

Schlussbericht

Neuenrade, den 28.02.2025

E-HEAT

Flüssigsalz- und Luft-Elektroheizer für Wärmespeicher-Kraftwerke

Teilvorhaben:

Qualifizierung und Fertigung eines Elektroheizers für den Einsatz in
Wärmespeicher-Kraftwerken mit Flüssigsalz

der

Schniewindt GmbH & Co. KG

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: FKZ 03EE5062 C

Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2021 – 28.02.2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

1.1. Zielstellung

Das Verbundprojekt diene zur Unterstützung und Absicherung für die geplante Wärmespeicherkraftwerk-Demonstration im Rahmen der Reallabor-Projektfamilie „StoreToPower“. Mit der Anlage sollte der erneuerbar erzeugte Strom durch Nutzung von Hochtemperatur-Wärmespeichern regelbar zeitverzögert ins Netz abgegeben werden. Im Verbundprojekt wurden elektrische Heizsysteme entwickelt, die für die Erhitzung von Flüssigsalz und Luft bei hohen Temperaturen eingesetzt werden können. Die elektrischen Erhitzer wurden im Reallabor unter realistischen Bedingungen erprobt. Auf der Grundlage der Erkenntnisse aus den Versuchsreihen wurden technische Verbesserungen erarbeitet, die zu erhöhter Betriebssicherheit und Lebensdauer der Elektroheizer beitragen sollen.

1.2. Projektergebnisse

Im Verbundprojekt wurde von Schniewindt im Schwerpunkt das Arbeitspaket AP 2 bearbeitet. Darüber hinaus war Schniewindt ebenfalls am Arbeitspaket AP 4 beteiligt. Im Folgenden werden die erarbeiteten Ergebnisse beschrieben.

Arbeitspaket 2 „Elektro-Heizsysteme für Flüssigsalz“

Unterarbeitspaket 2.1. „Definition und Konzeptplanung“

In diesem Unterarbeitspaket wurde von der Firma Schniewindt ein Konzept des elektrischen Durchlauferhitzers für Flüssigsalz erarbeitet. Es wurden die einzelnen Spezifikationen definiert und die notwendigen Interfaces bestimmt. Darüber hinaus wurde der entsprechende Signalaustausch zwischen dem Durchlauferhitzer und der TESIS-Infrastruktur abgestimmt. Es erfolgte ebenfalls eine Grobspezifikation des Testablaufs.

Im Folgenden sind die wichtigsten Eckpunkte des Konzepts aufgeführt:

- Elektrischer Durchlauferhitzer für Flüssigsalz mit 360 kW Leistung ohne thermische Isolation (Behälterbau nach Druckgeräterichtlinie, Heizstäbe, Flansch, Anschlusskasten, Aufständigung, Temperaturmesstechnik, 2 x Anschweißstutzen für die Salzleitung)
- Steuer- und Leistungsschaltschrank für den Durchlauferhitzer (inkl. Mess-, Steuer- Regelschnittstelle, Punkte zur Leistungsanbindungen, Hauptschalter zur Freischaltung)
- Druckprobe des Heizers und elektrotechnische Abnahmeprüfung

- Verbindungskabel für ca. 360 kW
 - zwischen Durchlauferhitzer-Anschlusskasten und Heizer-Leistungsschaltschrank
 - zwischen Durchlauferhitzer-Leistungsschaltschrank und DLR- Leistungsschalt-schrank

Unterarbeitspaket 2.2. „Konstruktion und Detailplanung“

In diesem Unterarbeitspaket wurde der detaillierte Aufbau des elektrischen Durchlauferhitzers ausgelegt und konstruktiv umgesetzt. Im Vorfeld der Fertigung des Durchlauferhitzers wurden die benötigten Komponenten und Bauteile definiert und bestellt.

Die folgenden Abbildungen zeigen den konstruierten Durchlauferhitzer für Flüssigsalz.

