ZINQ Technologie GmbH

Smart-Power-to-Heat: Studie zur netzdienlichen Nutzung der Erzeugung von Prozesswärme durch hybride Wärmezufuhr

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: AZ 39527 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Von

ZINQ Technologie GmbH

in Zusammenarbeit mit

Fraunhofer UMSICHT e.V.
ESFORIN SE

Januar 2025

Danksagung

Wir danken herzlich unseren Projektpartnern, Fraunhofer UMSICHT e.V. und ESFORIN SE, für die konstruktive Zusammenarbeit und ihre wertvollen Beiträge zu dieser Studie. Ihr Fachwissen und Engagement haben maßgeblich zum Erfolg des Projekts beigetragen.

Unser besonderer Dank gilt zudem der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die finanzielle Unterstützung. Ohne diese Förderung wäre die Durchführung der Studie in dieser Form nicht möglich gewesen.

Diese Publikation ist das Ergebnis gemeinsamer Anstrengungen, und wir wissen die Unterstützung aller Beteiligten sehr zu schätzen.

1.Inhaltsverzeichnis

1.	**Inhaltsverzeichnis**	**3**
2.	**Executive Summary**	**4**
3.	**Ausgangslage und Projektbeschreibung**	**5**
4.	**Zusammenfassung der Studienergebnisse**	**9**
5.	**Einordnung in die Gesamtaufgabenstellung der Energiewende und abzuleitende ordnungspolitische Lösungsansätze**	**13**
6.	**Fazit**	**15**
7.	**Hauptteil: Potenzialanalyse Wärmebatterie – Fraunhofer UMSICHT**	**16**
8.	**Glossar**	**74**
9.	**Literaturverzeichnis**	**76**
10.	**Anhang**	**77**

2. Executive Summary

- Die Energiewende erfordert volks- und betriebswirtschaftlich optimale Konzepte.
- Schnell und kostengünstig umsetzbare 80%-Lösungen sind teuren und langwierigen 100%-Ansätzen vorzuziehen.
- Nutzung von grünem Überschussstrom zur Erzeugung industrieller Prozesswärme durch Energieträgerkopplung in hybriden Wärmeerzeugern ermöglicht schnelle und kostengünstige Umsetzung wesentlicher Energiewendeziele.
- Smart-Power-To-Heat-Anwendungen (SP2H) müssen im Sinne des § 13 K EnWG als Entlastungsanlagen an jedem Standort in Deutschland genehmigt und betrieben werden können.
- In der deutschen Prozessindustrie gibt es ein kurzfristig erschließbares Potenzial von 40 GW zur Erzeugung von jährlich 115 TWh Prozesswärme aus grünem Überschussstrom, was einem Anteil von 29% des bisherigen fossilen Prozesswärmebedarfs entspricht.
- Mit diesem Konzept können nahezu die gesamten Stromüberschussmengen der für 2030 angestrebten Grünstromerzeugung kurzfristig, kostengünstig und systemdienlich für die Erzeugung von Prozesswärme genutzt werden.
- Durch die Substitution fossiler Energieträger würden CO2-Emissionen von ca. 30 Mio. t vermieden, was 40% des bis 2030 im Industriesektor zu erreichenden Minderungsziels entspricht.
- Die Umrüstung auf Smart-Power-To-Heat (SP2H-) Technologie beeinträchtigt nicht die optimalen Prozess- und Produktionsabläufe sowie die Wirtschaftlichkeit der adressierten Industrien.
- Die Nutzung grüner Überschussstrommengen in hybriden Beheizungssystemen ist zu 100% systemdienlich.
- Das Konzept „Nutzung statt Abregelung“ ist 4–5-mal preisgünstiger als die Zwischenspeicherung entsprechender Strommengen in Batterien.
- Zur erfolgreichen Mobilisierung der Potenziale muss sichergestellt werden, dass die intensivere Nutzung des Stromnetzes keine Erhöhung der Netzanschluss- und Netznutzungskosten zur Folge hat.
- Für die Umsetzung des SP2H-Konzeptes werden keine kritischen Rohstoffe benötigt, und die eingesetzten Materialien sind zu 100% recyclingfähig.

3.Ausgangslage und Projektbeschreibung

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz 2023 (EEG 2023) markiert einen zentralen Meilenstein der deutschen Energiepolitik und bildet die Grundlage für das angestrebte Ziel der Klimaneutralität bis zum Jahr 2045. Ziel ist es, den Anteil erneuerbarer Energien (EE) am Bruttostromverbrauch bis 2030 auf mindestens 80 % zu steigern, was einem Umfang von 600 TWh bei einem prognostizierten Strombedarf von 750 TWh entspricht [1][2].

Mit dem zunehmenden Anteil fluktuierender EE wächst der Bedarf an Flexibilitätsoptionen zur Stabilisierung des Stromsystems [3]. Die Plattform Klimaneutrales Stromsystem (PKNS) betont in ihrem Bericht die Notwendigkeit steuerbarer, flexibel reagierender Erzeugungskapazitäten [4].

Die Differenz zwischen der im Wesentlichen unelastischen Stromnachfrage und der variablen Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen wird als Residuallast bezeichnet. Um dieser Herausforderung zu begegnen, bedarf es komplexer Zusammenspiele verschiedener Elemente, wie etwa flexibler Erzeugungsanlagen, Speichertechnologien sowie Kopplungen über die Sektoren hinweg (Strom, Wärme, Verkehr) [5].

Residuallastverlauf 2030

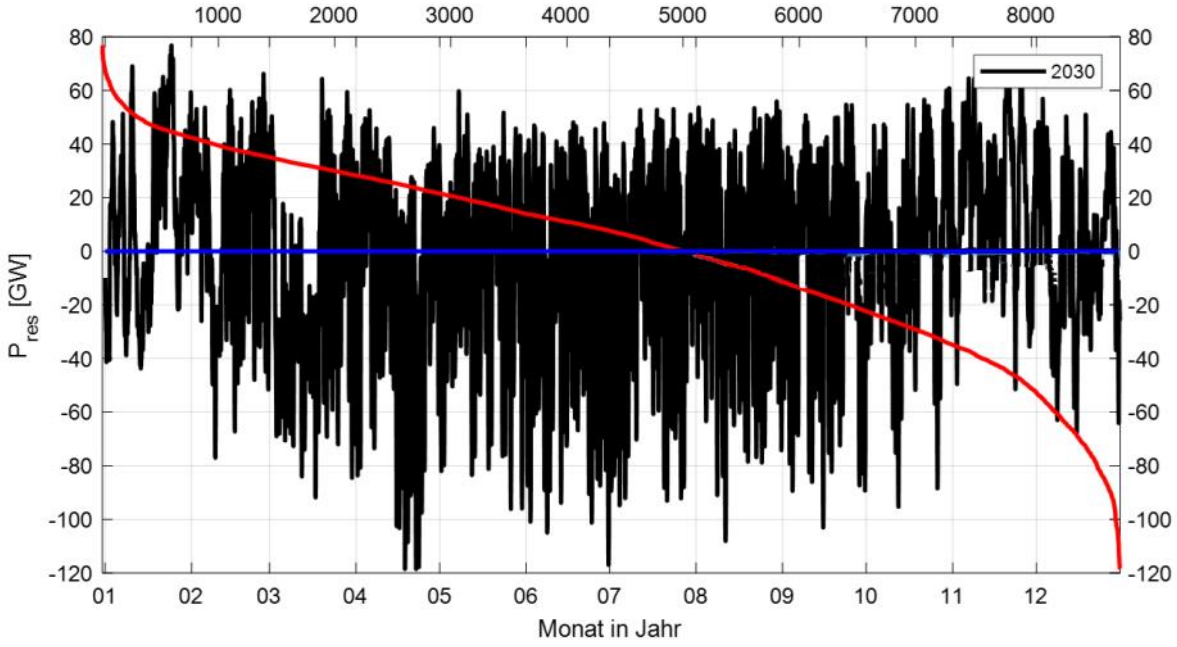


Abbildung 1 Simulierter Residuallastverlauf für 2030 (EE-Ausbau gemäß KoaV 2021) [1]

Residuallastverlauf in schwarz, zusätzlich (blau) jahresbilanzielle Residualabweichung (= 0), (rot) Jahresganglinie der Einspeiseleistung

Die Abbildung 1 veranschaulicht den simulierten Residuallastverlauf für das Jahr 2030, basierend auf den Zielen, die im Koalitionsvertrag von 2021 definiert wurden. Obwohl ein Anteil von 80 % (600 TWh) durch erneuerbare Energien (EE) gedeckt wird, resultieren aufgrund der hohen Volatilität der Erzeugerflotten temporäre Überschuss- und Unterdeckungsmengen von jeweils etwa 120 TWh (im Jahr 2045 waren es 406 TWh).

Überschüsse treten hauptsächlich tagsüber und im Sommer auf, während in den Wintermonaten und Nachtstunden ein Defizit zu erwarten ist [6]. Die Nutzung der Überschussmengen kann durch direkte Speicherung oder im Rahmen der Sektorenkopplung zur Dekarbonisierung anderer Sektoren erfolgen.

Speichertechnologien

Für die direkte Speicherung kommen Pumpspeicherkraftwerke in Betracht, deren Bau jedoch geografisch begrenzt und kostenintensiv ist. Alternativ kann der Überschussstrom zur Erzeugung von Wasserstoff genutzt werden, der wiederum – mit einem Kreislaufwirkungsgrad von unter 30 % – als Energieträger für Gasturbinen dient [7]. Batteriespeichersysteme bieten höhere Wirkungsgrade (>90 %), jedoch sind deren Einsatz eingeschränkt aufgrund hoher Kosten, Ressourcenbedarfe und ökologischer Herausforderungen (z. B. begrenzte Lebensdauer, Degradation, fehlende End-of-Life-Konzepte).

Gemäß der ISE-Studie wird bis zum Jahr 2030 ein Bedarf von etwa 104 GWh an stationären Batteriespeichern für die Netzstabilität prognostiziert, was Investitionen in Höhe von 50 bis 90 Milliarden Euro erfordert [8]. Diese Kapazitäten erweisen sich jedoch als unzulänglich, um jahreszeitlich bedingte Schwankungen oder sogenannte Dunkelflauten, für die Speichervolumen im zweistelligen TWh-Bereich notwendig wären, auszugleichen.

Hybridisierung der Prozesswärme

Ein bislang wenig berücksichtigtes Flexibilisierungspotenzial stellt die Hybridisierung der Prozesswärme dar. Ihr Anteil am deutschen Gesamtenergiebedarf beträgt 19 % und liegt bei 440 TWh/a. Derzeit wird dieser Bedarf zu 317 TWh/a aus fossilen Energieträgern, vornehmlich Erdgas (ca. 200 TWh/a), gedeckt **[9]**.

Projektansatz

In industriellen Prozessen, insbesondere in der Verzinkungsindustrie, finden Ofensysteme Anwendung, die mit Erdgas, Wasserstoff, Gasgemischen oder Strom (induktive oder Widerstandsheizung) betrieben werden. Semi-hybride Systeme, bei denen mehrere Energieträger kombiniert werden, sind ebenfalls bekannt, jedoch erfolgt die Beheizung bislang hauptsächlich mit Erdgas. Im Notfall kann jedoch auf Strom zurückgegriffen werden, um die Schmelze zu stabilisieren und Schäden zu vermeiden. Eine parallele Nutzung unterschiedlicher Energieträger wurde bisher jedoch nicht realisiert.

Ein neuer Ansatz ist das von ZINQ geplante "**Smart Power to Heat**"-Konzept ("SP2H"), das für die bivalente Erzeugung von Prozesswärme in der Metallindustrie entwickelt wurde. Hierbei werden kontinuierlich betriebene Metallschmelzanlagen, die Gas (Erdgas oder künftig grüner Wasserstoff) als Primärenergieträger in der Grundlast nutzen, durch eine strombasierte Beheizung ergänzt. Diese kann flexiblen Überschussstrom verwenden, um Prozesswärme bereitzustellen und Überschussstrom zusätzlich in einer sogenannten "**Superheat**"-Phase der Metallschmelze zwischenzuspeichern ("**Monodirektionale Wärmebatterie**"). Die Voraussetzung für den bivalenten Einsatz von Energieträgern ist der infrastrukturelle Anschluss an entsprechend ausgelegte Gas- (Wasserstoff-) und Stromnetze.

Die Anwendung dieses SP2H-Verfahrens und sein Nutzen sowohl für den Anwender als auch die Energieversorgung werden im Folgenden am Beispiel der energieintensiven Stückverzinkungsindustrie skizziert:

In Deutschland werden ca. 150 Feuerverzinkungsanlagen mit insgesamt 36.300 t flüssiger Zinkschmelze betrieben. Die Zinkschmelzen (in langen Stahlwannen, sogenannten Zinkkesseln)

werden mittels erdgasbetriebener Öfen kontinuierlich (24/7) betrieben, größtenteils in einem Temperaturbereich von 440-460°C [11], zu einem geringen Prozentsatz (Hochtemperaturverzinkung) auch bei 530-560°C. Sowohl das niedrigere als auch das höhere Temperaturniveau können technisch auch mittels elektrischer Beheizung realisiert werden.

Aktuell sind elektrisch beheizte Öfen, deren Marktanteil weniger als 5 % beträgt, lediglich in Skandinavien (mit Strom aus Wasserkraft) und Frankreich (mit Strom aus Kernkraft) im Einsatz.

Die Investitionskosten für eine flexible Hybridisierung einer Feuerverzinkungsanlage belaufen sich auf ca. 80.000 €/Kesselmeter (ohne Netzanschlusskosten). Bei 150 Anlagen und einem Gesamtpotenzial von 1.300 Kesselmeter ergibt sich ein Investitionsbedarf von etwa 120 Millionen Euro. Bei einem durchschnittlichen Energieverbrauch von 750 MWh/Kesselmeter/a [12] ergibt sich ein Potenzial für die Flexibilisierung des Stromversorgungssystems von ca. 115 MW (1.000.000 MWh/a / 8760 h/a). Diese Leistung kann bei Stromüberschuss durch die Umschaltung von Gas- auf Strombeheizung abgerufen werden.

Unter der Annahme, dass im Szenario 2030 etwa 3.700 Stunden pro Jahr eine Netzüberspeisung von 115 MW für den Betrieb der Zinkkessel besteht, ergibt sich ein signifikanter Mehrwert. Eine sinnvolle und systemdienliche Nutzung der Netzüberspeisung ist in Deutschland gegeben. Die Speicherkapazität der "monodirektionalen Wärmebatterie" beträgt im Jahr 2030 ca. 425 GWh (115 MW x 3.700 h).

Projektziel

Das Projekt

„Studie zur netzdienlichen Nutzung der Erzeugung von Prozesswärme durch hybride Wärmezufuhr“

hat zum Ziel, die Möglichkeit, das Potential und die notwendigen Rahmenbedingungen der „monodirektionalen Wärmebatterie“

a) als spezielle Form einer ‚Power-to-Heat-Sektorenkopplung‘ (***Smart Power to Heat - SP2H***)
b) als Ergänzung bzw. Alternative zu bidirektionalen Stromspeichern

in ihrem system- und netzdienlichen Nutzen für die Optimierung, Stabilisierung und Flexibilisierung des Stromversorgungssystems in Deutschland und damit für eine kostengünstige und erfolgreiche Umsetzung der Energiewende in Deutschland zu untersuchen und aufzuzeigen - insbesondere unter Berücksichtigung von ökologischen, ökonomischen und ressourcenschonenden Gesichtspunkten.

Der beabsichtigte Technologievergleich fokussiert die Nutzenstiftung des SP2H-Verfahrens im Strombereich. Die gezielte Nutzung von Überschussstrom trägt zur Systemstabilisierung bei und hilft, Schiefstände der Systembilanzkreise auszugleichen. Zudem kann die Technologie systemdienlich als Ausgleichsenergie von Netzbetreibern eingesetzt werden. Sie vermeidet Netzengpässe und damit verbundene Redispatch-Maßnahmen sowie Netzausbaukosten. Diese Wirkung ist vergleichbar mit Li-Ionen-Batterien und anderen Stromspeichertechnologien, jedoch wird die eingesetzte elektrische Energie in Prozesswärme umgewandelt.

Fraunhofer UMSICHT analysiert und vergleicht die technischen und ökonomischen Aspekte des SP2H-Konzepts. Das ökonomische Potenzial wird dabei im Vergleich zum bisherigen Einsatz von Erdgas betrachtet. Eine Umstellung auf Strombetrieb erfolgt, wenn Stromwärme kostengünstiger als Erdgas ist. Dafür werden Auktionsergebnisse zur Sekundärregelleistung sowie die Kostenvorteile am Strommarkt (day-ahead, intraday) berücksichtigt. Perspektivisch wird auch der Vergleich zu grünem Wasserstoff als Entscheidungsgrundlage herangezogen.

Branchenübergreifendes Skalierungspotenzial

Ein wesentliches Untersuchungsziel neben einer qualifizierten Ermittlung der technisch-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen einer Umsetzung in der Feuerverzinkungsindustrie ist die Abschätzung, inwieweit die Ergebnisse des Einsatzes der ‘SP2H‘-Konzeptes auf das Gesamtpotential der erdgasbasierten Prozesswärme in Deutschland übertragen werden können.

Das grundsätzlich adressierbare Potenzial für Prozesswärmeerzeugung aus Überschussstrom liegt in der Größenordnung von ca. 134 TWh (317 TWh Prozesswärmebedarf aus fossilen Quellen x 3700/8760h). Details und Einschränkungen einer proportionalen Übertragbarkeit des Ansatzes sind Inhalt der beabsichtigten Studie.

Projektbeteiligte

ZINQ Technologie GmbH
Projektführung - Anlagenbetreiber - Prozess-Knowhow-Geber

Fraunhofer Umsicht e.V. (Unterauftragnehmer)
Durchführung einer techno-ökonomischen Charakterisierung und Potenzialanalyse der hybriden Wärmeversorgung in der Feuerverzinkung

ESFORIN SE (Unterauftragnehmer)
Vermarktungsstrategien – CO2-Vermeidungspotenziale – Marktanbindung - Betriebsstrategien

ZVO (Zentralverband Oberflächentechnik)
potenzieller Anwendungspartner

4. Zusammenfassung der Studienergebnisse

Grundsätzlicher Vergleich monovalenter versus bivalent-hybrider Nutzung von Überschussstrom zur Erzeugung von Prozesswärme

Die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende in Deutschland ist essenziell abhängig davon, dass den volatilen Erzeugungsprofilen der Erneuerbaren Erzeuger ein entsprechend flexibles Verbrauchsprofil gegenübergestellt wird. Zunehmend große Erzeugungsspitzen müssen im Sinne von ‚***Nutzen statt Abregeln***' kostengünstig, schnell und großskalig einer sinnvollen Nutzung zugeführt werden. Eine einfache Elektrifizierung bisher mit fossilen Energieträgern betriebener industrieller Prozesse wird diesem Ziel nicht gerecht, da sie nicht oder zumindest nicht zu betriebswirtschaftlich tragbaren Bedingungen auf die Angebotsvolatilität der schwankenden Erzeugung angepasst werden können. Auch die Zwischenspeicherung von aktuell nicht benötigten Überschussstrommengen in Batterien ist unter wirtschaftlichen Bedingungen nicht zielführend.

Der mit vorliegender Studie untersuchte und dokumentierte Ansatz, große Teile der bisher fossil betriebenen Prozesswärmeerzeugung durch Energieträgerkopplung und hybrid ausgelegter Wärmeerzeugung sowohl mit Strom als auch mit Erdgas bzw. Wasserstoff zu betreiben, erfüllt die oben formulierten Randbedingungen sowohl in Bezug auf die Größenordnung des Nutzungspotenzials, der Klimaschutzziele für die Industrie, die erforderliche Umsetzungsgeschwindigkeit, der Ressourcen- als auch ökonomischen Effizienz.

