh bezogen auf den Heizwert und einen von knapp 4.600 kWh bezogen auf den Brennwert. Diese Werte sind, neben der Messung der Temperaturen und des Volumenstroms über die Blende, anhand des gewogenen Gasverbrauchs gut herzuleiten, so dass auch eine sich ändernde Gaszusammensetzung gut ausgeglichen werden. Demgegenüber ist die Berechnung des Entladevorganges einfacher, da hierbei nur Luft in unveränderter Zusammensetzung zum Einsatz kommt. Die Energieauskopplung aus dem Wärmespeicher wird über die eingebrachte Kaltluftmenge und die Temperaturdifferenz vom Eingang zu Ausgang berechnet und sie beträgt gut 2.000 kWh. Bei zukünftig optimierter Konstruktion des Wärmespeichers sollen diese Werte auch von einer unabhängigen externen Stelle, wie beispielsweise dem TÜV, kontrolliert und dokumentiert werden.

Das Verhältnis der dem Speicher zugeführten Energie zur entnommenen Energie beträgt bei diesem Versuch der Erstbeladung 48 Prozent in Bezug auf den Heizwert und knapp 45 Prozent bezogen auf den Brennwert des Propan-Butan-Gemisches.

An dieser Stelle bereits von einem Wirkungsgrad des Schüttgutspeichers zu sprechen wäre irreführend. Wenn der Speicher sofort mit maximaler Temperatur und Gasdurchsatz beladen worden wäre, wäre der Energieeintrag deutlich geringer ausgefallen als bei dieser bewusst materialschonenden Beheizungsvariante. Bei schnellerer Beheizung wäre das Verhältnis von eingespeister zu entnommener Energie also günstiger ausgefallen. Es erscheint daher sicher, dass bei diesem Versuchsaufbau ein Verhältnis vom mehr als 50 Prozent erzielt werden kann. Die Energieentnahme von gut 2.000 kWh stellt nicht den Maximalwert der Speicherkapazität dar, da der Speicher beim Abschalten der Brenner noch nicht vollständig beladen war, was daran zu erkennen ist, dass die Entladetemperatur nach Abschalten der Brenner noch über einen Zeitraum von etwa zweieinhalb Stunden ansteigt.

### **Fazit Erstbeladung (Wärmespeicher) und Ausblick**

Bereits die materialschonende und damit weniger energieeffiziente Erstbeladung deutet daher darauf hin, dass die Speicherkapazität oberhalb von 2.000 kWh liegt und Speicherwirkungsgrade von mehr als 50 Prozent zu erreichen sind.

Durch eine Reihenschaltung mehrerer Schüttungen lässt sich der Speicherwirkungsgrad weiter erhöhen, dass das während der Beladung aus der ersten Schüttung abströmende warme Gas zur Vorwärmung der nachfolgenden Schüttung verwendet wird. Bei einer Einzelschüttung wie dem hier vorliegenden Wärmespeicher entweicht das warme Gas direkt in die Umgebung. Eine Vereinfachung der Konstruktion, die auch eine Reihenschaltung von Schüttungen erlaubt, führt daher zu einer Erhöhung des Speicherwirkungsgrades. Bei der vorliegenden Konstruktion war diese Reihenschaltung aufgrund des ohnehin schon sehr hohen Fertigungsaufwandes nicht möglich.

Diese Werte können bei zukünftigen Konstruktionen weiter verbessert werden. Eine Steigerung der Speicherkapazität ergibt sich durch eine Verringerung der Stahlmasse im Vergleich zur Kiesmasse durch die höhere Wärmespeicherkapazität des Kiesel. Die Verringerung der Stahlmasse als Folge der Vereinfachung der Konstruktion ist allein schon zur Reduktion der Fertigungskosten erforderlich. Diese Konstruktionsverbesserung hat drei Vorteile: neben den geringeren Fertigungskosten wird hierdurch eine Steigerung der Speicherkapazität und des Speicherwirkungsgrades erzielt.

## **Diskussion der Ergebnisse insbesondere im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung**

Verwendung von ISO-Containern (Standard-Überseecontainer) war ursprünglich projektiert. Zur Erhöhung der durch das zulässige Gesamtgewicht beim Straßentransport beschränkten Speicherkapazität wurde dies in einen Containerrahmen mit Planenaufbau geändert. Hierdurch wird Gewicht im Bereich der Seitenwände und des Daches eingespart, so dass mehr Kies und damit mehr Wärme transportiert werden kann. Ursprünglich angedacht war die Verwendung von 20 Fuß Containern. Es hat sich im Laufe des Projektes gezeigt, dass eine größere Länge vorteilhaft ist, da der Raumbedarf für die massive Verrippung des Innenbehälters, das Stützensystem zur Aufnahme der Kräfte beim Transport, insbesondere beim Bremsen und die innerhalb der Transporteinheit befindliche Rohrleitungsführung einen größeren Raumbedarf hat als ursprünglich angenommen. Für den Prototypen wurde daher eine 30-Fuss-Länge als sinnvoll erachtet.