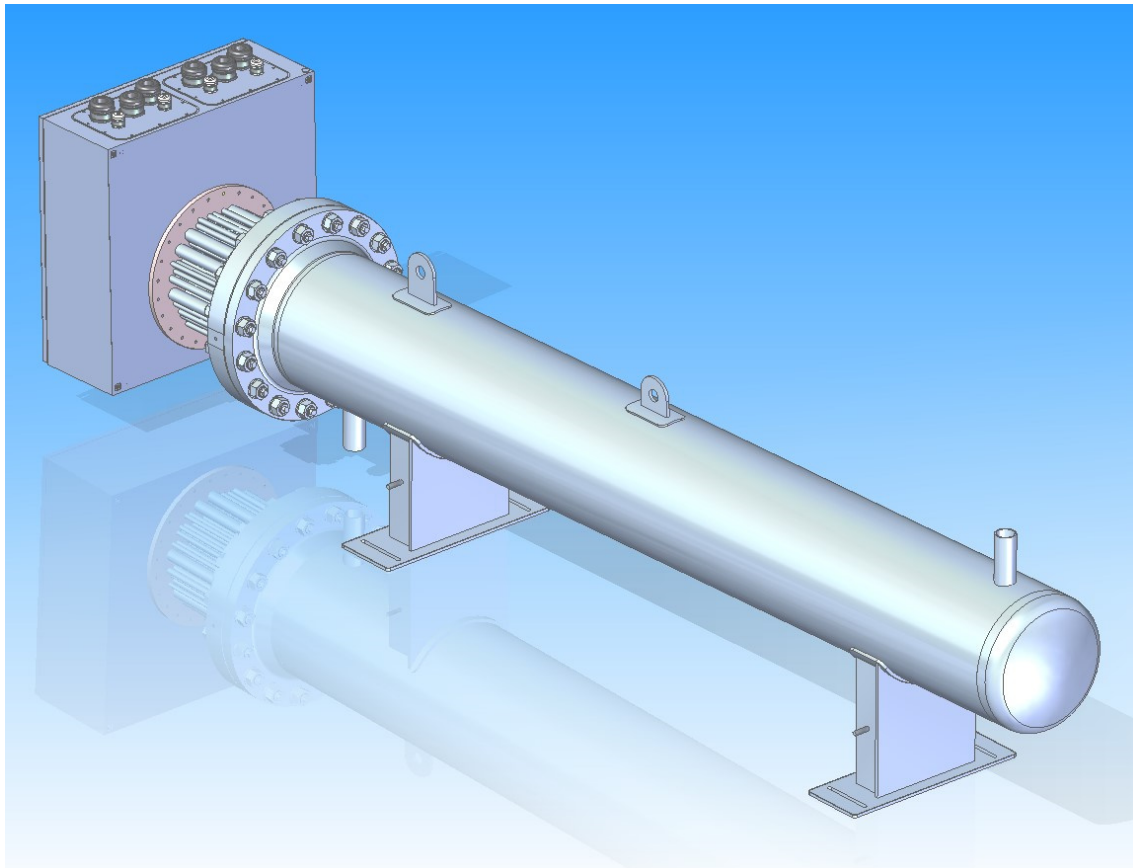


Abbildung 1: 3D-Modell des Durchlauferhitzers für Flüssigsalz der Firma Schniewindt

Der Durchlauferhitzer ist für einen waagerechten Einbau konzipiert, der elektrische Anschlussraum ist seitlich angeordnet. Die Heizkörper sind am Ende des Durchlauferhitzers durch eine Schweißverbindung fixiert. Bei der Detailplanung stand das Medium „Salz“ im Vordergrund der Untersuchungen. Kritisch beim Salz ist, dass es bei relativ hohen Temperaturen erstarrt (ca.

200-250°C) und beim anschließenden Erwärmen nicht wieder in den flüssigen Zustand gebracht werden kann. Bei einem längeren Stillstand des Erhitzers muss daher sichergestellt werden, dass dieser fast restlos entleert werden kann. Dazu wurde der Erhitzer schief gestellt. Durch eine Schiefstellung des Erhitzers befindet sich der Eintrittsstutzen an der tiefsten Stelle, so dass im Falle des Entleerungsvorganges das noch flüssige, warme Salz aus dem Erhitzer abgelassen werden kann. Damit verbleibt nur ein sehr geringer Rest in dem Erhitzer, welcher beim erneuten Befüllen mit flüssigem Salz „aufschmilzt“.

Unterarbeitspaket 2.3. „Aufbau“

Nach der Konstruktion wurde der elektrische Durchlauferhitzer für Flüssigsalz gebaut und an das DLR geliefert. Die Umsetzung erfolgte auf der Grundlage des oben abgebildeten 3D-Modells (Abbildung 1).