Die bisher verfolgte eindimensionale, im Sinne von ‚All Electric Industry' ausschließlich auf Elektrifizierung basierende Umstellung der heute idR. Erdgas-basierten Prozesswärmeerzeugung erfordert eine dem volatilen Stromangebot entsprechende Flexibilisierung des mit Wärme zu versorgenden Produktionsprozesses.

Dies führt zu

- kostentreibender Teilauslastung der Produktionsanlage
- Effizienzeinbußen im Prozess
- Qualitätsverlusten im Produkt
- komplexen Rückwirkungen auf verkettete Prozesse
- herausfordernden Personaleinsatzplanungen.

All diese negativen Begleiterscheinungen werden durch eine Hybridisierung der Prozesswärme-erzeugung vermieden. Bei einer Hybridisierung mittels Energieträgerkopplung kann der verfahrenstechnische Prozess unbeeinflusst von der nur zeitweise gegebenen Verfügbarkeit des nutzbringend einzusetzenden Überschussstroms betrieben werden.

Da in Zeiträumen, in denen eine Nutzung von Strom nicht opportun ist, jederzeit und uneingeschränkt der alternative Energieträger Gas, später grüner Wasserstoff einspringen kann, kommt es durch die Energieträgerkopplung mit einem jederzeit verfügbaren alternativen Energieträger in der Prozesswärmeerzeugung nicht zu einer Beeinträchtigung bestehender, nach technisch-/wirtschaftlichen Kriterien optimierter Prozess- und Produktionsabläufe.

Die Nutzung von Strom im hybrid ausgelegten Prozesswärmeerzeuger kann somit frei nach systemdienlichen Kriterien gesteuert werden. Hierbei führt die ausschließliche Nutzung von grünem Überschussstrom – nach Marktpreissignalen und/oder Beiträgen zur Bereitstellung von Sekundär-/Minutenreserve an die ÜNB – unmittelbar zu einer Minderung des CO_2-Fußabdrucks. Dies ermöglicht eine frühzeitige Teildekarbonisierung des Prozesses bereits im Übergang von Erdgas zu Wasserstoff, wodurch die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien konsequent genutzt und gleichzeitig der Weg zu einer nachhaltigen Prozesswärmeerzeugung geebnet wird.

Mit der Anwendung eines Smart-Power-to-Heat (SP2H)-Konzeptes wird das Energiewendeziel ‚Nutzen statt Abregeln' somit bestmöglich erfüllt.

Vorbemerkung:

Der nachstehende Vergleich findet unter der Grundannahme statt, dass die Verwendung von grünem Überschussstrom im Prozesswärmesegment gleichwertig ist zur Verwendung im Stromsegment.

Verglichen werden

*Nutzung im Prozesswärmesektor mittels Smart Power to Heat System = Prozesswärmeerzeugung in einem hybriden System unter Nutzung einer Energieträgerkopplung (Strom/Gas/H2) mit Speicherfunktion (‘**Monodirektionale Wärmebatterie**‘)*

versus

Nutzung im Stromsystem durch Einspeicherung der Überschuss-Strommenge in Batterien und Ausspeicherung dieser Strommengen in Stromknappheitsphasen zurück ins Stromsystem

Die Gegenüberstellung des beispielhaften SP2H-Systems (Szenario S3) in Gelsenkirchen und einer konventionellen Stromspeicherung verdeutlicht die wirtschaftlichen und technischen Unterschiede beider Ansätze zur Nutzung von Überschussstrom:

Im Referenzbeispiel eines hybridisierten Zinkschmelzofens mit Wärmespeicher (Leistung: 6 MW, Energiespeichergröße: 20 MWh, jährliche Stromnutzung: 9.240 MWh) zeigt sich:

Das SP2H-Verfahren erfordert eine Investitionssumme von 2,35 Millionen Euro und erreicht mit einem thermischen Wirkungsgrad von 81 % bezogen auf das Jahresspeichervolumen spezifische Investitionskosten von 314 €/kWh.

Ein konventioneller Stromspeicher hingegen benötigt für die gleiche Jahresstrommenge von 9.240 MWh eine Investition von 12 Millionen Euro. Trotz eines höheren elektrischen Wirkungsgrads von 90 % betragen die spezifischen Investitionskosten 1.443 €/kWh.

Auf nationaler Ebene (Szenario S4, mit Annahmen[1]) wird das Potenzial der SP2H-Technologie besonders deutlich: Bis zu 40.000 MW Leistung und 127 Millionen MWh Energie könnten kurzfristig genutzt werden. Eine vergleichbare Strom-zu-Strom-Nutzung erfordert hingegen teure und rohstoffintensive Batteriespeicher mit erheblich höheren Investitionen.

Die sinnvolle Nutzung von Überschussstrommengen (‚Nutzen statt Abregeln‘) durch Energieträgerkopplung in einem hybrid ausgestalteten Prozesswärmesystem ist bezogen auf dieses Anwendungsbeispiel um den Faktor **4,6** günstiger als die ‚Rettung‘ der gleichen Strommengen im Stromsystem,

oder anders ausgedrückt:

Mit dem gleichen Investitionsaufwand kann im Vergleich zur Speicherung im Stromsystem die **4,6-fache** Menge an Überschussstrom durch das SP2H-Verfahren systemdienlich in Prozesswärme umgewandelt werden.

[1] Prozesswärmebedarf 2021: 480 TWh/a davon Fossil: 394 TWh/a; Elektrifizierungspotential im Mittel: 148 TWh/a, davon nutzbar: 77,8 % in S3; siehe „Potenzialanalyse Wärmebatterie“ Fraunhofer UMSICHT nachfolgend

Deutschlandweite Mobilisierungspotenziale für den Einsatz des SP2H-Konzeptes im Sinne von '*Nutzen statt Abregeln*'

a) Skalierung auf die Feuerverzinkungsindustrie in Deutschland (basierend auf Szenario S3)

Nutzbare Leistungsspitzen:	bis **222 MW**
Nutzbare (Überschuss-)Energiemengen:	bis **760.000 MWh**
CO2-Vermeidung:	bis **152.500 t/a**

b) Skalierung auf die gesamte Prozesswärmeerzeugung in Deutschland (basierend auf Szenario S3)

Nutzbare Leistungsspitzen:	bis **40.000 MW**
Nutzbare (Überschuss-)Energiemengen:	bis **115.000.000 MWh**
CO2-Vermeidung:	bis **30 Mio. t/a**

Betriebswirtschaftliche Rahmenbedingungen zur Umsetzung des SP2H-Verfahrens

Basierend auf Szenario S3 (Pilotanlage mit 6 MW Abnahmeleistung und 20 MWh Hochtemperaturspeicherkapazität) ergeben sich unter Annahme konstanter Erlöse aus dem Ersatz von Erdgas durch kostengünstigen Überschussstrom folgende Amortisierungszeiträume der zu tätigende Investition:

Ohne Berücksichtigung steigender Netzkosten:	5,7 Jahre
Mit Berücksichtigung erhöhter Netzkosten (ohne BKZ!):	7,4 Jahre

Diese Refinanzierungszeiträume sind mit Blick auf die aktuell fehlenden Planungshorizonte ohne staatliche Unterstützung nicht darstellbar. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass derartige Investitionen im Energiesektor typischerweise langfristig betrachtet werden müssen.

Insbesondere muss durch entsprechende Anpassung der Netzentgeltregelung sichergestellt werden, dass eine höhere Netzauslastung aufgrund systemdienlicher Stromentnahmen keine Erhöhung der Netzkosten (weder BKZ noch Netznutzungskosten) zur Folge hat.

Volkswirtschaftliche Vorteile einer teilweisen Substitution systemdienlich notwendiger Batteriespeicher durch monodirektionale Wärmebatterien

Wie diese Studie zeigt, können durch die Deutschland-weite Hybridisierung der für das SP2H-Verfahren zugänglichen Prozesswärmeerzeuger ca. 148 TWh an Prozesswärmebedarf für eine Teilhybridisierung erschlossen werden. Hieraus resultiert ein über ca. 7.500 VBh konstanter Leistungsbedarf von 20 GW. Durch Überbauung dieses Bedarfs um den Faktor 2 zur intensivierten Nutzung der Überschuss-Einspeisefenster können bis zu 40 GW an Leistung aus der Stromerzeugung für die Bereitstellung von Prozesswärme genutzt werden. Ergänzt um Hochtemperaturspeicher mit einem Kapazitätsfaktor von 0,3 (3,3MWh/MW) ergibt sich hieraus eine nutzbare Energiespeicherkapazität von 133 GWh. Die Nutzung dieses Konzeptes unter Einbindung eines

Wärmespeichers erlaubt es, ca.115 TWh (78% des bisher durch fossile Energieträger gedeckten Energiebedarfs von 148 TWh) durch die Nutzung von Überschussstrom zu substituieren.

Ein Vergleich der jeweiligen mittleren Investitionskosten der hierfür eingesetzten monodirektionalen Wärmebatterie einerseits und eines Batteriespeichers andererseits ergibt folgende Ergebnisse für vergleichbare Systemdienstleistungsbeiträge im Sinne von Nutzen statt Abregeln.

Nutzung statt Abregeln von 115 TWh Überschussstrom	Speicherkapazität	spez. Kosten	absolute Kosten
SP2H zur Prozesswärmedeckung	133 GWh	118 €/kWh	**15,7 Mrd. €**
Batterien als Zwischenspeicher	133 GWh	540 €/kWh	**63,5 Mrd. €**

5. Einordnung in die Gesamtaufgabenstellung der Energiewende und abzuleitende ordnungspolitische Lösungsansätze

Aufgabenstellung

Wie kann die Energiewende vor dem Hintergrund des energiewirtschaftlichen Dreiecks (Versorgungssicherheit, wettbewerbsfähige Energiepreise und Klimaschutz) und unter den Bedingungen des auf Wind und Solar ausgerichteten Stromerzeugungssystems in Deutschland gelingen, so dass in der Transformation zu CO2-neutral erzeugtem Strom vor allem die ökonomische Effizienz des Gesamtsystems optimiert wird und damit eine Perspektive für die nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit der energieintensiven Industrie in Deutschland entwickelt werden kann?

Generell

1. Für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende müssen volks- und betriebswirtschaftlich optimale Konzepte zur Anwendung kommen.

2. Schnell und kostengünstig umsetzbare 80%-Lösungen sind teuren und langwierigen 100%-Ansätzen vorzuziehen.

Ableitungen aus der vorliegenden DBU-Studie

3. Die Nutzung von grünem Überschussstrom zur Erzeugung industrieller Prozesswärme mittels Energieträgerkopplung in hybrid ausgelegten Wärmeerzeugern ermöglicht eine schnelle und kostengünstige Umsetzung wesentlicher Energiewendeziele.

4. Die auf diesem Konzept fußenden Smart-Power-To-Heat-Anwendungen (SP2H) sind als Entlastungsanlagen im Sinne des § 13 K EnWG anzuerkennen und sollten an jedem Standort in Deutschland als solche betrieben werden dürfen.

5. In der deutschen Prozessindustrie steht ein kurzfristig erschließbares Leistungspotenzial von 40.000 MW zur Erzeugung von jährlich 115 TWh an Prozesswärme aus grünem Überschussstrom zur Verfügung. Das ist ein Anteil von ca. **29%** des gesamten, bisher fossil erzeugten Prozesswärmebedarfs von jährlich ca. 394 TWh. Stromseitig können durch dieses Konzept ca. **19%** der für 2030 angestrebten weitestgehend volatilen Grünstromerzeugung von 600 TWh und damit der allergrößte Anteil (> 90%) der für 2030 erwarteten Stromüberschussmengen systemdienlich für die Erzeugung von Prozesswärme eingesetzt werden.

6. Durch die mit diesem Stromeinsatz verbundene Substitution entsprechender Mengen an fossilen Energieträgern würden CO2-Emissionen in Höhe von ca. 30 Mio. t vermieden werden. Das sind **40%** des gemäß Klimaschutzgesetz im Industriesektor noch bis 2030 zu erreichenden Minderungsziels von 75 Mio. t.

7. Die optimalen Prozess- und Produktionsabläufe und die damit verbundene Wirtschaftlichkeit der adressierten Industrien werden durch diese Umrüstung auf Smart-Power-To-Heat (SP2H-) Technologie nicht beeinträchtigt, da eine durch Energievolatilität erzwungene Fremdsteuerung der Produktionsprozesse nicht zu befürchten ist.

8. Die Nutzung der grünen Überschussstrommengen in hybriden, auf Energieträgerkopplung basierenden Beheizungssystemen ist zu 100% systemdienlich.

9. Dieses Konzept einer ‚Nutzung statt Abregelung' ist um den Faktor 4-5 preisgünstiger als die Zwischenspeicherung entsprechender Strommengen in Batterien.

10.Zur erfolgreichen Mobilisierung der vorstehend aufgezeigten Potenziale muss allerdings sichergestellt werden, dass die mit der Hybridisierung bestehender Prozesswärmeerzeuger verbundene intensivere Nutzung des Stromnetzes keine Erhöhung der Netzanschluss- und -Netznutzungskosten zur Folge hat.

11.Für die Umsetzung des SP2H-Konzeptes werden keine kritischen Rohstoffe benötigt. Zudem sind die eingesetzten Materialien unter Nutzung etablierter Verfahren zu 100% recyclingfähig.

6.Fazit

Die vorliegende Studie kommt zu dem Schluss, dass eine rein monovalente Elektrifizierung der Prozesswärmeerzeugung mit einer Reihe von betrieblichen Herausforderungen verbunden ist. Dazu zählen Produktionsineffizienzen, erhöhte Kosten und Qualitätsverluste. Eine monovalente Umstellung auf eine vollständig elektrifizierte Prozesswärmeversorgung erfordert eine Flexibilisierung der Produktionsprozesse, die sich stark an die volatile Verfügbarkeit von Überschussstrom anpassen muss. Dies kann zu einer teuren Teilauslastung der Anlagen, Effizienzeinbußen und weiteren betrieblichen Problemen führen, wie etwa der Notwendigkeit einer komplexen Personaleinsatzplanung und möglichen Rückwirkungen auf verkettete Produktionsprozesse.

Demgegenüber stellt eine Hybridisierung der Prozesswärmeerzeugung durch Energieträgerkopplung (Strom/Gas/Wasserstoff) eine flexible, wirtschaftlich tragfähige und effizientere Alternative dar. Diese Lösung ermöglicht die Aufrechterhaltung des Prozessbetriebs unabhängig von der Verfügbarkeit von Überschussstrom. In Zeiten suboptimaler Stromverfügbarkeit kann auf alternative Energieträger wie Gas oder grünen Wasserstoff zurückgegriffen werden, ohne die bestehenden Produktionsprozesse zu beeinträchtigen. Die Nutzung von grünem Überschussstrom kann so systemdienlich gesteuert werden, wobei die CO2-Emissionen signifikant reduziert und ein schneller Übergang von fossilen Brennstoffen hin zu erneuerbaren Energien ermöglicht wird. Ein besonderer Vorteil dieser Strategie liegt in der Möglichkeit einer frühen Teildekabonisierung des Prozesses im Übergang von Erdgas zu grünem Wasserstoff.

Ein technischer und wirtschaftlicher Vergleich zwischen der Nutzung von Überschussstrom im Prozesswärmesektor durch das Smart Power-to-Heat (SP2H)-Verfahren und der Speicherung in Batteriespeichern zeigt, dass SP2H eine deutlich kostengünstigere Lösung darstellt. Die Investitionskosten pro kWh für das SP2H-Verfahren sind um den Faktor 4,6 niedriger als die spezifischen Investitionskosten für Batteriespeicher. Obwohl Batteriespeicher einen höheren elektrischen Wirkungsgrad aufweisen, sind ihre begrenzte Lebensdauer und die Notwendigkeit der Nutzung kritischer Rohstoffe, die ökologische und geopolitische Herausforderungen mit sich bringen, signifikante Nachteile. Das SP2H-Verfahren hingegen ermöglicht eine flexible und systemdienliche Integration von Überschussstrom in industrielle Prozesse und trägt somit zur effizienten Nutzung von überschüssigem grünen Strom bei.

Die Analyse der Skalierung der SP2H-Technologie auf die Feuerverzinkungsindustrie in Deutschland zeigt ein erhebliches Potenzial: Bis zu 760.000 MWh Überschussstrom könnten genutzt und eine CO2-Einsparung von bis zu 152.500 Tonnen pro Jahr erzielt werden. Auf gesamtindustrieller Ebene könnten durch SP2H sogar bis zu 115 Millionen MWh an Überschussstrom genutzt und jährlich 30 Millionen Tonnen CO_2 eingespart werden. Diese Zahlen verdeutlichen das immense Dekarbonisierungspotenzial der Technologie, insbesondere in der Übergangsphase, in der grüner Wasserstoff zunehmend verfügbar wird. Die Anwendung dieser Technologie leistet nicht nur einen Beitrag zur Reduktion des CO_2-Ausstoßes, sondern auch zur effizienten und nachhaltigen Nutzung von erneuerbaren Energien.

Die wirtschaftliche Umsetzung des SP2H-Verfahrens erfordert jedoch geeignete regulatorische Rahmenbedingungen, wobei insbesondere eine Anpassung der Netzentgeltregelung zu berücksichtigen ist. Diese Anpassung ist notwendig, um zu verhindern, dass eine höhere Netzauslastung durch systemdienliche Stromentnahmen zu einer Erhöhung der Netzkosten führt. Ohne staatliche Unterstützung sind die erforderlichen Investitionen und die damit verbundenen Amortisierungszeiträume wirtschaftlich schwer darstellbar. Die Studie betont in diesem Zusammenhang die Notwendigkeit gezielter politischer Maßnahmen, die eine effiziente und systemdienliche Nutzung von Überschussstrom im industriellen Bereich fördern und die Umstellung auf nachhaltige Energien im Produktionsprozess langfristig ermöglichen.