Erwartung von Kondensatausfall während des Aufheizvorgangs durch Kondensation von Wasserdampf als Bestandteil des Abgases des Propanbrenners bei den Technikumsversuchen. Es wurde darauf basierend davon ausgegangen, dass beim Einleiten der BHKW-Abgase aus der Verbrennung von Biogas zusätzlich zum Wasser mit einer Kondensation von schwefliger Säure und/oder Schwefelsäure zu rechnen.

Im Rahmen der Technikumsversuche wurde kein Kondensatanfall beobachtet. Die an den Behälterböden angebrachten Entnahmestutzen für das Kondensat blieben immer trocken.

Der Grund hierfür ist vermutlich, dass die beim Kontakt mit kaltem Kies lokal auskondensierende Feuchte direkt wieder durch das nachströmende warme Gas verdampft wird.

Da bei den Technikumsversuchen keine Kondensation von Wasser beobachtet werden konnte, wurde vom Projektteam angenommen, dass dieser Effekt auch beim mit Biogas-BHKW-Abgas beaufschlagten Prototypen nicht der Fall sein wird. Das Gleiche gilt für den Anfall von schwefliger Säure bzw. Schwefelsäure. Aus diesem Grunde wurde auch auf die Verwendung von Edelstahl als Material für den Speicherbehälter verzichtet.

Die Außenisolierung des Behälters wurde mit Mineralwolle zur Minderung der Speicherverluste isoliert. An der Innenseite des Behälters wurde eine dünne Mineralwollschicht angebracht, die durch die Kiesschüttung stark verdichtet wird. Hierdurch kann auf der einen Seite die Randgängigkeit der Strömung wirkungsvoll verhindert werden. Auf der anderen Seite wird die Isolierwirkung durch die starke Kompression der Mineralwolle so stark vermindert, dass der Wärmeübergang zur Stahlkonstruktion nicht im großen Umfang behindert wird. Dadurch kann steht der Stahl der Behälterkonstruktion ebenfalls als Speichermasse zur Verfügung.

Die Neutralisierung von schwefelhaltigem Kondensat ist in jedem Fall bei der Beheizung mit Propan nicht relevant, da dieser Brennstoff schwefelfrei ist. Der theoretisch hier nicht auszuschließende Anfall an wässrigem Kondensat konnte zu keiner Zeit an den extra hierfür in der Technikumsanlage eingebauten Stutzen beobachtet werden. Es kann daher angenommen werden, dass das wässrige Kondensat, sofern es überhaupt ausfällt, sofort wieder an der warmen Schüttung verdampft und so aus dem Speicher ausgetragen wird.

Da im Technikum bei Propanheizung kein Ausfall von wässrigem Kondensat beobachtet werden konnte, ist auch der Ausfall von schwefeligem Kondensat innerhalb des Speichers bei Biogasanlagen unwahrscheinlich – der Praxisnachweis hierzu steht jedoch noch aus.

Sollte es widererwartend zum Anfall von schwefeligen und damit sauren Kondensaten kommen, können diese leicht, beispielsweise mit Kalk oder verdünnten Laugen neutralisiert werden. Der Erfolg der Neutralisierung lässt sich einfach über den sogenannten Lackmüstest oder pH-Indikatorpapiere kontrollieren. Eine vorherige Rücksprache mit der lokalen Kläranlage vor der Zufuhr ist erforderlich, sofern der unwahrscheinliche Fall des Anfalls von schwefeligen und neutralisierten Kondensaten eintritt.

Aus ökologischer Sicht ist der Einsatz eines Wärmespeichers in Bezug auf schwefelhaltige Kondensate entweder neutral oder positiv zu bewerten. Die Emissionssituation ist unverändert gegenüber dem Betrieb der Biogasanlage ohne Speicher, wenn keine Kondensate innerhalb des Wärmespeichers anfallen – der Schwefel wird dann wie zuvor mit dem Abgas ausgetragen. Sollten doch Kondensate anfallen und diese neutralisiert an die Kläranlage abgegeben werden, wird der Emissionspfad über die Luft verringert.