Hochverdichtete U-förmig gebogene CSN® Rohrheizkörper und Patronen wurden in den Flansch eingeschweißt und mit zylindrischem Behälter mechanisch fest verbunden. Die Rohrheizkörper besitzen aufgrund des eingesetzten patentierten Giso-Verfahrens sehr hohe Isolationsfestigkeit. Zu Forschungszwecken wurden im Durchlauferhitzer verschiedene Rohrheizkörper-Durchmesser vorgesehen.

Die Kühlstrecke zwischen dem Flansch und dem Anschlussraum ist so gewählt, dass die Komponenten im Anschlussraum nicht überhitzt werden können. Der elektrische Anschlussraum erfüllt die Schutzart IP 65.

Die Herstellung des Durchlauferhitzers erfolgte entsprechend den Maßgaben der Richtlinie 2014/68/EU (97/23/EG) (Druckgeräterichtlinie).

Der entwickelte Durchlauferhitzer wird zur Erwärmung von flüssigem Salz eingesetzt. Das Salz wird unter Druck, im Durchfluss durch den Erhitzer von der Eintritts-Temperatur (525 °C) auf die erforderliche Austritts-Temperatur (560 °C) erwärmt. Dabei erfolgt im Erhitzer ein Wärmeübergang von den elektrischen Heizelementen auf das zu erhitzende Medium (Salz). Für den Normalbetrieb des Durchlauferhitzers wird eine Leistung von 360 kW benötigt.

Das folgende Bild zeigt den Durchlauferhitzer eingebaut in der DLR-Anlage (Abbildung 2).