7. Hauptteil: Potenzialanalyse Wärmebatterie – Fraunhofer UMSICHT

Die Ergebnisse der Untersuchung wurden unter Einbindung der Beiträge von ESFORIN SE und ZINQ GmbH durch das Fraunhofer Umsicht in Form der nachfolgenden Präsentation dokumentiert:

Fraunhofer UMSICHT

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

Potenzialanalyse Wärmebatterie | ZINQ GmbH & Co. KG

Smart-Power-to-Heat: Netzdienliche Bereitstellung von Prozesswärme in der Industrie durch hybride Wärmebereitstellung

06.02.2024

Dr.-Ing. Markus Hadam

Anlass und Ziel der Studie

Systemdienliche Prozesswärmebereitstellung durch Hybridisierung von Schmelzprozessen

Hintergrund

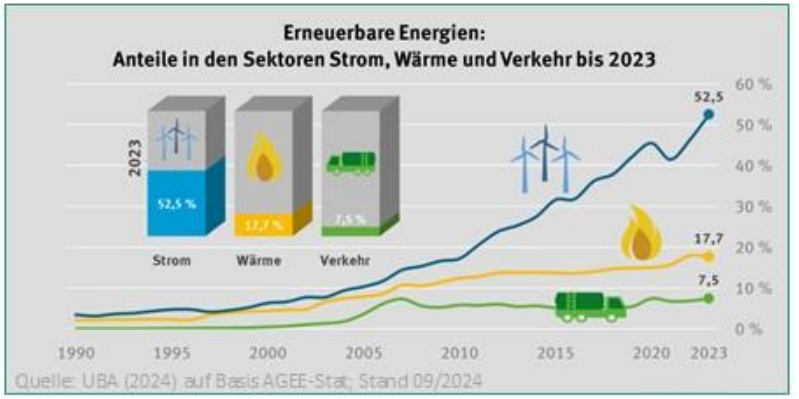
- Zunehmende fluktuierende Stromerzeugung aus PV und WEA
- Häufigere Perioden mit Stromüberschuss (negative Residuallast)
- Wahrscheinlichkeit von Netzinstabilitäten nimmt zu
- Geringer Anteil von erneuerbaren Energien im Wärme-Sektor

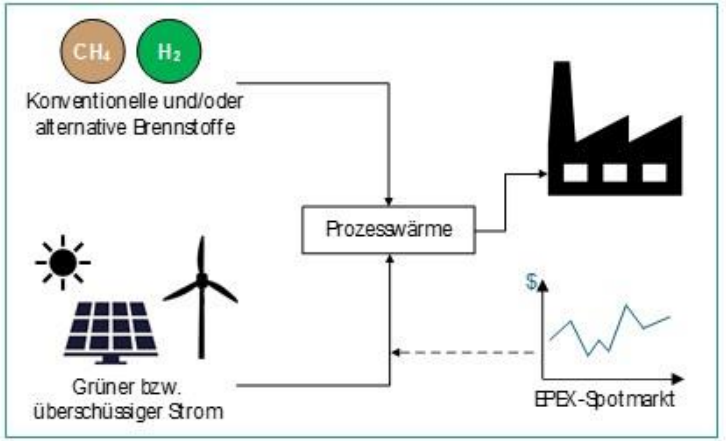
Untersuchungsgegenstand

- Systemdienliche Bereitstellung von Prozesswärme durch Hybridisierung industrieller Schmelzprozesse am Beispiel der Feuerverzinkung
- Spotmarktgeführte strom- und gasbasierte Prozesswärmebereitstellung

Ziel der Studie

- Potenzialanalyse zur Systemdienlichkeit, CO_2-Einsparung und Wirtschaftlichkeit eines hybrid beheizten Schmelzofens sowie Gegenüberstellung mit Strom-zu-Strom-Technologien
- Ableitung von erforderlichen Rahmenbedingungen
- Skalierung der Ergebnisse auf Feuerverzinkungsanlagen in Deutschland
- Abschätzung des Gesamtpotenzials der industriellen Prozesswärmeerzeugung





© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

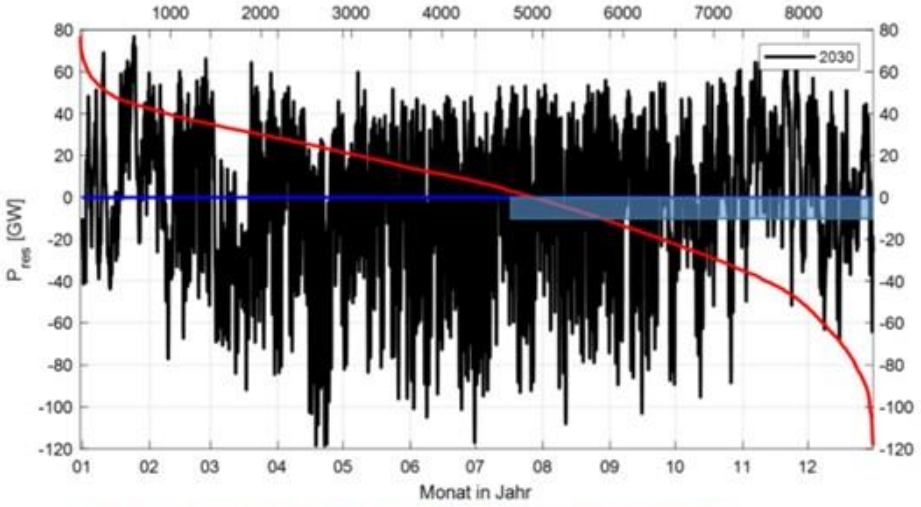
Ausgangssituation

Zunehmender Bedarf an Flexibilitätsoptionen aufgrund steigender und positiver Residuallasten

Hintergrund: Ausbau von EE bis 2030

- Die installierte Leistung der Erneuerbaren Energien (EE) in Deutschland soll gemäß Koalitionsvertrag von 190 GW (Stand 2024) auf 356 GW bis zum Jahr 2030 ausgebaut werden
- Dies entspricht einer Erzeugung von ca. 586 TWh/a (80 % der Stromerzeugung im Jahr 2030)
- Unter der Annahme eines unveränderten Strombedarfs (Stand 2019)* führt die fluktuierende Erzeugung der EE sowohl zu Überschuss- als auch Unterdeckungsmengen von ca. 120 TWh (negative bzw. positive Residuallast)

*Quelle: VDE (2021) - Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung und Entwicklung der Residuallast



Quelle: VDE (2021) - Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung und Entwicklung der Residuallast

Lösungsansatz: Flexibilitätsoptionen

- Die zunehmende Diskrepanz zwischen Stromerzeugung und -bedarf erfordert das Zusammenspiel verschiedener Flexibilitätsoptionen:
  - Speichertechnologien
  - Sektorenkopplung
  - Flexible Erzeugungsanlagen (Elektrolyseure)
  - Flexible Strom- und Wärmeverbraucher

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Arbeitspakete

Übersicht der definierten Arbeitspakte

Aufgabenstellung: systemdienliche Erzeugung von Prozesswärme durch hybride Wärmebereitstellung

- Untersuchung der Hybridisierung von Feuerverzinkungsanlagen und des Potenzials zum systemdienlichen Betrieb
- Vergleich zu anderen systemdienlichen Technologien zur Nutzung von Überschussstrom
- Skalierung des Potenzials auf Feuerverzinkungsanlagen sowie auf weitere Prozesswärmeverbraucher in Deutschland

Arbeitspaket 1: Erstellung von Technologiesteckbriefen systemdienlicher Technologien

- Hybridisierung der Prozesswärme mit den Varianten Erdgas/Strom, Erdgas/CCS/Strom und Wasserstoff/Strom
- Erzeugung von Wasserstoff (Elektrolyse) und anschließende Verbrennung
- Erzeugung, Speicherung (Druckspeicher) und Rückverstromung (Brennstoffzelle) von Wasserstoff
- Lithium-Ionen-Batterien
- Carnot-Batterie (Umwandlung elektrischer Energie in thermische Energie, Speicherung in Wärmespeicher und anschließende Rückverstromung)

Arbeitspaket 2: Exergetischer Technologievergleich

- Exergetische Gegenüberstellung der systemdienlichen Technologieoptionen

Arbeitspaket 3: Vergleich der Kosteneffizienz

- Ökonomische Gegenüberstellung der systemdienlichen Technologieoptionen

Arbeitspaket 4: Skalierung der Ergebnisse

- Skalierung der Hybridisierung für die Feuerverzinkungsindustrie in Deutschland sowie in weiteren geeigneten Branchen und Prozessen

© Fraunhofer UMSICHT

Fraunhofer UMSICHT

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

Arbeitspaket 1: Technologiesteckbriefe

© Fraunhofer UMSICHT

Arbeitspaket 1 | Technologiesteckbriefe

Vorwort und Anmerkungen

Vorwort

- Unter Hybridisierung wird die Fähigkeit eines Produktionsprozesses verstanden, flexibel zwischen verschiedenen Energiequellen wechseln zu können
- In der vorliegenden Studie wird angenommen, dass Prozesswärme bivalent mit überschüssiger elektrischer Energie aus dem Stromnetz und mit Erdgas bzw. Wasserstoff bereitgestellt werden kann
- Dazu soll ein bestehender gasbefeuerter Wärmeverbraucher mit einem strombasierten Wärmeverfahren gleicher Wärmeleistung nachgerüstet werden
- Durch die Hybridisierung kann flexibel auf Preissignale der Energieträger reagiert werden, ohne die Produktion zu beeinflussen
- Damit kann ein systemdienlicher Netzbetrieb gewährleistet werden („Nutzen statt Abregeln“)
- Entsprechend dem Fokus der vorliegenden Studie werden nachfolgend lediglich die spezifischen Daten der Lithium-Batterien und Power-to-Heat-Technologien mit Wärmespeicher dargestellt. Die Daten der weiteren betrachteten netzdienlichen Technologien können dem Angang entnommen werden

Anmerkung zur Gegenüberstellung

- Basis der Hybridisierung bilden strombasierte Wärmeverfahren bzw. Power-to-Heat-Anwendungen, die, falls möglich, in einem bestehenden Produktionsprozess nachgerüstet werden
- Aus diesem Grund werden bei der Gegenüberstellung spezifische Kennzahlen von Power-to-Heat-Anwendungen stellvertretend für die Hybridisierung in den Vergleich einbezogen

© Fraunhofer UMSICHT

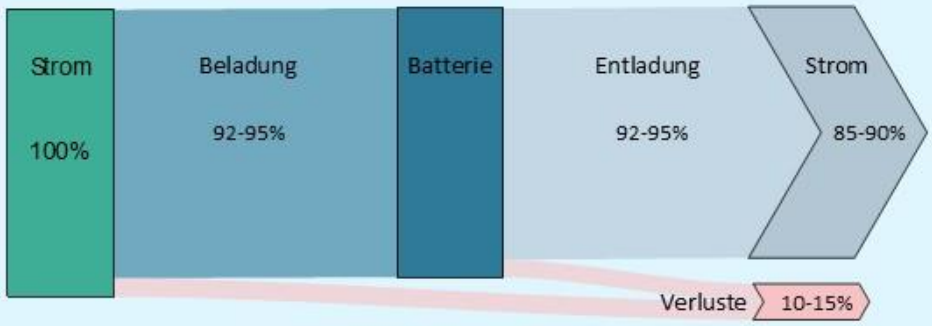
Arbeitspaket 1 | Technologiesteckbriefe

Lithium-Ionen-Batterie (Strom-zu-Strom-Speicher)

Kurzbeschreibung

- Chemischer Energiespeicher mit hoher Effizienz, Energiedichte und Flexibilität
- Anwendung: tragbare Geräte, Mobilität aber auch stationäre Energiespeicherung

Sankey-Diagramm



Kennzahlen

Parameter	Wert
Leistung in MW	< 100
Kapazität in MWh	< 1.000
Entladungszeit in h	0,5–10
Reaktionszeit in sec/min	< sec
Wirkungsgrad in %	85–90
Selbstentladung in %/24h	0,1–0,3
kal. Lebensdauer in a	8–20
zykl. Lebensdauer	2–10k
TRL	9
Investitionskosten in €/kW	500–2.000
Investitionskosten in €/kWh	300–800

Quellen: Bergholz (2015), Vetter (2018), ADB (2018), Figgener (2020), EASE (2022), Viswanathan (2022), EnTEC (2023)

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

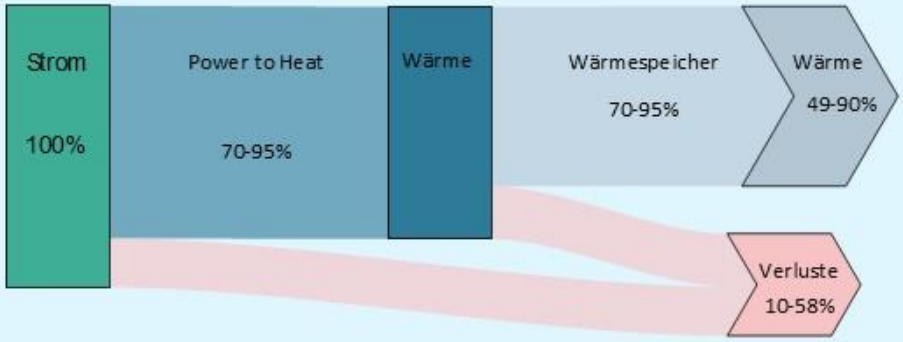
Arbeitspaket 1 | Technologiesteckbriefe

Elektrische Prozesswärmebereitstellung mit Zwischenspeicherung in einem Wärmespeicher

Kurzbeschreibung

- Bereitstellung von Prozesswärme unter dem Einsatz von elektrischer Energie mit anschließender Speicherung in einem Wärmespeicher
- Je nach Prozesswärmeverfahren und Temperaturniveau kommen unterschiedlichste PtH- und Speichertechnologien zum Einsatz
- Anwendung: Wohnsektor, industrielle Prozesswärme, Integration EE

Sankey-Diagramm



Kennzahlen

Parameter	Wert
Leistung in MW	0,1–200
Kapazität in MWh	-
Entladungszeit in h	-
Reaktionszeit in sec/min	sec
Wirkungsgrad in %	49–90
Selbstentladung in %/24h	-
kal. Lebensdauer in a	10–30
zykl. Lebensdauer	-
TRL	6–9
Kosten in €/kW	80–700
Kosten in €/kWh	10-150

Quellen: Miró (2016), DLR (2018), Irena (2020), Luckywell 2023

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Fraunhofer UMSICHT

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

Arbeitspakete 2–3: Gegenüberstellung von Effizienz und spezifischen Kosten unterschiedlicher systemdienlicher Technologien

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Arbeitspakete 2–3 | Gegenüberstellung von Effizienz und Kosten

Anmerkungen zur Gegenüberstellung unterschiedlicher systemdienlicher Technologien

Anmerkungen

- In der Literatur angegebenen Wirkungsgrade und spez. Kosten je Technologie unterscheiden sich sehr stark voneinander
- Die entsprechenden Kennzahlen sind zudem von der jeweiligen Ausführungsform, Auslegung und Betriebscharakteristik abhängig
- Die Gegenüberstellung der hier betrachteten Technologen muss aufgrund der unterschiedlichen Anwendungsbereiche (Strom-zu-Strom, Power-to-Heat, Power-to-Gas) mit Vorsicht betrachtet werden, sie gibt jedoch eine Übersicht der jeweils zu erwartenden Wirkungsgradkette sowie der spezifischen Kosten unterschiedlicher systemdienlicher Technologien

Ziel der Gegenüberstellung

- Allgemeine Übersicht von ausgewählten systemdienlichen Technologien, welche überschüssigen Strom nutzen können
- Fokus liegt auf Technologien, die zur Sektorenkopplung – d. h. zur Erzeugung von Prozesswärme – zur Verfügung stehen
- Aufzeigen der zukünftigen Bedeutung smarter* Power-to-Heat-Anwendungen

* smart = hybride Systeme mit Energieträgerkopplung

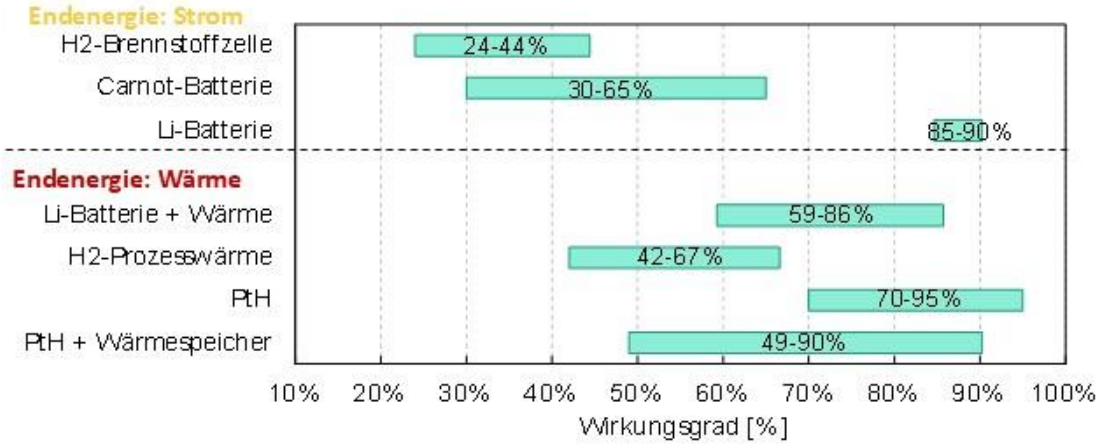
© Fraunhofer UMSICHT

Arbeitspakete 2–3 | Gegenüberstellung von Effizienz und Kosten

Wirkungsgrade sind stark von Typ, Auslegung und Betriebscharakteristik abhängig

Gegenüberstellung systemdienlicher Technologien

- Wasserstoffpfade und Carnot-Batterien weisen aufgrund hoher Umwandlungsverluste geringe bis moderate Gesamtwirkungsgrade auf
- Lithium-Batterien und PtH-Anwendungen erreichen demgegenüber hohe Wirkungsgrade
- Hohe Wirkungsgradketten insbesondere in der Sektorenkopplung reduzieren den zukünftigen Primärenergiebedarf in Deutschland sowie den Bedarf an erneuerbaren Energien bzw. importieren Strom/H_2



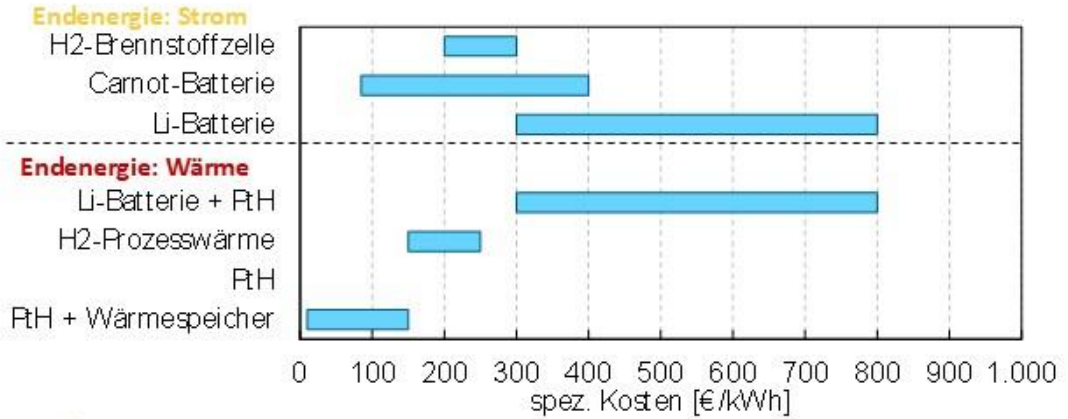
© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

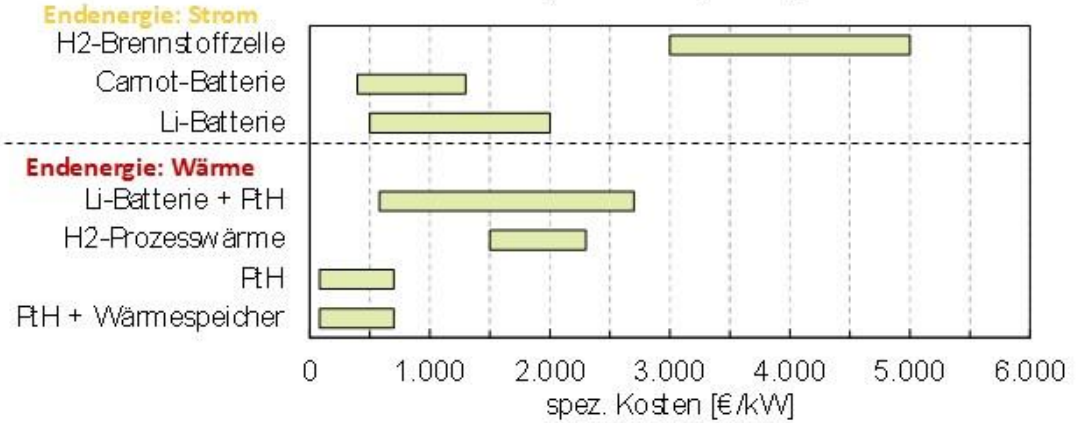
Arbeitspakete 2–3 | Gegenüberstellung von Effizienz und Kosten