Die ursprünglich angenommene Kiesmenge beruhte auf der Annahme vergleichsweise dünner Behälterwände. Da diese Wände auf Basis der durchgeführten FEM-Berechnung ebenso wie die Verrippung deutlich stärker und damit schwerer ausgeführt wurden (knapp 12 Tonnen), musste zur Einhaltung des zulässigen Gesamtgewichts für den Straßentransport die Kiesmasse auf etwa 8 Tonnen bei 40 Tonnen Gesamtgewicht inkl. Zugmaschine, Auflieger, Plane und Planengestell, etwa 12 Tonnen bei 44 Tonnen Gesamtgewicht (Super Heavy Variante mit Sondergenehmigung) verringert werden.

Die durchgeführten Messungen bei der Entladung des Speichers ergeben eine Wärmeauskopplung des Speichers von gut 2 MWh. Es wurde ursprünglich von einer Speicherkapazität von rund 2,5 MWh ausgegangen. Dieses Ergebnis ist beachtlich, da die Mehrmenge an Stahl über eine etwas geringere Wärmespeicherkapazität verfügt als die Mindermengen an Kies und der Speicher nicht vollständig beladen war.

Bereits die Fertigungskosten für den Prototypen deutlich über dem angenommenen Verkaufspreis. Bei aktuellen Stahlpreisen würde der Speicher nochmals teurer werden. Die sehr aufwendige Schweißkonstruktion führt dazu, dass sehr viele Arbeitsstunden in die Produktionszeit einfließen und somit eine marktfähige Produktion der jetzigen Konstruktion nicht möglich macht.

### **Sicherheitsrelevante Maßnahmen**

Für einen sicheren Betrieb des mobilen Schüttgutwärmespeichers müssen einige Sicherheitstechnische Punkte betrachtet werden:

- Umgang mit Abgasen
- Umgang mit heißen Oberflächen
- Brandgefahrenquellen im Umfeld der Wärmequelle und der Wärmesenke
- Fahrerqualifikation/ Unterweisung
- Anschluss während des Speicherwechsels

Da als Wärmequelle für den mobilen Schüttgutwärmespeicher das Abgas vom Motor des BHKW genutzt wird, besteht die Gefahr, dass Menschen dieses Abgas einatmen können was zu einer Gesundheitsgefährdung führen würde. Im Regelbetrieb wird das Abgas über einen Kamin oberhalb des BHKW in die Umwelt geführt. Dieser oder ein anderer Kamin muss zwangsläufig auch hinter dem mobilen Schüttgutwärmespeicher verwendet werden, damit die Abgase nicht in die direkte Atemluft abgegeben wird. Zudem werden im Umfeld der Beladung CO- Sensoren angebracht damit diese im Notfall frühzeitig ein entsprechendes Signal abgeben. Desweiteren wird der mobile Schüttgutwärmespeicher über Schnellkupplungen angeschlossen und getrennt um einen schnellen Tausch der Speicher gewährleisten zu können. Diese heißen Oberflächen und weitere Komponenten können nur mit entsprechender Sicherheitsausrüstung bedient werden. Eine Entsprechende Kennzeichnung muss gewährleistet werden. Der Aufstellungsort an der Wärmequelle und an der Wärmesenke muss vor dem Betrieb geprüft werden, ob es im Umfeld potenzielle Brandgefahrenquellen gibt. Im Regelbetrieb entstehen im Umfeld des Wärmespeichers keine erhöhten Temperaturen, dennoch sollte dieser Aspekt betrachtet werden. Eine Unterweisung der Fahrer in die Thematik mobile Schüttgutwärmespeicherung ist erforderlich um auf die potenziellen Gefahren hinzuweisen.

## **Umweltentlastung**

Im Folgenden soll die Energiebilanz grob erläutert werden. Diese zeigt einen deutlichen Überhang an Energiegewinnung in Gegenüberstellung zur investierten Energie. Selbst bei konservativen Annahmen, wie einer pro Fahrt transportierten Wärmemenge von nur 2.000 kWh und der betrachteten Maximaldistanz des Transports von 10 km, benötigt der LKW für Hin- und Rückweg vier Prozent der transportierten Energiemenge. Der LKW benötigt für den maximalen Hin- und Rückweg von  $2 \times 10\text{km} = 20\text{km}$  und einem Dieserverbrauch von 40 l/100km acht Liter Diesel, was einem Energieäquivalent von 80 kWh entspricht. Die maximal für den mobilen Wärmespeichertransport eingesetzte Energiemenge von vier Prozent ergibt sich durch Division der 80 kWh (Diesel für Maximaldistanz) durch die transportierte Energiemenge (2.000 kWh, konservative Annahme). Bei dieser konservativen Betrachtung wird vernachlässigt, dass kürzere Transportstrecken weniger Diesel benötigen, ein optimierter Wärmespeicher mit mehr Kies und weniger Stahl deutlich mehr Wärme transportieren kann und dass die aus dem Mobilspeicher ausgekoppelte Wärme direkt zur Verfügung steht und keine Umwandlungs- und Kesselwirkungsgrade beim Wärmekunden mehr berücksichtigt werden müssen.