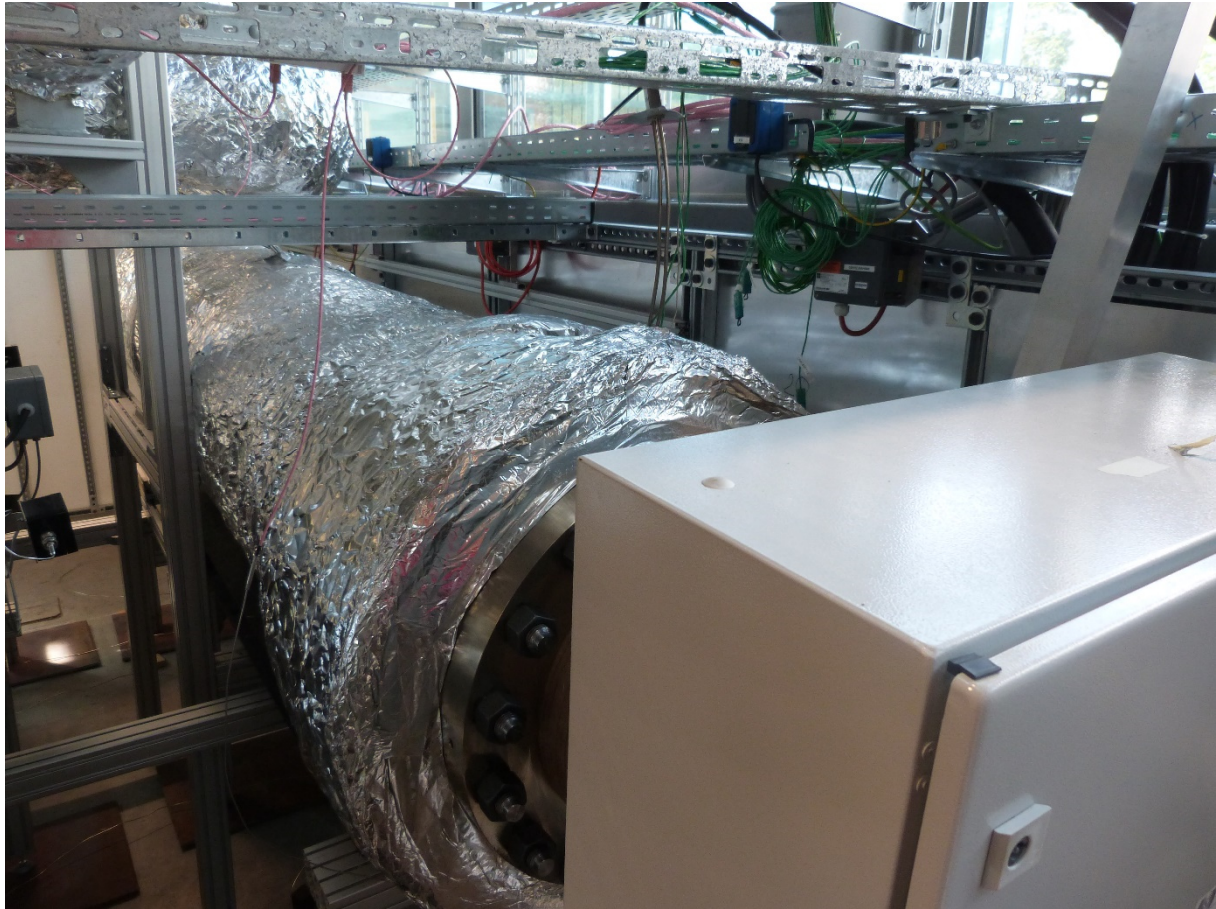


Abbildung 2: Durchlauferhitzer für Flüssigsalz der Firma Schniewindt

Im weiteren Verlauf des Projektes wurde die Steuerung für den Durchlauferhitzer fertigungs-technisch umgesetzt und in der TESIS-Anlage integriert.

Für die Durchführung der Messungen wurden im Durchlauferhitzer mehrere Thermoelemente als Temperaturfühler platziert. Im Durchlauferhitzer und seiner Steuerung wurden darüber hinaus sechs verschiedene Heizstufen realisiert mit dem Ziel, unterschiedliche Heizkörper-Durchmesser und -Materialien testen zu können.

Der gesamte Schaltschrank wurde in drei Bereiche unterteilt. Im linken Schrank ist der Einspeiseschalter untergebracht. Im mittleren Teil befinden sich die Thyristoren, Sicherungen, Fehlerstromschutzschalter sowie die Abgänge zur Heizung. Im rechten Schrank wurden die eigentliche Steuerung und Regelung eingebaut. Alle Anschlüsse für Zuleitungen wurden entsprechend der Anforderungen in der TESIS-Anlage auf dem Schaltschrank angebracht.

In der Abbildung 3 ist der Schaltschrank der Firma Schniewindt in der TESIS-Anlage dargestellt.



Abbildung 3: Schaltschrank mit der Steuerung für den Durchlauferhitzer der Firma Schniewindt (Foto)

Die untere Tabelle fasst die relevanten technischen Parameter der Steuerung zusammen.

| Haupt-Parameter des Durchlauferhitzers für Flüssigsalz | |
|---|----------------------|
| Gesamtleistung | 360 kW |
| Anschlussspannung | 400 V 3~ |
| Frequenz | 50 Hz |
| Schutzart | IP 54 |
| Gesamt-Abmessungen Schaltschrank mit Sockel B x H x T | 2000 x 2100 x 600 mm |
| Temperaturbereich Umgebung | + 10 °C bis +35°C |
| Gewicht | 610 kg |

Unterarbeitspaket 2.4. „Test“

Nach der Inbetriebnahme der Steuerung wurde der elektrische Durchlauferhitzer den zyklierenden Tests in der TESIS-Anlage unterzogen. Schniewindt unterstützte DLR bei der Durchführung der Tests in TESIS:com.

Auf der Grundlage der Vorauswertung der Versuchsdaten wurden einzelne Anpassungen an den Parametern des Erhitzers vorgenommen. Es erfolgte auch eine Optimierung des Heizers im Hinblick auf die Regelung der Leistung während des Heizbetriebs. Die Tests dauerten ca. 6 Monate und wurden im Dezember 2023 abgeschlossen.

Unterarbeitspaket 2.5. „Auswertung und Rückbau“

Nach dem Abschluss der Versuche in der TESIS-Anlage wurde der elektrische Durchlauferhitzer in diesem Unterarbeitspaket aus der TESIS-Anlage ausgebaut und nach Neuenrade transportiert.

Die Auswertung und Aufbereitung der Versuchsdaten wurden durch DLR vorgenommen. Anschließend wurden die Messergebnisse hinsichtlich kritischer Erhitzeraspekte mit dem Projektteam bei Schniewindt diskutiert.