Spez. Kosten sind stark von Typ, Auslegung und Betriebscharakteristik abhängig

Gegenüberstellung systemdienlicher Technologien

- Lithium-Batterien weisen niedrige leistungsspezifische, jedoch hohe energiespezifische CAPEX auf → Gute Eignung für Kurzzeitspeicherung
- Wasserstofftechnologien und Carnot-Batterien verfügen über niedrigere energiespezifische Kosten → Gute Eignung für Mittel- bis Langzeitspeicherung
- PtH-Anwendungen verfügen über niedrige spez. Leistungsbezogene CAPEX, da diese i. d. R. technisch einfach realisierbar sind
  - Kopplung mit Wärmespeichern bietet insbesondere bei Integration erneuerbarer Energien und für systemdienlichen Betrieb einen deutlichen Mehrwert
  - Wärmespeicher weisen vergleichsweise geringe energiespezifische CAPEX auf





© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Arbeitspakete 1–3 | Zusammenfassung der Gegenüberstellung

Übersicht von Vor- und Nachteilen sowie Anwendungen der betrachteten systemdienlichen Technologien

Technologie	Vorteile	Nachteile	Anwendung
Lithium-Ionen	• Hohe Energiedichte • Schnelle Reaktionszeiten • Hoher Wirkungsgrad • Viele Anwendungen (mobil und stationär)	• Begrenzte Lebensdauer • Kurzzeitspeicher • Sicherheitsrisiken (Brandgefahr)	• Netzstabilisierung • Mobilität • Regelleistungsmarkt • Spotmarkt
Carnot-Batterie	• Je Ausführung geringe CAPEX • „Einfache“ Technologie • Hohe Lebensdauer • Auskopplung von Wärme möglich	• Noch in der Entwicklungsphase • Moderater Wirkungsgrad	• Mittelfristige Energiespeicherung • Netzstabilisierung • Flexibilisierung von Prozessen • Sektorenkopplung
H_2-Erzeugung + Prozesswärme	• Langzeitspeicherung möglich • Nutzung bestehender Gasinfrastruktur	• Moderater Gesamtwirkungsgrad • Hohe spez. Energieträgerkosten	• Langzeitspeicherung (saisonal) • Sektorenkopplung
H_2-Erzeugung + Brennstoffzelle	• Langzeitspeicherung • Flexibel einsetzbar (stationär und mobil)	• Geringer Gesamtwirkungsgrad • Hohe spez. Energieträgerkosten	• Sektorenkopplung • Schwerlastverkehr • Stationäre Anwendung
Power-to-Heat bzw. Hybridisierung	• Geringe CAPEX • Hybridisierung erlaubt flexiblen Einsatz verschiedener Energieträger ohne Beeinträchtigung von Produktionsabläufen • Hoher Wirkungsgrad • Speicher nicht zwingend notwendig	• Höhere Anfangsinvestition ggü. konventioneller Systeme • Geringere Volllaststunden jedes Teilsystems zur Wärmeerzeugung • Hohe Netzentgeltkosten (BKZ + Nutzung) → Regulatorische Anpassung erforderlich	• Sektorenkopplung • Industrieprozesse mit kontinuierlichem Wärmebedarf • Spotmarkt • Regeleistungsmarkt

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Fraunhofer UMSICHT

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

Elektrifizierung und Hybridisierung | Grundlagen

 © Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Fraunhofer UMSICHT

Elektrifizierungstechnologien

Übersicht zu strombasierten Wärmetechnologien zur Prozesswärmebereitstellung

Strombasierte Wärmetechnologien

- Strombasierte Wärmetechnologien werden bereits in einer Vielzahl von Industrieanwendungen eingesetzt (i. d. R. TRL 7–9)
- Wirkungsgrade sind stark von der zu ersetzenden konventionellen Wärmetechnologie und der Art der Integration (Neubau oder Umrüstung) abhängig
- Für Verzinkungsöfen eignen sich vor allem Induktions- oder Widerstandsheizungen

< 100 °C	100–400 °C	400–1.000 °C	> 1.000 °C	Anwendung	Wirkungsgrad	Quelle
Kompressionswärmepumpen				Heißwasser, ND-Dampf, Trocknung Raumheizung, Kühlung	COP 2–5	1,11
Brüdenverdichtung				Wärmerückgewinnung, Dampfaufwertung	COP 3–10	1
Elektrodenkessel				Heißwasser, Dampf, Thermoöl	0,95–0,99	1–4, 11
Infrarotstrahler				Trocknung, Kunststoffbehandlung Lebensmittelverarbeitung	0,7–0,9	3
Induktionsöfen				Schmelzen, Glühen, Schweißen von Metallen	0,7–0,9	1–3
Widerstandsofen				Metall- und Glasschmelzen Brennen von Keramik	0,7–0,95	1–3,5,6
Elektro Hybridstrahlrohr				Hybride Alternative zu Strahlrohr	In Entwicklung	1,17

In Anlehnung an Madeddu (2020) - The CO_2 reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Hybridstrahlrohr

Bivalent betriebenes Strahlrohr

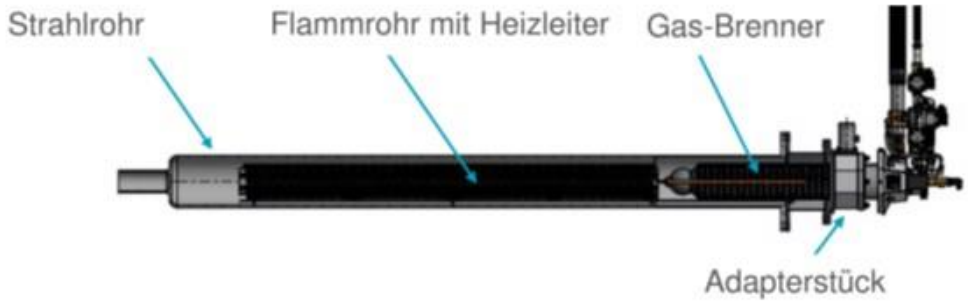
Merkmale

- Mantelstrahlrohr mit Reku-Brenner und innenliegender Heizwendel
- Brenner und Heizleiter für vergleichbare Heizleistung ausgelegt
- Leistung elektrische Beheizung: 46 kW
- Leistung gasbasierte Beheizung: 30–50 kW
- Feuerungstechnischer Wirkungsgrad: 83–85

Integration in Verzinkungsöfen

- Derzeit werden Verzinkungsöfen vorzugsweise über Flachflammenbrenner beheizt
- Ein direkter Austausch dieser Brenner mit dem Hybridstrahlrohr ist in diesem Fall nicht möglich
- Integration erfordert neuen Ofen bzw. hohen Umrüstaufwand

➢ Die Hybridisierung durch Widerstandselemente stellt voraussichtlich die geeignetere Alternative dar



Technisch nicht in jedem Anwendungsfall realisierbar!

Quelle: DBU-Abschlussbericht-AZ-34825_01-Hauptbericht.pdf

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Fraunhofer
UMSICHT

Fraunhofer-Institut für Umwelt-,
Sicherheits- und Energietechnik
UMSICHT

Hybridisierung von Zinköfen

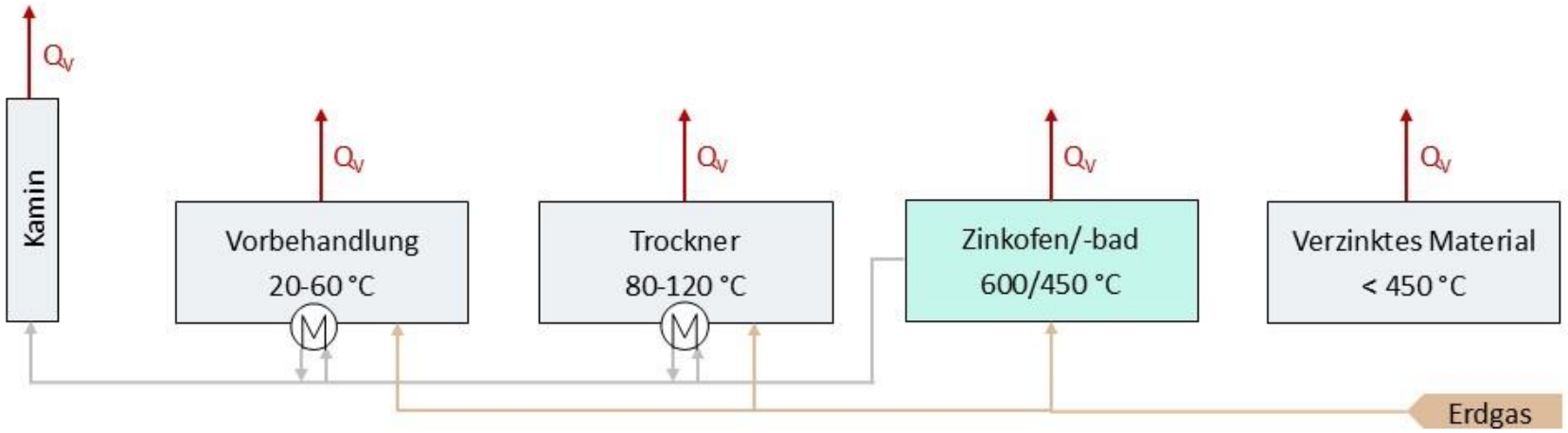
© Fraunhofer UMSICHT

Smart-Power-to-Heat-Konzept (SP2H) | IST-Zustand

Vereinfachtes Fließschema der Prozesswärmebereitstellung von Feuerverzinkungsanlagen

Status quo der Prozesswärmebereistellung in Feuerverzinkungsanlagen - monovalente Nutzung von Erdgas

- Ein Großteil der Feuerverzinkungsanlagen setzt Erdgas zur Prozesswärmebereitstellung ein
- Hauptwärmeverbraucher stellt der Zinkofen mit einem Anteil von bis zu 90 % dar
- Die Abgasabwärme des Zinkofens wird in der Regel zur Beheizung des Trockners und der Vorbehandlung genutzt



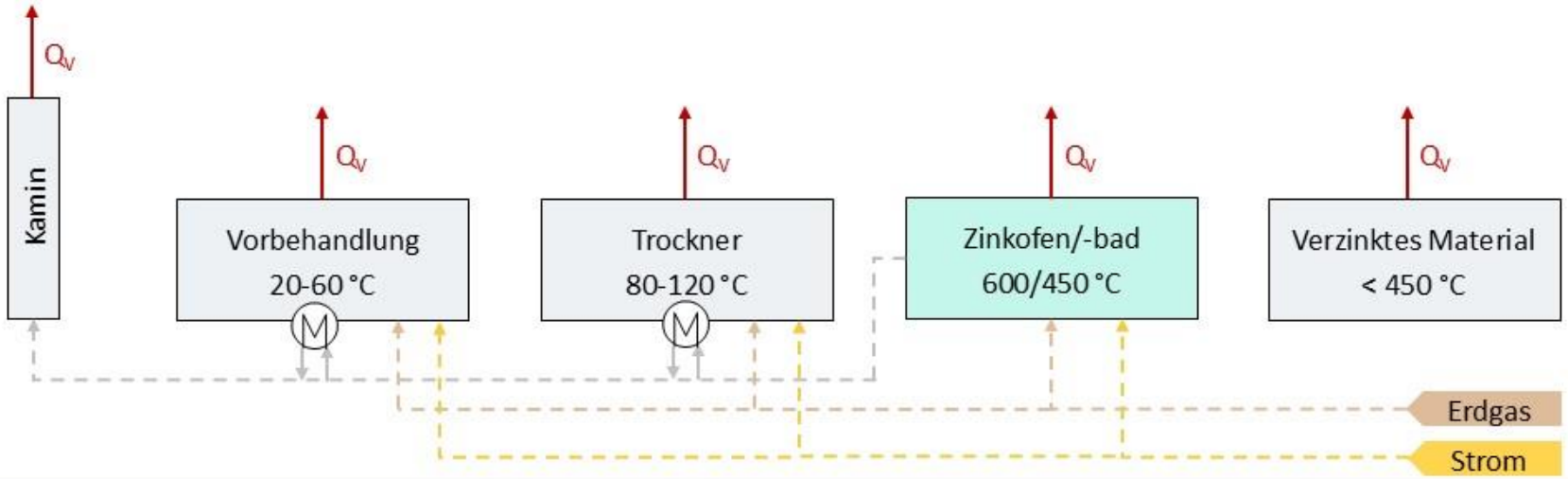
© Fraunhofer UMSICHT

SP2H-Konzept | SOLL-Zustand

Vereinfachtes Fließschema eines hybrid beheizten Zinkofens

Hybrid beheizter Zinkofen

- Der Zinkofen kann alternativ mit Gas oder Strom bei 100 % der Nennlast betrieben werden („**Energieträgerkopplung**“)
- Der Bezug der Energieträger richtet sich nach den Sportmarktpreisen: Solange Strom günstiger ist als Erdgas, wird elektrisch geheizt
- Je nach technischer Umsetzung der Elektrifizierung entfällt ggfs. die Abwärme zur Beheizung des Trockners und der Vorbehandlung
  - ➢ Gasbeheizung oder ebenfalls Umstellung auf strombasiertes Wärmeverfahren erforderlich
- Hybridisierung des Zinkofens soll bevorzugt durch Umrüstung des Ofens erfolgen:
  1. Installation von Widerstandselementen an Ofenwand
  2. Installation einer Widerstandsheizung zur Heißlufterzeugung, Zinkofen wird über Umluft beheizt → Abwärme bleibt bestehen



© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

SP2H-Konzept | Technische Umsetzungsmöglichkeiten

Darstellung von Zinkwanne und -ofen mit Flachflammenbrenner

IST-Zustand (typisch)

- Zinkofen mit Flachflammenbrennern
- Zinkwanne wird überwiegend über Wärmestrahlung beheizt
- Abgasabwärme kann zur Trocknung und Vorbehandlung genutzt werden

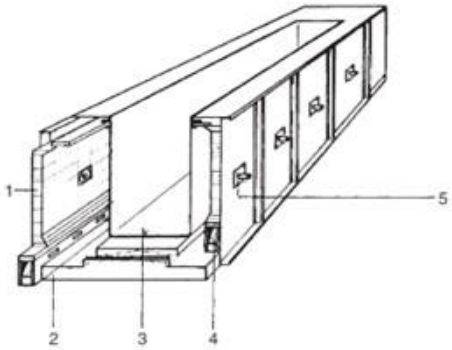


Figure 5.17 Galvanizing furnace with surface burner 1 Fiber mat lining 2 Floor insulation 3 Galvanizing kettle 4 Exhaust-gas channel 5 Surface burner.

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

SP2H-Konzept | Technische Umsetzungsmöglichkeiten

Darstellung von Zinkwanne und -ofen mit unterschiedlichen hybriden Beheizungstechnologien

Hybrid 1: FF-Brenner + Heizelemente intern

- Zinkofen mit Flachflammenbrenner und Widerstandselementen an innerer Ofenwand
- Keine Abgasverluste und damit hoher Wirkungsgrad
- Problem: In Kombination mit Flachflammen-brennern steht wenig Fläche zur Verfügung
  → Nur Teilelektrifizierung möglich?

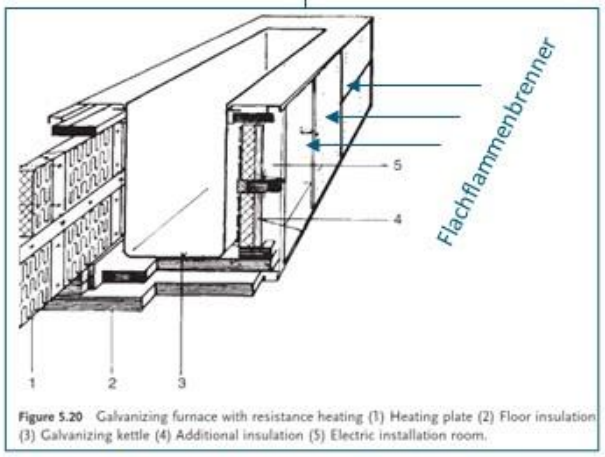


Figure 5.20 Galvanizing furnace with resistance heating (1) Heating plate (2) Floor insulation (3) Galvanizing kettle (4) Additional insulation (5) Electric installation room.

Quelle: Maaß & Peißkler: Handbook of Hot-dip Galvanization

Hybrid 2: HG-Brenner + Heizelemente intern

- Zinkofen mit Hochgeschwindigkeitsbrenner und Heizelementen an innerer Ofenwand
- Ausreichend Fläche für 100 % el. Heizleistung
- Einfache Integration von Heizelementen
- Erfahrungen von Herstellern vorhanden

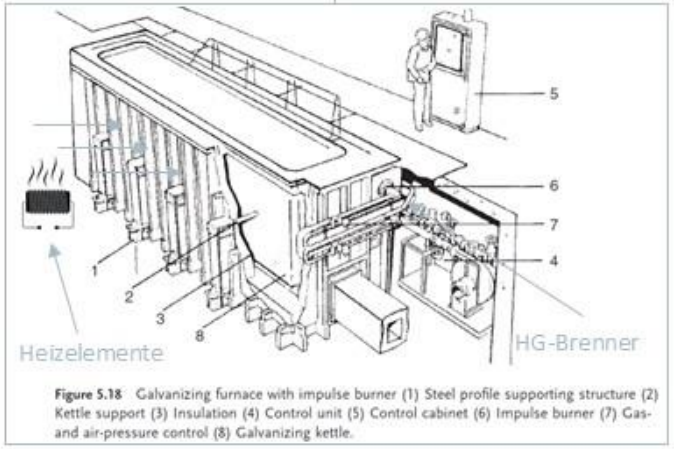


Figure 5.18 Galvanizing furnace with impulse burner (1) Steel profile supporting structure (2) Kettle support (3) Insulation (4) Control unit (5) Control cabinet (6) Impulse burner (7) Gas- and air-pressure control (8) Galvanizing kettle.

Hybrid 3: HG-Brenner + Heizelemente extern

- Zinkofen mit Umluftbeheizung über externe Widerstandsheizung und HG-Brenner
- Abwärme kann weiterhin zur Trocknung und Vorbehandlung genutzt werden
- Von Ofengeometrie unabhängige Dimensionierung von Heizelementen
- Integration eines Wärmespeichers möglich

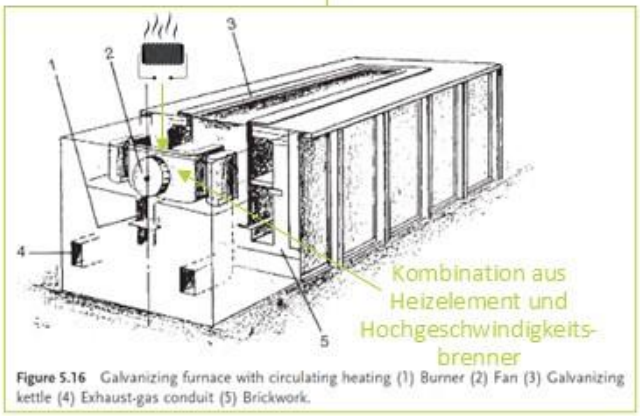


Figure 5.16 Galvanizing furnace with circulating heating (1) Burner (2) Fan (3) Galvanizing kettle (4) Exhaust-gas conduit (5) Brickwork.

SP2H-Konzept | Ergebnis der Technologiebetrachtung

Herstelleraussagen zu den Varianten „Hybrid 1“ und „Hybrid 2“

Hybrid 1 | Kombination aus Flachflammenbrennern und Heizelementen an Ofeninnenwand

- Flachflammenbrenner nehmen einen Großteil der verfügbaren Fläche ein und konkurrieren damit mit den Heizelementen
- Nach Experteneinschätzung ist allenfalls eine Teilelektrifizierung bei der Nachrüstung entsprechender Zinköfen möglich
- Aufgrund von Kompromissen verfügt Hybridsystem über einen geringeren Wirkungsgrad gegenüber rein elektrischen Lösungen
- Elektrische Beheizung führt zu einer Reduktion der anfallenden Abgasabwärme, die zur Erwärmung weiterer Verbraucher eingesetzt wird
- Quantitative Aussage erfordert Detailbetrachtung des Ofens (Ofengeometrie, Brennerbeschaffenheit, Lastprofil, Zugänglichkeit etc.)