## **Erwähnung von unerwarteten Problemen**

- Fachkräftemangel, auch in Verbindung mit sehr hoher Auslastung durch anhaltend gute Auftragslage – dies führte zu Verzögerungen über den gesamten Projektzeitraum
- Unternehmenswechsel von ursprünglich vorgesehenem Mitarbeiter mit CAD- und FEM-Kenntnissen, hierdurch verspäteter Beginn, längere Suche nach Ersatz, die letztlich zur Einbeziehung der Fachhochschule Münster, Prof. Baalman für die Durchführung der FEM-Berechnungen geführt hatte

- Der ursprüngliche Ansatz zunächst einen einzelnen Probespeicher zum Test zu bauen und erst danach auf Basis dieser Erkenntnis zwei Speicher im finalen Design zu fertigen, wurde durch die wissenschaftlichere Herangehensweise mit Hilfe der FEM-Berechnung ersetzt
- Im Rahmen der Technikumsversuche konnte keine Kondensatbildung durch an der Kiesschüttung abkühlenden Abgases bemerkt werden, daher kann dies auch für die Praxis erwartet werden, so dass die ursprünglich geplanten Edelstahlbehälter nicht erforderlich waren (Mitteilung in Zwischenbericht) – da die Materialkosten des real gebauten Prototypen um ein Vielfaches über den ursprünglich kalkulierten liegen und nur durch ein über den Projektrahmen hinausgehendes finanzielles Engagement der Firmen Steverding, Hemsing und dezentec aufgebracht werden konnten, hätte eine – aller Voraussicht nach nicht benötigte – Edelstahlkonstruktion zum sofortigen Projektabbruch aus Kostengründen geführt
- FEM-Berechnungen sehr komplex und aufwändig
- Zusätzlich zum Projektarbeitsplan Herstellung einer hydraulisch angetrieben Versuch Apparatur zur Bestimmung der Kräfte in einer Kiesschüttung (sog. „Kiespresse“)
- Einbeziehung dieser bestimmten Kräfte in die FEM-Berechnung
- → große Wandstärken, komplexere Verrippung, die z.T. mit der Halterung des Behälters kollidiert
- Stahl-Konstruktion deutlich aufwändiger als geplant
- Durch hohes Stahlgewicht verringert sich die Kapazität des Wärmespeichers, da Stahl (0,45 kJ/kg\*K) nur etwa die halbe spezifische Wärmespeicherkapazität im Vergleich zu Kies (0,84 kJ/kg\*K) hat
- Daher Entscheidung im Projektteam: Reduktion der Stahlmasse durch Änderung der Konstruktion von zwei länglichen achteckigen Behältern (vgl. Zwischenbericht Juli 2018 bis Januar 2019) auf einen länglichen achteckigen Behälter (Mitteilung in Zwischenbericht)
- Dadurch neue FEM-Berechnung mit Änderungen insbesondere bei Wandstärken und der Verrippung und daher auch Umkonstruktion erforderlich

### **Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse – Veröffentlichungen, Messe- und Vortragspräsentationen**

Im Anschluss an das Projekt werden die in der Projektlaufzeit gesammelten Ergebnisse weiter genutzt, um ein marktfähiges Produkt auf den Markt zu bringen. Die Firma Steverding ist als Zulieferer von Rührwerken für den Biogasanlagenbau bekannt. Hauptsächlich werden die Rührwerke über Planungsbüros und Biogasanlagenhersteller vertrieben. In Zukunft sollen die Planungsbüros und Biogasanlagenhersteller kontaktiert werden, um das Interesse an den mobilen Schüttgutwärmespeicher zu erfragen. Hierdurch sollen die ersten Projekte mit mobilen Schüttgutwärmespeichern realisiert werden. Parallel dazu soll der mobile Schüttgutwärmespeicher auf Messen vorgestellt werden, um Interessenten aus potenziellen anderen Anwendungsbereichen wie zum Beispiel industrielle Abwärme anzusprechen.