Unterarbeitspaket 2.6. „Untersuchung der Heizer auf Degradation und Schäden“

In der Endphase des Projektes konzentrierte sich Schniewindt auf die anschließende Untersuchung des elektrischen Durchlauferhitzers im Hinblick auf:

- Korrosion
- Überhitzung
- sonstige Schädigung, v. a. durch thermische Spannungen (stationär und instationär)

An dem ausgebauten Erhitzer wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- ⇒ Zur Überprüfung der thermischen Schädigungen an den Heizelementen wurde der Isolationswiderstand mit 1000V DC an den verbauten Rohrheizkörpern und Patronen gemessen. Der gemessene Wert an allen Isolationswiderständen war größer als 3 GOhm. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Heizelemente keine Löcher oder Risse aufweisen.
- ⇒ Zur Überprüfung der Oberflächenstruktur sowie zur Charakterisierung der Elementzusammensetzung des Heizrohrs und des Heizdrahtes wurde eine Probe eines Heizelements mittels REM (Rasterelektronenmikroskop) untersucht.

Für diese Untersuchung wurden die Proben einzelner Heizelemente wie folgt präpariert:

- Querschliff poliert auf 1 μm
- Pt Schicht von 7 nm
- Silberlack gegen Aufladung

Im Ergebnis weist keine Probe deutliche Auffälligkeiten auf.

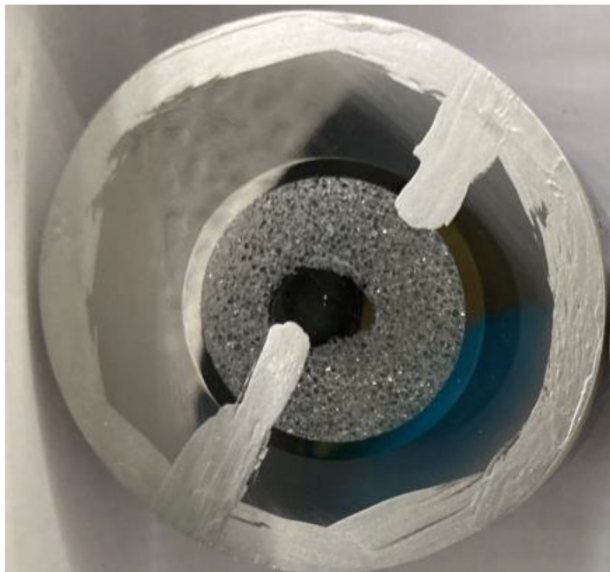


Abbildung 4: Präparierte Probe 1.4571_10 16 A

Nach dem Abschluss der Untersuchungen wurden die Ergebnisse aller Proben ausgewertet und analysiert. Die Proben des Materials 1.4571 sind in Bezug auf Oxid-Schicht (Dicke, Anzahl der Risse) miteinander vergleichbar.

Auch bei der Nickelbasislegierung bildet sich über den kompletten Umfang des Heizelements eine Oxid-Schicht aus. Typisch für Nickelbasislegierung ist die Oxid-Schicht dünner ($< 5 \mu\text{m}$) als bei den Heizelementen mit Edelmantel. Mit Ausnahme der Schichtdicke, zeigen Edelstahl und Nickelbasislegierung kaum Unterschiede.

Bezogen auf alle untersuchten Heizelemente können die Ergebnisse der Untersuchungen mittels REM-Spektroskopie wie folgt zusammengefasst werden:

- Alle untersuchten Proben weisen eine Oxid-Schicht auf, die in ihrer Qualität weitgehend unabhängig von der axialen Position und dem verwendeten Mantelmaterial ist.
- Die Proben unterscheiden sich lediglich in der Dicke der Oxid-Schicht, dies ist allerdings für die verwendeten Mantelmaterialien typisch.

-
- Es ist nicht möglich abzuschätzen, ob die Oxid-Schicht ständig abgetragen wird oder langzeitstabil ist.
 - Die Bildung der horizontalen Risse ist wahrscheinlich bedingt durch das wiederholte Aufheizen und Abkühlen der Heizelemente im Rahmen der E-Heat-Versuche.
 - Es wurden insgesamt über 5000 Heizzyklen in E-Heat durchgeführt, was einer Einsatzzeit von ca. 14 Jahren entspricht. Heizelemente wurden somit hinsichtlich der thermischen Zyklen stark belastet.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen wurden in den Konstruktionsrichtlinien für die Auslegung der Flüssigsalz-Elektroheizer berücksichtigt. Insgesamt belegen die Untersuchungsergebnisse eine gute Eignung der verwendeten Heizelemente bei Erhitzern für Flüssigsalz-Anwendungen.

2. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Durch die experimentellen Untersuchungen wurden die Auswirkungen für die Temperaturverteilung und Strömungsführung relevanter Parameter (Strömungsleitmaßnahmen, Anordnung der Heizelemente, Geometrie des Übergangsbereichs, Gehäuseerwärmung durch Strahlung und Werkstoffauswahl, Auslegung des Erhitzers) bestimmt. Auf Basis der Messungen wurde ein Vergleich der Messergebnisse mit den Berechnungen des gegenwärtigen Berechnungsmodells durchgeführt. Auf Grundlage der Ergebnisse wurde dann das eindimensionale Berechnungsmodell für die Auslegung der Erhitzer für den Anwendungsbereich bei der Flüssigsalzerwärmung erweitert und angepasst. Aufgrund der positiven Projektergebnisse soll der Flüssigsalz-Erhitzen zur Marktreife weiterentwickelt werden und am Markt angeboten werden. Der elektrische Durchlauferhitzer wird als Komponente in den Wärmespeicherkraftwerken eingesetzt.

3. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens und an anderen Stellen

Das Thema Power-to-Heat unter Verwendung von Salzschnmelzen ist Gegenstand aktueller internationaler Forschung.

In mehreren Ländern wurden hierzu bereits relevante Veröffentlichungen publiziert. Besonders hervorzuheben ist eine kürzlich erschienene Studie der Königlich Technischen Hochschule (KTH), in der aktuelle Messdaten eines 5-MW-Elektroheizers für Salzschnmelzen vorgestellt werden (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890425006557>). Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Studie zitiert.

„Diese Veröffentlichung liefert wertvolle Erkenntnisse zur praktischen Umsetzung großskaliger elektrischer Beheizungssysteme im Kontext thermischer Energiespeicherung. Flexibel einsetzbare Power-to-Heat-Systeme mit thermischer Energiespeicherung gelten als Schlüsseltechnologien zur Dekarbonisierung industrieller Prozesse.

Diese Studie analysiert die thermische und dynamische Leistungsfähigkeit einer Megawatt-Pilotanlage, die elektrische Beheizung mittels geschmolzener Salze mit thermischer Energiespeicherung kombiniert, um bei Bedarf Prozessdampf bereitzustellen.

Untersucht werden Betriebsdaten unter nahezu idealen sowie abweichenden Betriebsbedingungen. Die dynamische Leistungsfähigkeit des elektrischen Heizsystems wird anhand von Zeitkonstanten und Anlaufwirkungsgraden detailliert bewertet. Die Ergebnisse belegen die Fähigkeit der Anlage, bedarfsgerecht und zuverlässig Wärme bereitzustellen und gleichzeitig zur Netzflexibilität beizutragen.

Unter nahezu idealen Betriebsbedingungen konnten thermische Wirkungsgrade von über 94 % erzielt werden. In Stillstandsphasen wurden Wärmeverluste von etwa 0,5 °C/h im Kalttank und 2,3 °C/h im Heißtank gemessen. Diese Verluste sind auf die geringe Größe der Pilotanlage zurückzuführen und dürften bei großtechnischer Umsetzung aufgrund des günstigeren Volumen-Oberflächen-Verhältnisses deutlich geringer ausfallen.

Die Anlage demonstriert zudem die Fähigkeit, den elektrischen Leistungsbedarf innerhalb von fünf Sekunden von 0 auf 5 MW-el zu steigern, was ihr Potenzial für Anwendungen in der Frequenzregulierung unterstreicht. Die elektrische Heizeinheit weist thermische Zeitkonstanten unter 500 s sowie einen thermischen Wirkungsgrad von 80 % auf.

Insgesamt liefert diese Arbeit eine fundierte Leistungsbewertung für Power-to-Heat-Systeme auf Basis geschmolzener Salze, bestätigt deren Potenzial für industrielle Dekarbonisierungsstrategien und zeigt konkrete Optimierungspotenziale für den großskaligen Einsatz auf.“

4. Erfolge und geplante Publikationen

Erfolgte Patentschriften

Aus dem Projekt sind bei Schniewindt keine neuen Patentanmeldungen entstanden.

Erfolgte Journal- und Konferenzbeiträge (Vorträge sowie Poster)

Während der Laufzeit des Projektes fand seitens Schniewindt ein regelmäßiger Erfahrungsaustausch in wissenschaftlichen und industriellen Netzwerken statt. Es sind bislang keine Journal- und Konferenzbeiträge veröffentlicht worden.

Geplante Publikationen

Zukünftig sind Veröffentlichungen in sozialen Medien sowie im Rahmen von Fachmessen und -konferenzen geplant.