Hybrid 2 | Kombination aus Hochgeschwindigkeitsbrenner und Heizelementen an Ofeninnenwand

- Zinköfen mit Stirn- bzw. Hochgeschwindigkeitsbrennern (Umluftbetrieb) lassen sich gut mit Heizelementen an Ofeninnenwand aufrüsten
- Art der Beheizung (Gas/Elektrisch) lässt sich kurzfristig umschalten (< 5 min)
- Hybride Systeme mit der Nutzung von Überschussstrom werden bereits vom Hersteller betrieben
- Preis eines neuen hybrid beheizten Zinkofens liegt ca. 30-40% über dem eines konventionell beheizten Ofens

- **Abschließende Bewertung des Herstellers**:
  - Technische Umsetzung einer Hybridisierung in Kombination mit Flachflammenbrennern technisch aufwendig, ineffizient und wirtschaftlich schwer umsetzbar
  - Neuanschaffung eines hybrid beheizten Zinkofens wird empfohlen

© Fraunhofer UMSICHT

SP2H-Konzept | Ergebnis der Technologiebetrachtung

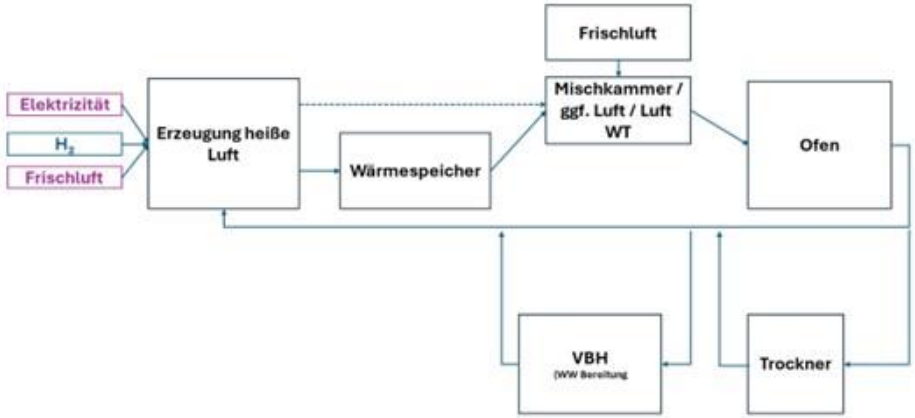
Fazit zur technischen Umsetzung der Variante „Hybrid 3“

Hybrid 3 | Bivalente Heißlufterzeugung mit Hochgeschwindigkeitsbrenner und Heizelement(en)

- Prozesswärme wird in Form von erhitzter Luft zugeführt (Umluftbetrieb)
- Die Heißluft kann durch fossile Energieträger, Wasserstoff oder Elektrizität erzeugt werden
- Es fällt weiterhin Abwärme in Form von heißer Luft an, mit welcher die Vorbehandlung und Trocknung (teil-)beheizt werden kann
- Heizelement bzw. Lufterhitzer kann unabhängig von verfügbarer Ofenfläche dimensioniert werden
- Prozesswärmebereitstellung lässt sich mit Hochtemperaturspeicher koppeln

Herausforderung:

- Technische Umsetzbarkeit (hohe Luft-Volumenströme) für vorliegendes Ofen-Design muss überprüft werden



© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Fraunhofer UMSICHT

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

Fallstudie: Hybridisierung des Zinkofens der ZINQ GmbH & Co. KG am Standort Gelsenkirchen

© Fraunhofer UMSICHT

SP2H Fallstudie | Zinkofen am Standort ZINQ Gelsenkirchen

Festgelegte Technologie und Parameter für die Simulation des hybrid beheizten Zinkofens

Untersuchungsgegenstand

- Potenzialanalyse zur Systemdienlichkeit, CO_2-Einsparung und Wirtschaftlichkeit eines hybrid beheizten Zinkofens am Beispiel der ZINQ GmbH & Co. KG am Standort Gelsenkirchen
- Grundlage der Untersuchung bildet die Simulation der Betriebsweise eines hybrid beheizten Zinkofens, der am Spotmarkt agiert

Annahmen der Fallstudie

- Aufgrund der höheren Flexibilität wird die Variante „Hybrid 3 - Bivalente Heißlufterzeugung mittels Hochgeschwindigkeitsbrenner und externen Heizelement“ festgelegt
- Der feuerungstechnische Wirkungsgrad (IST-Zustand) sowie elektrische Wirkungsgrad der Heizelemente werden jeweils auf 75 % angesetzt
  - Bei Neuanschaffung eines elektrisch oder hybrid beheizten Zinkofens ist mit deutlich höheren Wirkungsgraden zu rechnen (bis zu 95 %)
- Die Heizelemente verfügen mindestens über die derzeitige Feuerungsleistung der im Zinkofen eingesetzten Flachflammenbrenner (3 MW)
- Zusätzlich wird eine Überdimensionierung der Heizelemente auf 6 MW betrachtet, wodurch zusätzlich ein Hochtemperaturwärmespeicher beladen werden kann
  - Dadurch können über den Anteil von Niedrigpreisphasen am Spotmarkt höhere Energiemengen zur Bereitstellung von Prozesswärme genutzt werden
  - Zusätzlich zum direkten Wärmebedarf wird auch der Wärmespeicher bei geringen Strommarktpreisen beladen und stellt dann in Hochpreisphasen Prozesswärme zur Verfügung

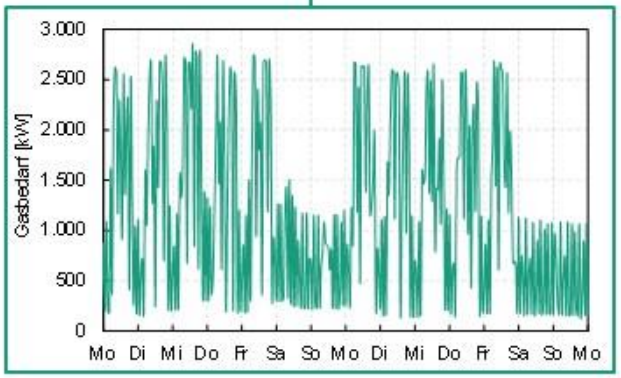
© Fraunhofer UMSICHT

SP2H Fallstudie | Methodik: Potenzialabschätzung der Hybridisierung

Abschätzung der Energie- und Kosteneinsparungen mittels Simulation und Spotmarktanalyse

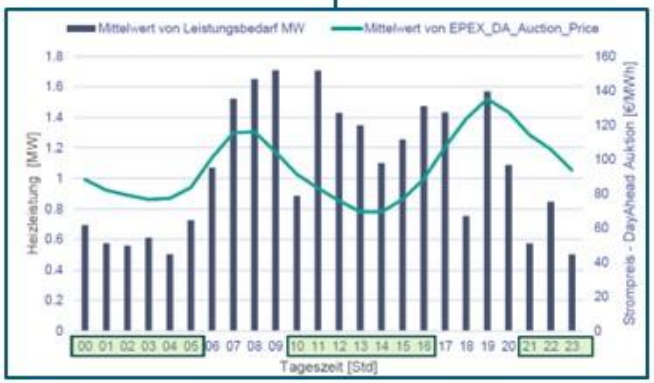
Lastgang Erdgasbedarf und aktuelle Erdgaskosten

- Lastgang in stündlicher Auflösung für das Betriebsjahr 2024
- Mittlerer Erdgaspreis für das Jahr 2024



Simulationstool: EPEX-Spotmarkthandel

- Betrachtung der Spotmarktpreise von Strom & Erdgas für das Jahr 2024
- Umschaltung auf elektrische Beheizung, wenn Strompreis günstiger ist



Erdgas- und Energiekosteneinsparung

- Einsparung durch Einkauf von Strom während Niedrigpreisphasen
- Neuer Strombedarf liegt viertelstündlich vor → Erhöhte Netzentgeltkosten können berechnet werden

Wärmebatterie Kapazität	10 MWh	20 MWh	40 MWh
Gesamtergebnis (Jan-Sep)	199 T€	221 T€	239 T€
Vollzyklen	362	204	112
Ertrag pro Vollzyklus	549 €	1085 €	2128 €
Elektrifizierung Lastgang	69%	78%	85%
Wirkungsgrad Batterie	100%	100%	100%
Wirkungsgrad Strom	75%	75%	75%
Wirkungsgrad Gas	75%	75%	75%
Durchschnittlicher Grenzpreis	56,90 €/MWh	56,90 €/MWh	56,90 €/MWh
Gemeldete Flexibilitätsmenge	17541 MWh	17541 MWh	17541 MWh
Netzentgelte enthalten? (LP+AP)	Nein	Nein	Nein

© Fraunhofer UMSICHT

SP2H Fallstudie | Methodik: Potenzialabschätzung der Hybridisierung

Kurzbeschreibung der Methodik

Vorgehen der Potenzialanalyse

- Zur Berechnung des Einsparpotenzials des hybrid beheizten Zinkofens wird der Jahreslastgang des derzeitigen Erdgasbedarfs am Standort Gelsenkirchen in stündlicher Auflösung in ein Simulationstool implementiert
- Als Betrachtungsjahre wurden die Jahre 2023 und 2024 (bis zum 31.08) gewählt
  - Zum Zeitpunkt der Studie lag der Jahreslastgang für den Erdgasbedarf im Jahr 2024 lediglich bis einschließlich August vor
- Für jedes Betrachtungsjahr werden die Spotmarktpreise für Strom und Erdgas aus historischen Daten angesetzt und je Zeitschritt gegenübergestellt
- Sobald der Strompreis unter dem Erdgaspreis liegt, wird der Zinkofen elektrisch beheizt
- Darüber hinaus wird untersucht, inwieweit ein thermischer Energiespeicher (mit unterschiedlichen Kapazitäten) das Einsparpotenzial erhöhen kann
- Da der Gasbedarf in den Jahren 2023 und 2024 (bis zum 31.08) mit 9.333 MWh/a bzw. 5.243 MWh/a unter dem durchschnittlichen Bedarf der letzten Jahre liegt, werden die Ergebnisse für eine repräsentative Aussage auf den Maximalwert der der letzten 3 Jahre (11.872 MWh/a) skaliert

Ergebnis der Potenzialanalyse

- Lastgang des Strombedarfs (viertelstündlich) zur Beheizung des Zinkofens
- Eingesparte Erdgasmenge und Energiekosten durch Bezug von Strom während Niedrigpreisphasen
- Eingesparte CO_2-Emissionen in Abhängigkeit der angesetzten Emissionsfaktoren
- Erhöhte leistungsbezogene Netzentgeltkosten durch erhöhten Strombedarf am Standort Gelsenkirchen

© Fraunhofer UMSICHT

Fraunhofer UMSICHT

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

Ergebnisse der Smart-Power-to-Heat (SP2H)-Studie für den Standort Gelsenkirchen

© Fraunhofer UMSICHT

Übersicht der betrachteten Szenarien

Rahmenbedingungen und Erläuterungen der betrachteten Szenarien

Erläuterung der Szenarien

- Das betrachtete Betriebsjahr bestimmt die Wahl des Jahreslastgangs für den Erdgasbedarf des Zinkofens am Standort ZINQ Gelsenkirchen sowie die berücksichtigten historischen Spotmarktpreise für Erdgas und Strom
- Aufgrund der Aktualität der Daten erfolgte eine detaillierte Auswertung lediglich für die Szenarien mit dem Betrachtungsjahr 2024 (S1-S4)
- Die Szenarien S0 und S1 sehen eine Hybridisierung des Zinkofens durch Aufrüstung einer elektrischen Heizung von 3 MW vor
- In den Szenarien S2 bis S4 wird der Einfluss eines Hochtemperaturwärmespeichers auf das ökonomische und ökologische Einsparpotenzial untersucht
  - Dazu wird die elektrische Heizleistung verdoppelt (6MW) und unterschiedliche Speicherkapazitäten betrachtet (10, 20 und 40 MWh)

Szenario		S0	S1	S2	S3	S4
Betrachtetes Betriebsjahr	-	2023	Jan-Aug 2024	Jan-Aug 2024	Jan-Aug 2024	Jan-Aug 2024
elektrische Heizleistung	MW	3,0	3,0	6,0	6,0	6,0
Speicherkapazität Wärmespeicher	MWh	0,0	0,0	10,0	20,0	40,0
Jahresbedarf Erdgas IST-Zustand	MWh_{th}/a	9.333,0	5.243,3	5.243,3	5.243,3	5.243,3
Wirkungsgrad strombasierte Beheizung	%	75%	75%	75%	75%	75%
Wirkungsgrad gasbasierte Beheizung	%	75%	75%	75%	75%	75%

© Fraunhofer UMSICHT

Simulationsergebnisse von ESFORIN

Rahmenbedingungen und Ergebnisse der berechneten Szenarien

Szenario			S1	S2	S3	S4
Betrachtetes Betriebsjahr	-	2023	Jan-Aug 2024	Jan-Aug 2024	Jan-Aug 2024	Jan-Aug 2024
elektrische Heizleistung	MW	3,0	3,0	6,0	6,0	6,0
Speicherkapazität Wärmespeicher	MWh	0,0	0,0	10,0	20,0	40,0
Jahresbedarf Erdgas IST-Zustand	MWh_{th}/a	9.333,0	5.243,3	5.243,3	5.243,3	5.243,3
Wirkungsgrad strombasierte Beheizung	%	75%	75%	75%	75%	75%
Wirkungsgrad gasbasierte Beheizung	%	75%	75%	75%	75%	75%
durchschnittliche Leistung	MW_{el}	1,10	0,90	0,62	0,70	0,77
max. Leistung	MW_{el}	3,10	3,00	6,00	6,00	6,00
Strombedarf bzw. substituierter Gasbedarf	MWh/a	2.031,00	1.421,00	3.623,30	4.080,85	4.499,03
Substituierter Gasbedarf	%	21,8%	27,1%	69,1%	77,8%	85,8%
Vollzyklen	-	-	-	362,33	204,04	112,48
Monetär						
durchschnittlicher Grenzpreis	€/MWh	67,67	54,30	56,90	56,90	56,90
Ertrag durch Energieträgerwechsel	€/a	138.000,00	88.000,00	199.000,00	221.000,00	239.000,00
Ertrag je eingesparte MWh Gasbedarf	€/MWh	67,95	61,93	54,92	54,16	53,12

© Fraunhofer UMSICHT

Simulationsergebnisse von ESFORIN

Übersicht der monatlichen Erträge ohne Energiespeicher

Ergebnisse für Referenzjahre 2023 (S0) und 2024 Aug (S1)

- Ertrag durch Hybridisierung und Spotmarkthandel:
  2023: 138 T€
  2024 (YTD 31.08): 88 T€
- Substituierter Erdgasbedarf
  2023: 2.031 MWh
  2024 (YTD 31.08): 1.421 MWh

Simulationsergebnisse von ESFORIN

Untersuchung des Optimierungspotenzials durch Lastverschiebung (strommarktgetriebene Produktion)

Status quo

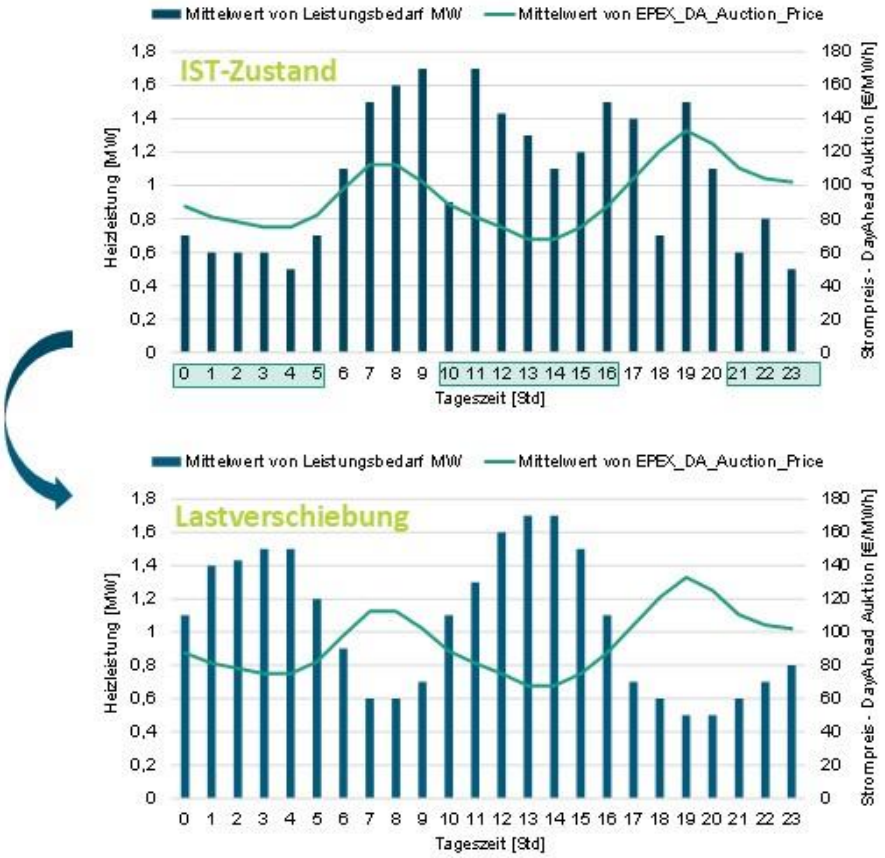
- Derzeit wird der Zinkofen vor allem in Zeiten hoher Strommarktpreise betrieben

Untersuchung

- Durch Verlagerung der Produktion hin zu Offpeak-Zeiten könnten weitere Niedrigpreisphasen genutzt und damit der Stromanteil für die Beheizung des Zinkofens erhöht werden
- Für die Untersuchung wurde das Referenzjahr 2023 gewählt und ein 3 MW Heizelement ohne Wärmespeicher berücksichtigt

Ergebnis der Simulation

- Durch eine strompreisgeführte Produktion kann der Jahresstromanteil zur Beheizung von ca. 20 auf 30 % erhöht und die jährlichen Energiekosten um ca. 9 % reduziert werden
- Die strompreisgeführte Produktion erfordert (erhebliche) Eingriffe in Betriebszeiträume, Produktionsabläufe und Arbeitszeiten der Mitarbeiter



© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Fraunhofer UMSICHT

Skalierung der Ergebnisse

Skalierung der Ergebnisse auf einen repräsentativen jährlichen Gasbedarf

Szenario		S1	S2	S3	S4
Betrachtetes Betriebsjahr	-	Jan-Aug 2024	Jan-Aug 2024	Jan-Aug 2024	Jan-Aug 2024
elektrische Heizleistung	MW	3,0	6,0	6,0	6,0
Speicherkapazität Wärmespeicher	MWh	0,0	10,0	20,0	40,0
Jahresbedarf Erdgas IST-Zustand	MWh_{th}/a	5.243,3	5.243,3	5.243,3	5.243,3
Wirkungsgrad strombasierte Beheizung	%	75%	75%	75%	75%
Wirkungsgrad gasbasierte Beheizung	%	75%	75%	75%	75%
durchschnittliche Leistung	MW_{el}	0,90	0,62	0,70	0,77
max. Leistung	MW_{el}	3,00	6,00	6,00	6,00
Strombedarf bzw. substituierter Gasbedarf	MWh/a	1.421,00	3.623,30	4.080,85	4.499,03
Substituierter Gasbedarf	%	27,1%	69,1%	77,8%	85,8%
Vollzyklen	-	-	362,33	204,04	112,48
Monetär					
durchschnittlicher Grenzpreis	€/MWh	54,30	56,90	56,90	56,90
Ertrag durch Energieträgerwechsel	€/a	88.000,00	199.000,00	221.000,00	239.000,00
Ertrag je eingesparte MWh Gasbedarf	€/MWh	61,93	54,92	54,16	53,12