## Fazit

Die Eignung von Schüttgut, hier speziell (Quarz-)Kies als Wärmespeichermaterial für die Be- und Entladung im direkten Gas-Feststoffkontakt konnte sowohl im Technikum als auch bei dem Prototyp erfolgreich nachgewiesen werden. Besonders die Einsatzmöglichkeit von verschiedenen Korngrößen des Kieses für die jeweilige Be- und Entladesituation macht das System für viele Anlagen nutzbar. Hierdurch wird eine hohe Einsatzflexibilität gewährleistet.

Die Umweltbilanz der mobilen Wärmespeicherung ist, wie erwartet sehr gut. Die durch die mobile Speicherung genutzte Abwärmemenge ist um einen Faktor von etwa 20-30 größer als die für den LKW-Transport benötigte Energie. Selbst bei konservativen Annahmen, wie einer pro Fahrt transportierten Wärmemenge von nur 2.000 kWh und der betrachteten Maximaldistanz des Transports von 10 km, benötigt der LKW für Hin- und Rückweg vier Prozent der transportierten Energiemenge.

Die Konstruktion des Prototyps des mobilen Schüttgutwärmespeicher ist, bedingt durch die hohen Kräfte, die das Schüttgut durch die Wärmedehnung auf die Wandungen ausübt, sehr komplex, arbeits- und materialintensiv. Die FEM- Berechnung hat gezeigt, dass in dieser Ausführung ein großer Materialeinsatz gefordert wird, um eine ausreichend hohe Stabilität in das System zu bringen. Die aufwendige Konstruktion der Verrippung führt zu aufwendigen Schweißarbeiten, die sehr viele Arbeitsstunden erfordern. Die Kosten zur Erstellung des Prototyps sind daher sehr hoch und nicht marktfähig. Während des Projektes kam es durch den Fachkräftemangel, die Corona Krise, Turbulenzen am Stahlmarkt bezüglich Preisen und Lieferzeiten zur Zeit des Baubeginns des Wärmespeichers und durch erhebliche Lieferschwierigkeiten selbst einfacher Komponenten wie LKW-Planen zu einem Verzug in der Projektlaufzeit.

Die Firmen Steverding, Hemsing und dezentec werden auch nach Ablauf des DBU-Projektes weiter an der Optimierung des mobilen Schüttgutwärmespeichers arbeiten. Hierbei wird insbesondere eine Kostenreduktion durch Vereinfachung der Konstruktion im Vordergrund stehen.

Die allgemeine Situation am Wärmemarkt hat sich seit Projektbeginn 2018 deutlich verändert. Die deutlich gestiegene Nachfrage nach nachhaltigen Energiequellen führt umso mehr dazu, das Wärmespeichersystem weiter zu verbessern und somit eine zusätzliche Möglichkeit der Bereitstellung von Wärme zu bieten. Die mobile Wärmespeicherung wird in Zukunft einen Beitrag zum Ausbau der Wärmenetze leisten können.

Kurz zusammengefasst:

- Die untersuchte Technik der Wärmespeicherung in Kies-Schüttgut funktioniert gut.
- Der Prototyp besitzt noch keine Marktreife.
- Das Patent wurde im Februar 2023 erteilt.
- Die Entwicklung wird von den beteiligten Firmen nach dem Projektende eigenständig fortgeführt.

## Literaturverzeichnis

- [Ath11] Athmann, U.; Franzius, K.; Steverding, S.; Hemsing, C.: Wärmetransport-system, Patent angemeldet 2011 und erteilt im Februar 2023: DE10201100655
- [DVG15] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.: Informationen zum Thema Legionellen, [https://www.dvgw.de/medien/dvgw/wasser/qualitaet/flyer\\_legionellen2015.pdf](https://www.dvgw.de/medien/dvgw/wasser/qualitaet/flyer_legionellen2015.pdf)
- [FVB23] Fachverband Biogas e.V.: Anzahl Biogasanlagen in Deutschland, [https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE\\_Branchenzahlen/\\$file/Biogasindustryfigures\\_2021-2022\\_english.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/Biogasindustryfigures_2021-2022_english.pdf), Juni 2023
- [LfU07] Wärmenutzung bei kleinen landwirtschaftlichen Biogasanlagen, ISBN (Online-Version): 978-3-940009-32-6, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg 200
- [Rau16] Rauh, S.: Wärmenutzung von Biogasanlagen in Deutschland, Fachverband Biogas e.V., 17.11.2016