- Der in der Simulation implementierte Erdgasbedarf liegt deutlich unter dem Jahresdurchschnitt der letzten 3 Jahre
  - Einsparpotenziale werden hochskaliert

- Annahme für Skalierung: Spezifische Einsparpotenziale sind konstant

© Fraunhofer UMSICHT

Skalierung der Ergebnisse

Gaseinsparung und Energiekosteneinsparung für ein repräsentatives Betriebsjahr

- Die Hybridisierung des Zinkofens mit Bezug von Überschussstrom ermöglicht je Szenario eine Reduktion des Erdgasbedarfs um 27–86 %
- Ohne Berücksichtigung von erhöhten Netzentgeltkosten können die jährlichen Energiekosten um 199.260–541.174 € reduziert werden

		Szenarien			
	Einheit	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**
Eingabeparameter					
Elektr. Leistung	MW	3	6	6	6
Speicherkapazität	MWh/a	0	10	20	40
Erdgasbedarf IST-Zustand	MWh/a	11.872			
Wirkungsgrad Strom	%	75			
Wirkungsgrad Gas	%	75			
Wirkungsgrad Speicher	%	100			
Ergebnisse					
Substituierter Gasbedarf	MWh/a	3.218	8.204	9.240	10.187
rel. Substituierter Gasbedarf	%	27,1%	69,1%	77,8%	85,8%
Ertrag durch Energieträgerwechsel	€/a	199.261	450.602	500.417	541.175

© Fraunhofer UMSICHT

Ergebnisse | Wirtschaftlichkeit

Wirtschaftlichkeit des SP2H-Konzeptes für die jeweils betrachteten Szenarien

- Amortisationszeit beträgt je nach Szenario 3,7–9,1 Jahre → gilt für 100 % Speicherwirkungsgrad und ohne Netzentgeltkosten
- Der Aufschlag durch leistungsbezogene Netzentgeltkosten erhöht die Amortisationszeit um ca. 2 Jahre

		Szenarien			
	Einheit	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**
Wirtschaftlichkeit					
Elektr. Leistung	MW	3	6	6	6
Speicherkapazität	MWh	0	10	20	40
Kapitalzins	%	6,0	6,0	6,0	6,0
spez. Leistungspreis (Netzentgelte)	€/kW	23,17	23,17	23,17	23,17
CAPEX Heizelement + Brenner	€	650.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000
CAPEX Wärmespeicher	€	0,00	675.000	1.350.000	2.700.000
CAPEX gesamt	€	650.000	1.675.000	2.350.000	3.700.000
Einsparung Energiekosten	€/a	199.260	450.601	500.416	541.174
Zusätzliche leistungsbezogene Netzentgeltkosten	€/a	69.510	139.020	139.020	139.020
Dyn. Amortisationszeit ohne Netzentgeltkosten*	a	3,7	4,3	5,7	9,1
Dyn. Amortisationszeit mit Netzentgeltkosten*	a	5,4	6,0	7,4	11,3

* $Kapitalwert\ KW = -Z_0 + \ddot{U} \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} = 0$

Z_0 = Anfangsinvestition
Ü = Zahlungsüberschüsse
i = Kapitalzins
n = Amortisationszeit

Ergebnisse | CO_2-Einsparung

Potenzielle CO_2-Einsparung am Standort Gelsenkirchen

Erkenntnisse

- Am Standort Gelsenkirchen fallen im Referenzjahr durch den Bezug von Erdgas (11.872 MWh/a) Emissionen in Höhe von 2.386 t_{CO2}/a an
- Die CO_2-Einsparung durch Hybridisierung hängt stark von der Art des Strombezugs bzw. vom Strom-Emissionsfaktor ab
- Für eine CO_2-Einsparung muss dieser unter dem Emissionsfaktor von Erdgas (0,201 t_{CO2}/MWh) liegen
- Bei Ansetzung des aktuellen Stromemissionsfaktors für Deutschland (0,385 t_{CO2}/MWh) steigen die Emissionen durch die Hybridisierung des Zinkofens um bis zu 1.874 t_{CO2}/a
- Bei Bezug von EE-Strom bzw. „grünem" Strommix können bis zu 2.048 t_{CO2}/a eingespart werden

		Szenarien			
	Einheit	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**
Emissionsfaktoren Strom		CO_2-Änderung			
CO_2-Faktor = 0,385 t_{CO2}/MWh[1]	t_{CO2}/a	592	1.510	1.700	1.874
CO_2-Faktor = 0,138 t_{CO2}/MWh[2]	t_{CO2}/a	-203	-517	-582	-642
CO_2-Faktor = 0 t_{CO2}/MWh[3]	t_{CO2}/a	-647	-1.649	-1.857	-2.048

[1] Entspricht Durchschnittswert des derzeitigen deutschen Strommixes (BAFA 2024)
[2] Entspricht prognostizierten Wert für 2030 in Deutschland (IINAS 2021)
[3] Emissionsfaktor von 0 wird durch EE-Eigenerzeugung oder durch Bezug von EE-Strom erzielt

© Fraunhofer UMSICHT

Ergebnisse | Zusammenfassung der Fallstudie

Wirtschaftlichkeit und CO_2-Einsparung der jeweils betrachteten Szenarien am Standort Gelsenkirchen

Erkenntnisse

- Die Hybridisierung des Zinkofens mit Bezug von Überschussstrom in Niedrigpreisphasen ist je nach Rahmenbedingungen wirtschaftlich umsetzbar
- Die zusätzliche Kopplung mit einem Hochtemperaturwärmespeicher erhöht die Systemdienlichkeit und Erdgaseinsparung deutlich
- Höhere Speicherkapazitäten des Wärmespeichers führen zu längeren Amortisationszeiten, da der Ausnutzungsgrad sinkt (weniger Vollzyklen)

		Szenarien			
	Einheit	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**
Wirtschaftlichkeit					
Elektr. Leistung	MW	3	6	6	6
Speicherkapazität	MWh	0	10	20	40
CAPEX gesamt	€	650.000	1.975.000	2.650.000	4.000.000
Substituierter Erdgasbedarf / Bezug von (Überschuss-)Strom	MWh/a	3.218	8.204	9.240	10.187
Einsparung Energiekosten	€/a	199.260	450.601	500.416	541.174
Zusätzliche leistungsbezogene Netzentgeltkosten	€/a	69.510	139.020	139.020	139.020
Dyn. Amortisationszeit ohne Netzentgeltkosten	a	3,7	4,3	5,7	9,1
Dyn. Amortisationszeit mit Netzentgeltkosten	a	5,4	6,0	7,4	11,3
Potenzielle CO_2-Einsparung					
Max. jährliche CO_2-Einsparung	t_{CO2}/a	647	1.649	1.857	2.048

© Fraunhofer UMSICHT

Fraunhofer UMSICHT

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

Skalierung der Ergebnisse auf:

a) Feuerverzinkungsanlagen in Deutschland
b) Deutschlandweit installierte Anlagen zur Prozesswärmeerzeugung

© Fraunhofer UMSICHT

Hybridisierung | Feuerverzinkungsanlagen in Deutschland

Abschätzung des Erdgasbedarfs aller Feuerverzinkungsanlagen in Deutschland

Methodik der Skalierung

- Abschätzung des Erdgasbedarfs der Feuerverzinkungsanlagen in Deutschland
- Die für den Standort Gelsenkirchen ermittelte prozentuale Erdgaseinsparung je Szenario (27,1–85,8 %) wird auf den gesamten Erdgasbedarf der Feuerverzinkungsanlagen in Deutschland übertragen
- Annahme: Alle Feuerverzinkungsanlagen werden mit Erdgas beheizt (trifft für einen Großteil zu)

Abschätzung des Erdgasbedarfs aller Feuerverzinkungsanlagen in Deutschland

- Der jährliche Energie- bzw. Erdgasbedarf ist nicht bekannt und wird daher im Rahmen der Studie abgeschätzt
- Hierzu wurden spezifische Energieverbräuche und Kesselparameter aus der Literatur verwendet (siehe Tabelle)

Parameter: Feuerverzinkungsanlagen in Deutschland	Wert	Einheit
Anzahl der Feuerverzinkungsanlagen	150	-
Kesselmeter aller Feuerverzinkungsanlagen	1.300	m
Durchschnittlicher jährlicher Erdgasbedarf je Kesselmeter[2]	750	MWh/m/a
Geschätzter jährlicher Erdgasbedarf aller Feuerverzinkungsanlagen	975.000	MWh/a
Feuerungsleistung aller Feuerverzinkungsanlagen[3]	111	MW

[1] Quelle: Industrieverband Feuerverzinken
[2] Quelle: BAT (2022) - Reference BAT Reference Document for the Ferrous Metals Processing Industry
[3] Gilt für die Annahme einer jährlichen Betriebszeit von 8.760 h

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Hybridisierung | Feuerverzinkungsanlagen in Deutschland

Potenzielle systemdienliche Flexibilitätsbeiträge im Sinne von „Nutzen statt Abregeln“

Hybridisierungspotenzial der Feuerverzinkungsanlagen in Deutschland

- Auf Basis der vorangegangenen Abschätzung liegt der jährliche Erdgasbedarf und damit das Hybridisierungspotenzial bei ca. 975.000 MWh/a
- Der elektrische Leistungsbedarf entspricht 111 bzw. 222 MW (Überdimensionierung und Kopplung mit Wärmespeicher in den Szenarien S2–S4)

Ergebnis

- Je nach Szenario beträgt die Einsparung von Erdgas sowie der elektrische Flexibilitätsbeitrag 264.240–836.609 MWh/a
- Durch die Hybridisierung der Feuerverzinkungsanlagen können somit große Energiemengen von volatil erzeugtem Grünstrom systemdienlich einer sinnvollen Verwendung zugeführt werden („Nutzen statt Abregeln“)
- Abhängig von vorliegenden Gegebenheiten, technologische Umsetzung und Art des Strombezugs können bis zu 168.158 t_{CO2}/a eingespart werden

		Szenarien			
	Einheit	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**
Feuerungsleistung / Elektrische Leistung	MW	111	222	222	222
Substituierter Erdgasbedarf / Bezug von (Überschuss-)Strom	MWh/a	264.240	673.765	758.848	836.609
Emissionsfaktoren Strom		CO_2-Änderung			
CO_2-Faktor = 0 t_{CO2}/MWh	t_{CO2}/a	-53.112	-135.427	-152.528	-168.158

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Hybridisierung | Prozesswärmebereitstellung in Deutschland

Übersicht des Prozesswärmebedarfs der deutschen Industrie und Vorgehensweise zur Skalierung

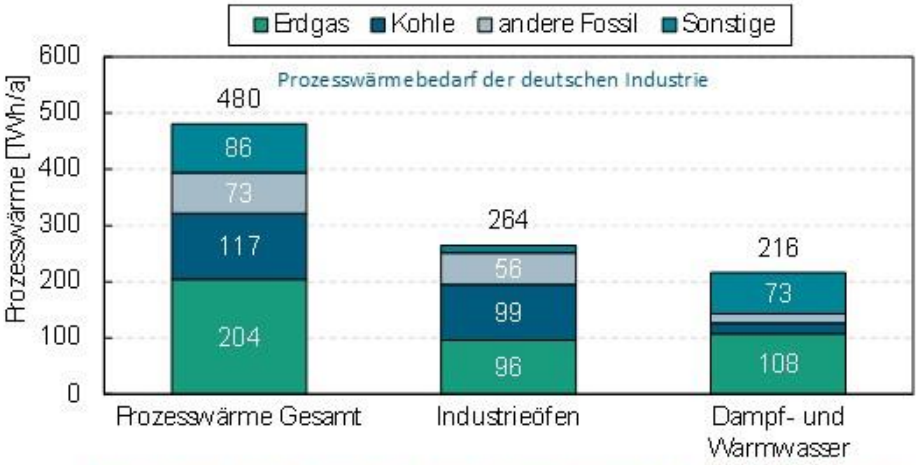
Prozesswärmebedarf der deutschen Industrie

- Prozesswärmebedarf 2021 = 480 TWh/a
- Davon Fossil bereitgestellt = 394 TWh/a (82 %)
- Je Szenario wird eine Elektrifizierung der Prozesswärme von 80 TWh/a (H_2-Szenario) bis 215 TWh/a (Strom-Szenario) im Jahr 2045 erwartet

Quelle: Fraunhofer ISI (2024) - Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland

Skalierung und Abschätzung des Hybridisierungspotenzials

- Für eine Abschätzung wird der Mittelwert des Elektrifizierungspotenzials beider Szenarien (148 TWh/a) angesetzt und davon ausgegangen, dass die entsprechenden Prozesswärmeverfahren auf einen hybriden, bivalenten Betrieb umgerüstet werden
- Bei einer Annahme von 7.500 Betriebsstunden im Jahr ergibt sich in diesem Fall ein elektrischer Leistungsbedarf von ca. 20 GW
- Das CO_2-Einsparpotenzial wird über ein Emissionsfaktor von 0,259 t_{CO2}/MWh ermittelt, der auf Basis des aktuellen Erdgas- und Kohleanteils berechnet wurde*



Eigene Darstellung basierend auf Daten der Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland (Fraunhofer ISI 2024)

* Erdgas = 0,201 t_{CO2}/MWh; Mittelwert von Braun- und Steinkohle = 0,359 t_{CO2}/MWh; Anteil Erdgas = 63,6 %

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Hybridisierung | Prozesswärmebereitstellung in Deutschland

Potenzielle systemdienliche Flexibilitätsbeiträge bei der Hybridisierung der Prozesswärme in Deutschland

Hybridisierungspotenzial der Prozesswärme in der deutschen Industrie

- Auf Basis der vorangegangenen Abschätzung können bis zum Jahr 2045 etwa 148 TWh/a der derzeit fossil bereitgestellten Prozesswärme auf strombasierte bzw. hybride Wärmeverfahren umgestellt werden
- Der elektrische Leistungsbedarf entspricht 20 bzw. 40 GW (Überdimensionierung und Kopplung mit Wärmespeicher in den Szenarien S2–S4)

Ergebnis

- Je nach Szenario beträgt die Einsparung fossiler Energieträger sowie der elektrische Flexibilitätsbeitrag 40–127 TWh/a
- Eine umfängliche Hybridisierung der Prozesswärme in Deutschland hat folglich ein erhebliches Potenzial, überschüssigen Strom ohne Abregelungen von erneuerbaren Energien oder den Einsatz von Stromspeichern sinnvoll zu nutzen
- Abhängig von vorliegenden Gegebenheiten, technologische Umsetzung und Art des Strombezugs können bis zu 32,9 Mio. t_{CO2}/a eingespart werden

		Szenarien			
	Einheit	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**
Feuerungsleistung / Elektrische Leistung	GW	20	40	40	40
Substituierter Erdgasbedarf / Bezug von (Überschuss-)Strom	TWh/a	40	102	115	127
Emissionsfaktor Strom		CO_2-Änderung			
CO_2-Faktor = 0 t_{CO2}/MWh	t_{CO2}/a	-10.388.551	-26.488.978	-29.834.004	-32.891.170

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Fraunhofer UMSICHT

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

Fazit der SP2H-Studie

© Fraunhofer UMSICHT

Schlussfolgerung

Mehrwert der hybriden Prozesswärmebereitstellung

Flexibilität und Energiekosteneinsparung

- Die Hybridisierung ermöglicht den flexiblen Wechsel zwischen Energieträgern ohne Beeinträchtigung des Produktionsprozesses und kann bei einem spotmarktgeführten Betrieb die Energiekosten eines energieintensiven Unternehmens erheblich reduzieren
- In der Feuerverzinkungsanlage am Standort Gelsenkirchen könnten beispielsweise die jährlichen Energiekosten ohne Berücksichtigung zusätzlicher Netzentgeltkosten um bis zu 541.174 €/a (47 %) reduziert werden

Reduktion der CO_2-Emissionen

- Die Substitution von Erdgas durch Strom ermöglicht insbesondere langfristig (stetiger Ausbau von EE) eine Reduktion der CO_2-Emissionen und fördert damit die Transformation zu einem nachhaltigeren Energiesystem
- Am Standort Gelsenkirchen können der Erdgasbedarf und die damit verbundenen CO_2-Emissionen um bis zu 86 % reduziert werden

Systemdienlichkeit – Sicherung der Netzstabilität und erhöhte Integration erneuerbarer Energien

- Die Hybridisierung aller Feuerverzinkungsanlagen in Deutschland sowie weiterer Prozesswärmeverbraucher fördert die Sektorenkopplung, weist ein großes Potenzial zur Flexibilisierung des Stromversorgungssystems auf und reduziert den Bedarf an teuren und ineffizienten Energiespeichern
- Durch Hybridisierung aller Feuerverzinkungsanlagen sowie Prozesswärmeverbraucher in Deutschland besteht das Potenzial, überschüssige elektrische Energie in Höhe von bis zu 837 GWh/a* bzw. 127 TWh/a* über einen spotmarktgeführten Betrieb systemdienlich zu nutzen

* Das Hybridisierungspotenzial wurde vereinfacht über eine Skalierung berechnet und ist daher als grobe Abschätzung zu verstehen. Das tatsächliche Potenzial ist stark von der jeweils eingesetzten Technologie und Betriebscharakteristik je Anlage sowie dem zukünftigen Strommarkt abhängig. Eine genaue Abschätzung des Potenzials erfordert weiterführende Untersuchungen

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Schlussfolgerung

Herausforderungen der hybriden Prozesswärmebereitstellung und mögliche Lösungen

Herausforderungen

- Die Einbindung hybrider Systeme in bestehende Anlagen sowie der regelungstechnische Aufwand können sowohl aus technischer als auch betriebswirtschaftlicher Sicht herausfordernd sein
- Bestehende elektrische Infrastrukturen sind häufig nicht für den erhöhten Leistungsbedarf elektrischer Beheizungstechnologien ausgelegt
- Höhere Anfangsinvestition gegenüber konventioneller Anlage und geringere Nutzungsdauer (Wechsel zwischen strom- und gasbasiertem Verfahren) führen zu höheren Stückgutkosten
- Steigende leistungsbezogene Netzentgeltkosten reduzieren bzw. gefährden die Wirtschaftlichkeit von hybrid beheizten Systemen

Erforderliche Lösungsbeiträge

- Förderung der Investitionskosten für hybride Systeme bzw. CO_2-einsparende Maßnahmen (bspw. über BAFA Modul 4)
- Schaffung einer langfristigen Planungssicherheit für alle betriebswirtschaftlich relevanten energiepolitischen Rahmenbedingungen zur Gewährleistung eines möglichst langfristigen Refinanzierungszeitraums
- Schneller und leistungsgerechter Ausbau der Netzinfrastruktur
- Anpassung / Ergänzung der Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV) um eine Regelung, nach der die mit einer systemdienlichen Nutzung von Überschussstrom aus EE („Nutzen statt Abregeln“) einhergehende intensivere Netznutzung kostenneutral ist, d.h. dass für die notwendige Ertüchtigung weder ein BKZ anfällt noch die Netznutzungsgebühren (Leistungsanteil) durch den systemdienlich erhöhten Leistungsbedarf steigen

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Literaturübersicht der Technologiesteckbriefe

Autor	Jahr	Titel
ADB	2018	Handbook on Battery Energy Storage System
Agora	2018	Klimaneutrale Industrie: Ausführliche Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Branchen Stahl, Chemie und Zement
Clean Hydrogen Joint Undertaking	2024	Programme Review Report 2024.
Danish Energy Agency	2024	Technology Data – Energy storage.
Dumont	2020	Carnot battery technology: A state-of-the-art review. DOI: https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101756
Durusut	2019	Hy4Heat WP6: Conversion of Industrial Heating Equipment to Hydrogen. The Department for Business, Energy & Industrial Strategy UK.
EASE	2022	Electrochemical Energy Storage
Eppinger et al.	2021	Carnot battery: Simulation and design of a reversible heat pump-organic Rankine cycle pilot plant. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116650
Figgener et al.	2020	The development of stationary battery storage systems in Germany – A market review. DOI: https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101153
FFE	2017	Kurzstudie Power-to-X: Ermittlung des Potenzials von PtX-Anwendungen für die Netzplanung der deutschen ÜNB
Energy Transition Expertise Center (EnTEC)	2023	Study on Energy Storage. DOI: 10.2833/333409.
Irena	2020	Innovation outlook: Thermal energy storage
Komorowska	2022	An analysis of the competitiveness of hydrogen storage and Li-ion batteries based on price arbitrage in the day-ahead market. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.160
Liang et al.	2022	Key Components for Carnot Battery: Technology review, technical barriers and selection criteria. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112478

© Fraunhofer UMSICHT

Literaturübersicht der Technologiesteckbriefe

Autor	Jahr	Titel
Luckywell et al.	2023	Solid state sensible heat storage technology for industrial applications – A review. DOI: https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106919
Lupi	2017	Fundamentals of electroheat. Electrical technologies for process heating. ISBN: 978-3-319-55596-6.
Maaß	2011	Handbook of Hot-dip Galvanization. ISBN: 978-0-470-65871-9.
Marocco	2023	Assessment of the role of hydrogen to produce high-temperature heat in the steel industry. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijclepro.2023.135969
Martin Robinius	2018	Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles
Miró et al.	2016	Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.147
Nate Blair	2022	Storage Futures Study: Key Learnings for the Coming Decades.
Smolinka	2018	Studie IndWEDe Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme.
Vecchi	2022	Carnot Battery development: A review on system performance, applications and commercial state-of-the-art. DOI: https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105782
Viswanathan	2022	2022 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment.
Weiß	2024	Kohlenstofffreie industrielle Wärme- und Stromversorgung mit Power-to-Heat und Carnot Batteriesystemen
ENERKO	2024	https://enerko.de/

Kontaktdaten

Dr.-Ing. Markus Hadam
Wiss. Mitarbeiter Energieprozesstechnik
Tel. +49 208 8598-1545
markus.hadam@umsicht.fraunhofer.de

Fraunhofer
UMSICHT

Fraunhofer-Institut für Umwelt-,
Sicherheits- und Energietechnik
UMSICHT

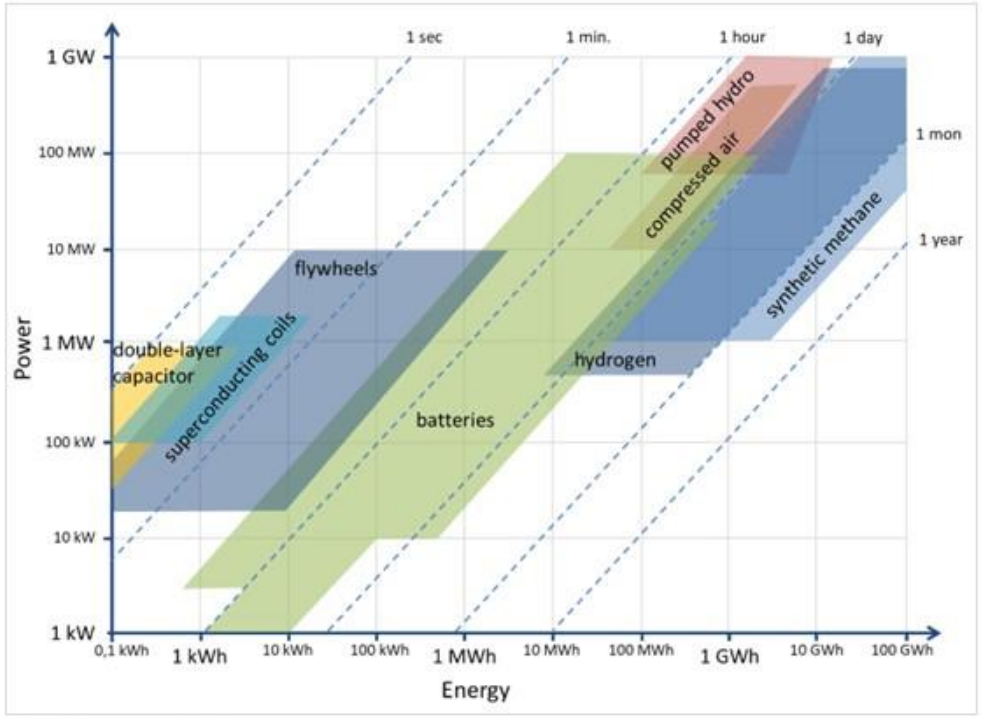
Fraunhofer UMSICHT

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

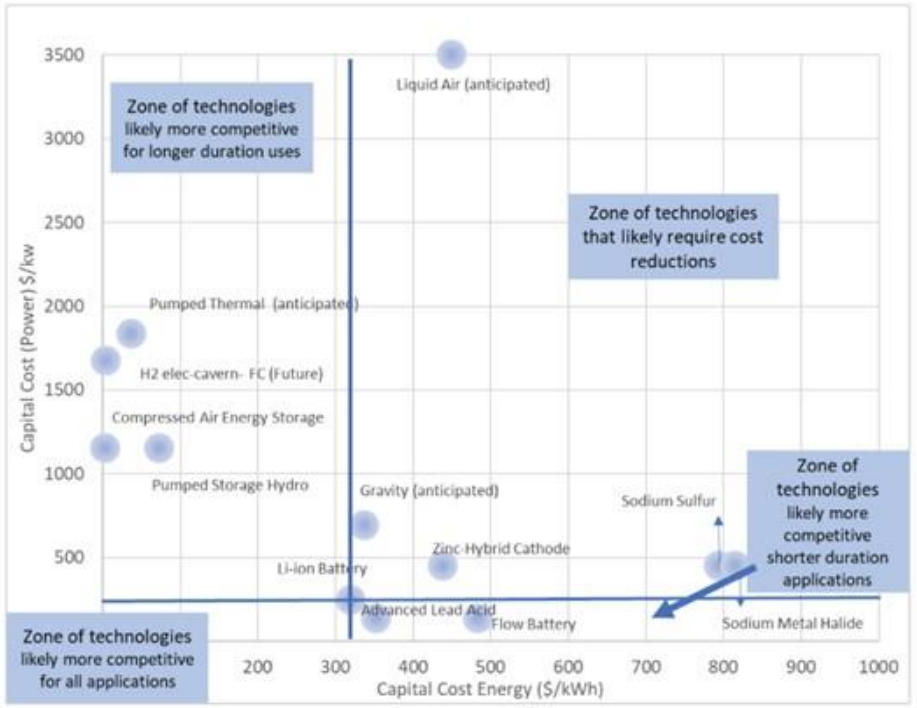
Anhang

Arbeitspaket 1 | Technologiesteckbriefe

Einsatzbereiche und Investitionskosten in Abhängigkeit von Speicherleistung und -kapazität



Quelle: (EnTEC, 2023)



Quelle: (NREL, 2022)

© Fraunhofer UMSICHT

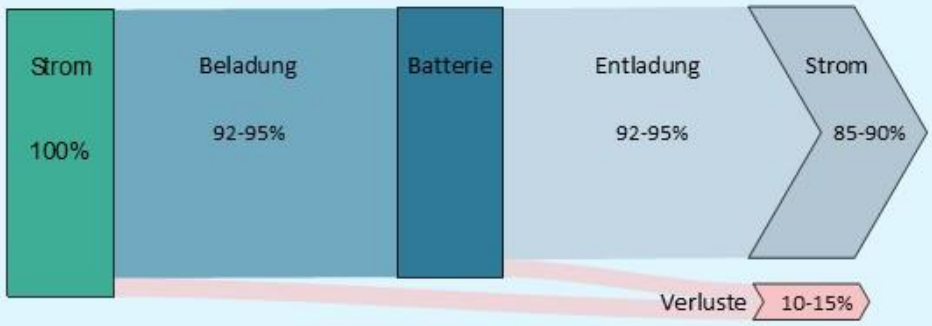
Arbeitspaket 1 | Technologiesteckbriefe

Lithium-Ionen-Batterie (Strom-zu-Strom-Speicher)

Kurzbeschreibung

- Chemischer Energiespeicher mit hoher Effizienz, Energiedichte und Flexibilität
- Anwendung: tragbare Geräte, Mobilität aber auch stationäre Energiespeicherung

Sankey-Diagramm



Kennzahlen

Parameter	Wert
Leistung in MW	< 100
Kapazität in MWh	< 1.000
Entladungszeit in h	0,5–10
Reaktionszeit in sec/min	< sec
Wirkungsgrad in %	85–90
Selbstentladung in %/24h	0,1–0,3
kal. Lebensdauer in a	8–20
zykl. Lebensdauer	2–10k
TRL	9
Investitionskosten in €/kW	500–2.000
Investitionskosten in €/kWh	300–800

Quellen: Bergholz (2015), Vetter (2018), ADB (2018), Figgener (2020), EASE (2022), Viswanathan (2022), EnTEC (2023)

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

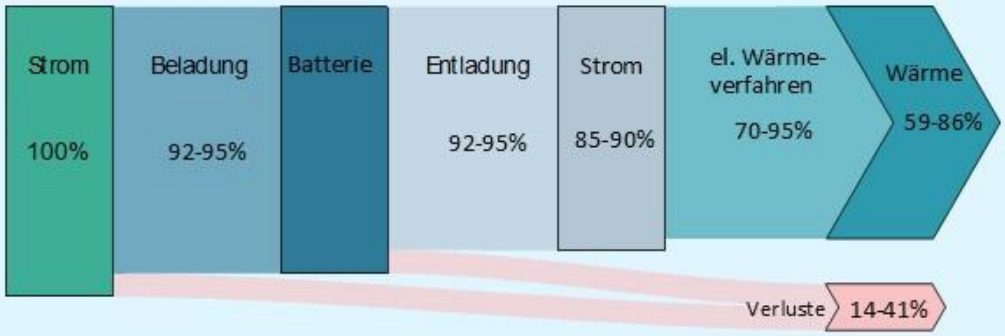
Arbeitspaket 1 | Technologiesteckbriefe

Lithium-Ionen-Batterie und anschließende Prozesswärmebereitstellung

Kurzbeschreibung

- Einsatz einer Lithium-Batterie mit anschließender Erzeugung von Prozesswärme
- Anwendung: Erweiterung einer bestehenden bzw. kostengünstig zu realisierenden Power-to-Heat-Applikation um eine Speicherfunktion zur optimierten / intensivierten Nutzung von Überschussstrom

Sankey-Diagramm



Kennzahlen

Parameter	Wert
Leistung in MW	< 100
Kapazität in MWh	< 1.000
Entladungszeit in h	0,5–10
Reaktionszeit in sec/min	< sec
Wirkungsgrad in %	59–86
Selbstentladung in %/24h	0,1–0,3
kal. Lebensdauer in a	8–20
zykl. Lebensdauer	2–10k
TRL	9
Investitionskosten in €/kW	580–2.700
Investitionskosten in €/kWh	300–800

Quellen:

© Fraunhofer UMSICHT

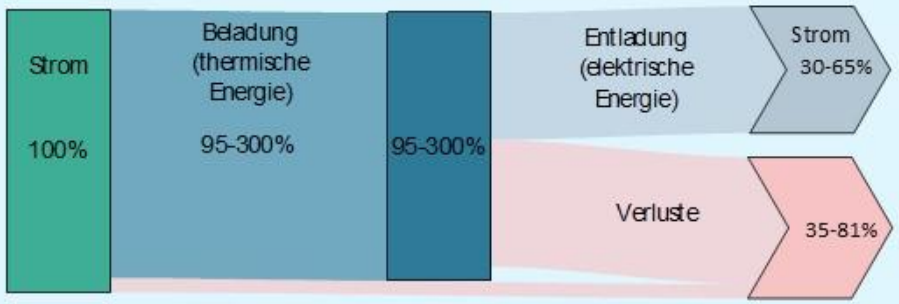
Arbeitspaket 1 | Technologiesteckbriefe

Carnot-Batterie (Strom-zu-Strom-Speicher)

Kurzbeschreibung

- Umwandlung und Speicherung von Strom in Form thermischer Energie
- Bei der Entladung wird die gespeicherte Wärme wieder in Strom umgewandelt (thermische Auskopplung ist ebenfalls möglich)
- Es kommen unterschiedlichste elektrische Beheizungstechnologien in Frage, zudem können Abwärmeströme zur Beheizung eingesetzt werden
- Anwendung: Industriestandorte mit hohem Anteil von EE und Prozesswärmebedarf

Sankey-Diagramm



Kennzahlen

Parameter	Wert
Leistung in MW	1–100
Kapazität in MWh	10–1.000
Entladungszeit in h	h–w
Reaktionszeit in sec/min	sec–min
Wirkungsgrad in %	30-65
Selbstentladung in %/24h	0,1
kal. Lebensdauer in a	20–30
zykl. Lebensdauer	-
TRL	5-9
Kosten in €/kW	395–1.300
Kosten in €/kWh	85–400

Quellen: Steinmann (2019), Dumont (2020), Eppinger (2021), Vecchi (2022), Liang (2022), Weiß (2024)

© Fraunhofer UMSICHT

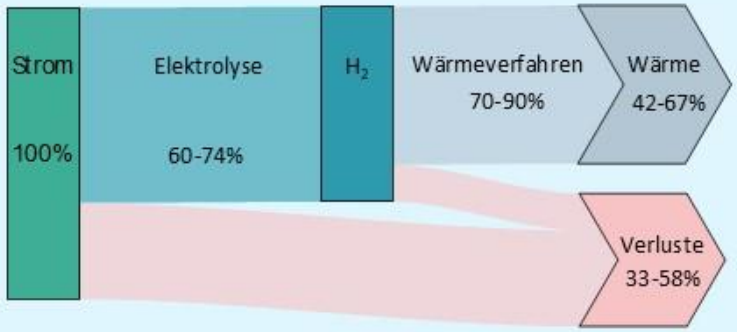
Arbeitspaket 1 | Technologiesteckbriefe

Erzeugung von grünem H_2 + Verbrennung

Kurzbeschreibung

- Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse und grünem Strom sowie ggf. Zwischenspeicherung (starker Einfluss auf Wirkungsgrad)
- Anschließend Verbrennung zur Wärmebereitstellung
- Anwendung: Prozesswärme insbesondere für Hochtemperaturprozesse

Sankey-Diagramm



Kennzahlen

Parameter	Wert
Leistung in MW	0,8–10.000
Kapazität in MWh	10–100.000
Entladungszeit in h	h–w
Reaktionszeit in sec/min	sec–min
Wirkungsgrad in %	42-67
Selbstentladung in %/24h	-
kal. Lebensdauer in a	10–30
zykl. Lebensdauer	1–10k
TRL	9
Kosten in €/kW	1.500–2.300
Kosten in €/kWh	150–250

Quellen: Robinius (2018), Hy4Heat (2019), Smolinka (2019), Marocco (2023), EnTEC (2023), EU JRC (2024), Danish Energy Agency (2024)

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

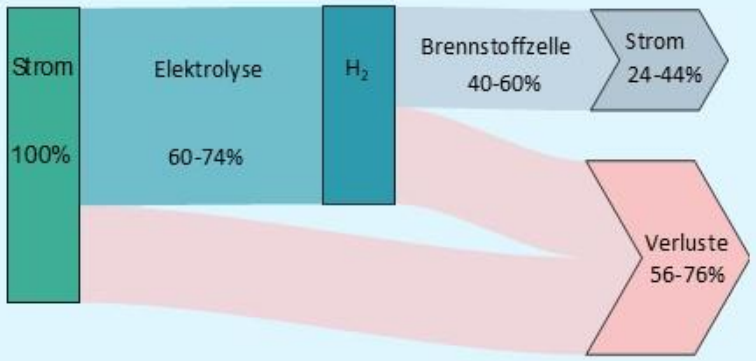
Arbeitspaket 1 | Technologiesteckbriefe

Erzeugung von grünem H_2 + Brennstoffzelle (Strom-zu-Strom)

Kurzbeschreibung

- Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse und grünem Strom
- Anschließend Verstromung über eine Brennstoffzelle (elektrochemische Reaktion)
- Anwendung: Mobilität, Strom- und Wärmeversorgung von Gebäuden

Sankey-Diagramm



Kennzahlen

Parameter	Wert
Leistung in MW	< 1.000
Kapazität in MWh	< 2.000
Entladungszeit in h	min–h
Reaktionszeit in sec/min	sec–min
Wirkungsgrad in %	24–44
Selbstentladung in %/24h	-
kal. Lebensdauer in a	5–30
zykl. Lebensdauer	-
TRL	8–9
Kosten in €/kW	3.000–5.000
Kosten in €/kWh	-

Quellen: Komorowska (2022), EnTEC (2023)

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

Arbeitspaket 1 | Technologiesteckbriefe

Elektrische Prozesswärmebereitstellung (PtH)

Kurzbeschreibung

- Bereitstellung von Prozesswärme unter dem Einsatz von elektrischer Energie
- Je nach Prozesswärmeverfahren und Temperaturniveau kommen unterschiedlichste PtH-Technologien zum Einsatz
- Anwendung: Wohnsektor, industrielle Prozesswärme

Sankey-Diagramm

Kennzahlen

Parameter	Wert
Leistung in MW	0,1–200
Kapazität in MWh	-
Entladungszeit in h	-
Reaktionszeit in sec/min	sec
Wirkungsgrad in %	70–95
Selbstentladung in %/24h	-
kal. Lebensdauer in a	10–30
zykl. Lebensdauer	-
TRL	6–9
Kosten in €/kW	80–700
Kosten in €/kWh	-

Quellen: Maaß (2011), Reuther (2016), Lupi (2017), FFE (2017), Agora (2018), ENERKO (2024)

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

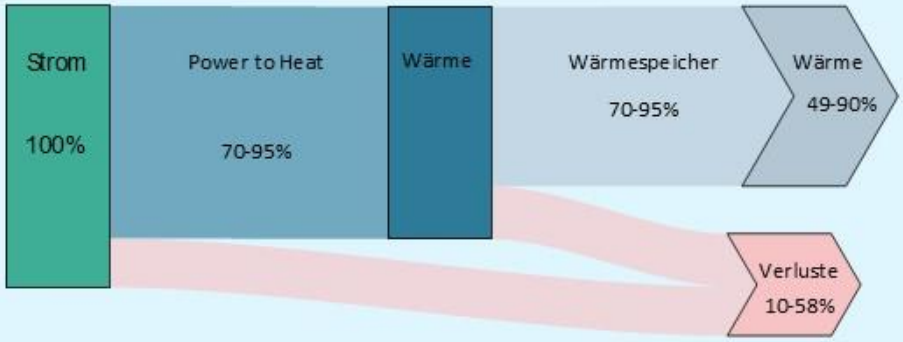
Arbeitspaket 1 | Technologiesteckbriefe

Elektrische Prozesswärmebereitstellung mit Zwischenspeicherung in einem Wärmespeicher

Kurzbeschreibung

- Bereitstellung von Prozesswärme unter dem Einsatz von elektrischer Energie mit anschließender Speicherung in einem Wärmespeicher
- Je nach Prozesswärmeverfahren und Temperaturniveau kommen unterschiedlichste PtH- und Speichertechnologien zum Einsatz
- Anwendung: Wohnsektor, industrielle Prozesswärme, Integration EE

Sankey-Diagramm



Kennzahlen

Parameter	Wert
Leistung in MW	0,1–200
Kapazität in MWh	-
Entladungszeit in h	-
Reaktionszeit in sec/min	sec
Wirkungsgrad in %	49–90
Selbstentladung in %/24h	-
kal. Lebensdauer in a	10–30
zykl. Lebensdauer	-
TRL	6–9
Kosten in €/kW	80–700
Kosten in €/kWh	10-150

Quellen: Miró (2016), DLR (2018), Irena (2020), Luckywell 2023

© Fraunhofer UMSICHT Vertraulich

8.Glossar

Überschrift	Text
Baukostenzuschuss (BKZ)	einmaliger Kostenbeitrag für den Netzanschluss
CAPEX (Capital Expenditure)	Investitionskosten, die für den Erwerb oder die Modernisierung langfristiger Anlagen und Infrastrukturen entstehen. Dazu zählen beispielsweise Maschinen, Gebäude oder technische Systeme.
CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism)	Ein Mechanismus der EU, der CO_2-Grenzausgleichszahlungen einführt, um sicherzustellen, dass importierte Produkte ähnlich wie inländische Erzeugnisse CO_2-Kosten tragen, um so Wettbewerbsverzerrung und 'Carbon Leakage' zu verhindern.
Energieeffizienz	Das Verhältnis von nutzbarer Energie zu eingesetzter Energie. Höhere Energieeffizienz bedeutet, dass weniger Energie für denselben Nutzen benötigt wird.
Energiespeicher	Systeme oder Technologien, die Energie (in Form von elektrischer, chemischer, thermischer, Lage-, Bewegungs- oder Druckenergie) für eine spätere Nutzung speichern, z. B. Batterien, Pumpspeicherkraftwerke, Wasserstoffspeicher oder Heißwasserspeicher.
Energieträgerkopplung	Energieträgerkopplung ermöglicht die Nutzung verschiedener, alternativ einsetzbarer Energieträger (z.B. Strom und Gas / H2) zur gleichwertigen Erzeugung einer Nutzenergie (hier insbesondere Prozesswärme) mittels eines hybrid ausgelegten Systems.
Erneuerbare Energien	Energiequellen, die sich auf natürliche Weise erneuern, wie Sonne, Wind, Wasser, Biomasse, Umgebungswärme und Geothermie. Sie tragen zur Reduzierung von CO_2-Emissionen bei.
Flexibilisierung	Flexibilisierung beschreibt die Anpassungsfähigkeit von Energiesystemen oder Produktionsprozessen an wechselnde Bedingungen, insbesondere im Hinblick auf schwankende Energiebedarfe und -angebote.
Fossile Energieträger	Nicht-erneuerbare Energiequellen wie Kohle, Erdöl und Erdgas, die bei ihrer Verbrennung CO_2-Emissionen verursachen und begrenzt verfügbar sind.
Hybridisierung	Die Kombination unterschiedlicher Technologien zur Nutzung von z.B. fossiler und erneuerbarer Energieträger, um die Energieversorgung resilienter und/oder nachhaltiger zu gestalten.
Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)	Sektorkopplungstechnologie zur energieeffizienten Erzeugung von Strom bei gleichzeitiger Nutzung der dabei anfallenden Abwärme.
Lastmanagement	Die gezielte Steuerung und Anpassung des Energieverbrauchs in Abhängigkeit von der aktuellen Verfügbarkeit und den Kosten oder der ökologischen Qualität von Energie.
Monovalent	Ein System oder eine Technologie, die ausschließlich mit einem einzigen Energieträger oder einer einzigen Energiequelle betrieben wird.
Netzentgelt	Gebühren, die für die Nutzung von Strom- oder Gasnetzen anfallen, um die Kosten für Betrieb, Wartung und Ausbau der Netze zu decken.
Netzdienlichkeit	Maßnahmen oder Technologien, die zur Stabilität und Effizienz der Stromnetze beitragen, z. B. durch Lastverschiebung, Blindstromkompensation oder Einspeisemanagement.

Netzengpassmanagement (Redispatch)	Maßnahmen, die Netzbetreiber ergreifen, um Überlastungen im Stromnetz zu vermeiden. Dazu zählen das Hoch- oder Herunterfahren von Kraftwerken sowie die flexible Steuerung von Verbrauchern.
OPEX (Operational Expenditure)	Betriebskosten, die im laufenden Betrieb eines Unternehmens oder einer Anlage anfallen, z. B. für Wartung und Instandhaltung, Energie oder Personal.
Prozesswärme	Wärmeenergie, die in industriellen Prozessen benötigt wird, z. B. für chemische Reaktionen, Trocknung, Sterilisation, Dampfbereitstellung oder Schmelzen.
Power-to-X	Technologien, die Strom in andere Energieträger wie Wasserstoff (Power-to-Gas), Wärme (Power-to-Heat) oder synthetische Kraftstoffe (Power-to-Fuel) umwandeln.
Residuallast	Die Differenz zwischen der gesamten Stromnachfrage und der fluktuierenden Einspeisung aus erneuerbaren Energien. Sie beschreibt den benötigten Anteil an gesicherter Erzeugung oder Speichern zur Netzstabilisierung.
Resilienz	Die Widerstandsfähigkeit eines Systems, z. B. eines Energiesystems, gegenüber externen Störungen und die Fähigkeit, sich im Falle von Störungen schnell wieder zu stabilisieren.
Smart Power to Heat (SP2H)	Sonderform einer Power-2-Heat-Anwendung, bei der durch Hybridisierung der Anlage zwei oder mehrere Energieträger (z.B. Strom / Erdgas / H2) gleichberechtigt zur Bereitstellung von Prozesswärme eingesetzt werden.
Systemdienlichkeit	Der Beitrag eines Systems oder einer Technologie zur Stabilität, Effizienz und Versorgungssicherheit des gesamten Energiesystems.
Wärmespeicher	Anlagen oder Systeme, die Wärmeenergie speichern und bei Bedarf wieder abgeben, z. B. Heißwasserspeicher, Hochtemperaturwärmespeicher oder Latentwärmespeicher.

9.Literaturverzeichnis

[1] VDE, „Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung und Entwicklung der Residuallast," 2022.

[2] F.-I. f. S. E. ISE, „Batteriespeicher an ehemaligen Kraftwerksstandorten," Freiburg, 2022.

[3] „ https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/novelle-eeg-gesetz-2023-2023972," [Online].

[4] „https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/novelle-eeg-gesetz-2023-2023972," [Online].

[5] „www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/energiewende-beschleunigen-2040310#:~:text=Bis%202030%20soll%20der%20Bruttostromverbrauch,als%20zehn%20Jahren%20fast%20verdoppeln," [Online].

[6] C. GmbH, „Batteriespeicher in Netzen Schlussbericht," 2022.

[7] PKNS, „ Bericht über die Arbeit der Plattform Klimaneutrales Stromsystem," 2024.

[8] F.-I. f. S. E. ISE, „Wege zu einem Klimaneutralen Energiesystem," 2020.

[9] F.-. I. f. S. E. ISE und F.-. I. f. S.-. u. I. ISI, „Eine Wasserstoff- Roadmap für Deutschland," 2019.

[10] IN4climate.NRW, „Prozesswärme für eine klimaneutrale Industrie," 2022.

[11] I. Feuerverzinken, „https://www.feuerverzinken.com/," 2024. [Online].

[12] P. P. u. M. Huckshold, Handbuch Feuerverzinken 4. Auflage, Wiley Verlag, 2016.

[13] E. G. B. J. M. S. K. G. C. G. R. S. Aries, „Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Ferrous Metals Industry," European Commission, 2022.

10. Anhang

Präsentation ESFORIN

ES·FOR·IN
Energy Services for Industry

ZINQ Technologie GmbH
Hybride Prozesswärme
-- Exkurs: Wärmebatterien --

Praxisnahe Untersuchung zur netzdienlichen Nutzung der Erzeugung von Prozesswärme durch hybride Wärmezufuhr bei der ZinQ GmbH

30.09.2024

Methodik: Simulation der erwarteten Erlösmöglichkeiten einer Flexibilität im Kurzfristhandel der EPEX-Spot inklusive Wärmebatterie

- Simuliert wird über den kontinuierlichen Handel der EPEX-Spot – Ohne Teilnahme an den Auktionen
- Für den kontinuierlichen Handel werden sämtliche Trades betrachtet und keine Vereinfachungen mit Hilfe von Indizes oder Hochrechnungen durchgeführt
- Die Simulationsergebnisse werden mit in der Realität erzielten Ergebnissen validiert
- Resultat ist ein (viertel-) stündliches Ergebnis und ein (viertel-) stündlicher Fahrplan

© ESFORIN SE 2024

Annahmen für die Simulation der Wärmebatterien

- Lastgang: Fahrplan von Jan - Sep 2024
- Handel bis Gate Closure: 5 Minuten vor Lieferbeginn
- Gaspreisreferenz: EGSI
- Stromprodukte: Viertelstunden
- Maximale Leistung: 6 MW

Wärmebatterie Kapazität	**10 MWh**	**20 MWh**	**40 MWh**
Gesamtergebnis (Jan-Sep)	**199 T€**	**221 T€**	**239 T€**
Vollzyklen	**362**	**204**	**112**
Ertrag pro Vollzyklus	**549 €**	**1085 €**	**2128 €**
Elektrifizierung Lastgang	**69%**	**78%**	**85%**
Wirkungsgrad Batterie	**100%**	**100%**	**100%**
Wirkungsgrad Strom	**75%**	**75%**	**75%**
Wirkungsgrad Gas	**75%**	**75%**	**75%**
Durchschnittlicher Grenzpreis	**56,90 €/MWh**	**56,90 €/MWh**	**56,90 €/MWh**
Gemeldete Flexibilitätsmenge	**17541 MWh**	**17541 MWh**	**17541 MWh**
Netzentgelte enthalten? (LP+AP)	**Nein**	**Nein**	**Nein**

© ESFORIN SE 2024

ES·FOR·IN
Energy Services for Industry

Backup

ES·FOR·IN
Energy Services for Industry

ZINQ Technologie GmbH Hybride Prozesswärme

Praxisnahe Untersuchung zur netzdienlichen Nutzung der Erzeugung von Prozesswärme durch hybride Wärmezufuhr bei der ZinQ GmbH

30.09.2024

Potentialermittlung:
ZINQ Technologie GmbH Hybride Prozesswärme

ES·FOR·IN
Energy Services for Industry

- Ziel der Simulation
- Methodik
- Annahmen für die Simulationen
- Übersicht Monatliche Erträge
- Abrufprofil
- Überblick negative Preise an der EPEX SPOT

ES·FOR·IN
Energy Services for Industry

Ziel:
Abschätzung der durch die Bivalenz geschaffenen monetären Erlöspotenziale im kurzfristigen Stromhandel

Methodik: Simulation der erwarteten Erlösmöglichkeiten einer Flexibilität im Kurzfristhandel der EPEX-Spot

- Simuliert wird über Day Ahead Auktion, Intraday Auktion und den kontinuierlichen Handel der EPEX-Spot
- Für den kontinuierlichen Handel werden sämtliche Trades betrachtet und keine Vereinfachungen mit Hilfe von Indizes oder Hochrechnungen durchgeführt
- Die Simulationsergebnisse werden mit in der Realität erzielten Ergebnissen validiert
- Resultat ist ein (viertel-) stündliches Ergebnis und ein (viertel-) stündlicher Fahrplan

© ESFORIN SE 2024

Annahmen für die Simulationen

- Lastgang:
  Fahrplan aus dem Jahr 2023 und bis Sep 2024
- Handel bis Gate Closure:
  5 Minuten vor Lieferbeginn

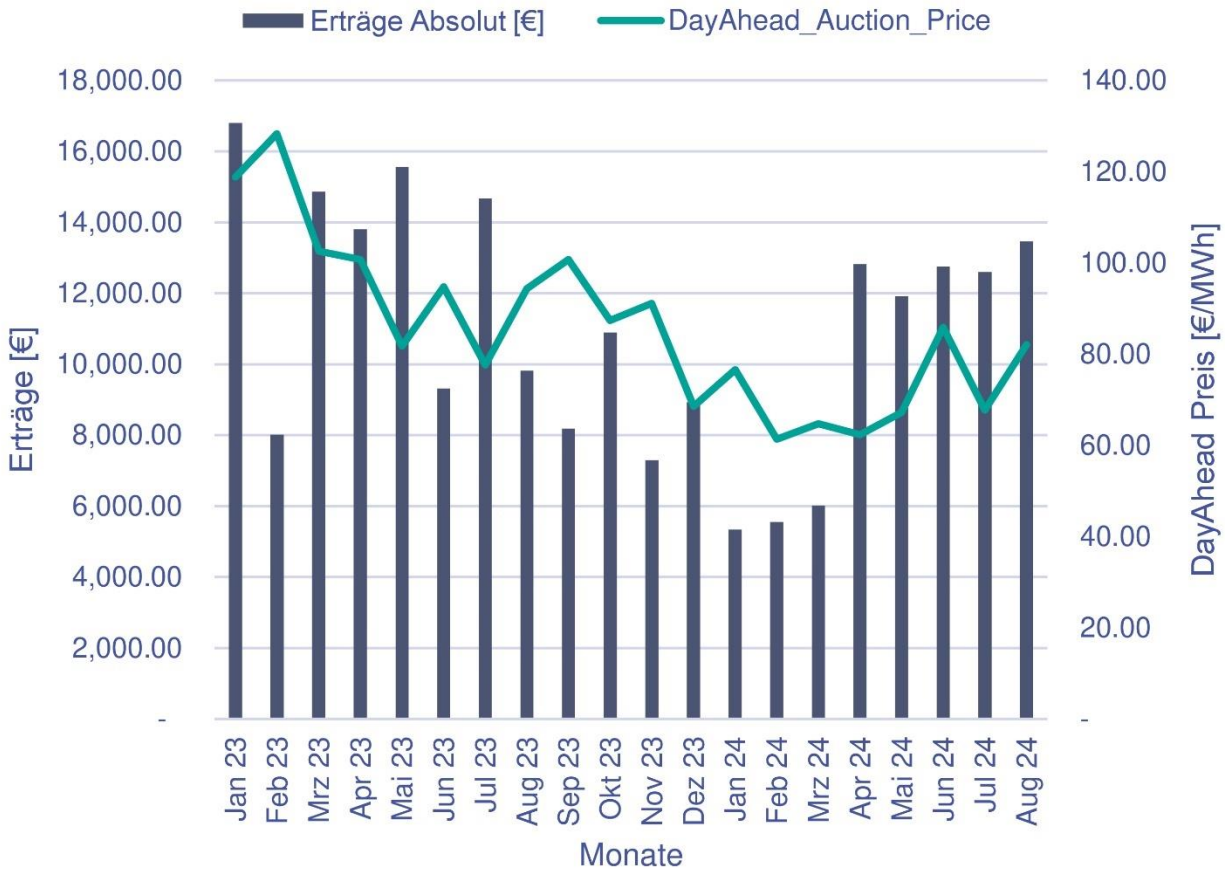
	2023	2024 (bis Sep)
Gaspreisreferenz	**EGSI**	**EGSI**
Strompreisreferenz	**Intraday Auktion**	**Intraday Auktion**
Stromprodukte	**Viertelstunden**	**Viertelstunden**
Wirkungsgrad Strom	**75%**	**75%**
Wirkungsgrad Gas	**75%**	**75%**
Durchschnittlicher Grenzpreis	**67,67 €/MWh**	**54,30 €/MWh**
Durchschnittliche Leistung	**1,1 MW**	**0,9 MW**
Maximale Leistung	**3,1 MW**	**3,0 MW**
Kumulierte Flexibilitätsmenge	**9341 MWh**	**5730 MWh**
Grenzpreis Änderung	**täglich**	**täglich**
Netzentgelte enthalten? (LP+AP)	**Nein**	**Nein**

© ESFORIN SE 2024

Übersicht Monatliche Erträge

Überblick zu den Jahresergebnissen:

- Gesamtertrag:
  2023: 138 T€
  2024 (YTD 23.09): 88 T€
- Ertrag pro MWh gemeldet:
  2023: 14,81 €/MWh
  2024 (YTD 23.09): 15,28 €/MWh
- Ersetze Menge durch Strom:
  2023: 2031MWh
  (20% substituiert)
  2024 (YTD): 1421 MWh
  (25% substituiert)
- -> Mit flexibleren Lastgängen und höheren Leistungswerten der Anlage sind deutlich höhere Ergebnisse zu erreichen

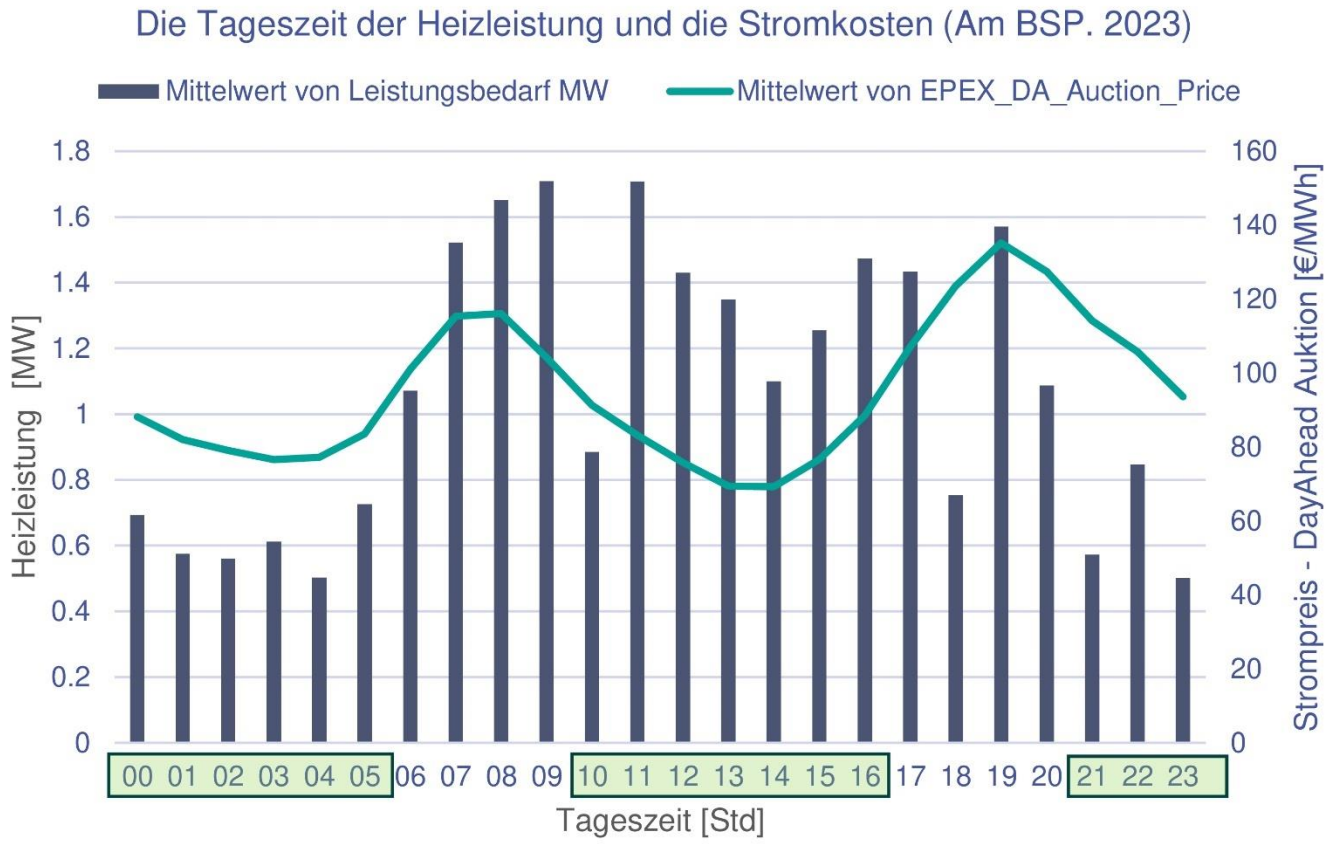


© ESFORIN SE 2024

Wann sollte elektr. Energie für die Beheizung genutzt werden?

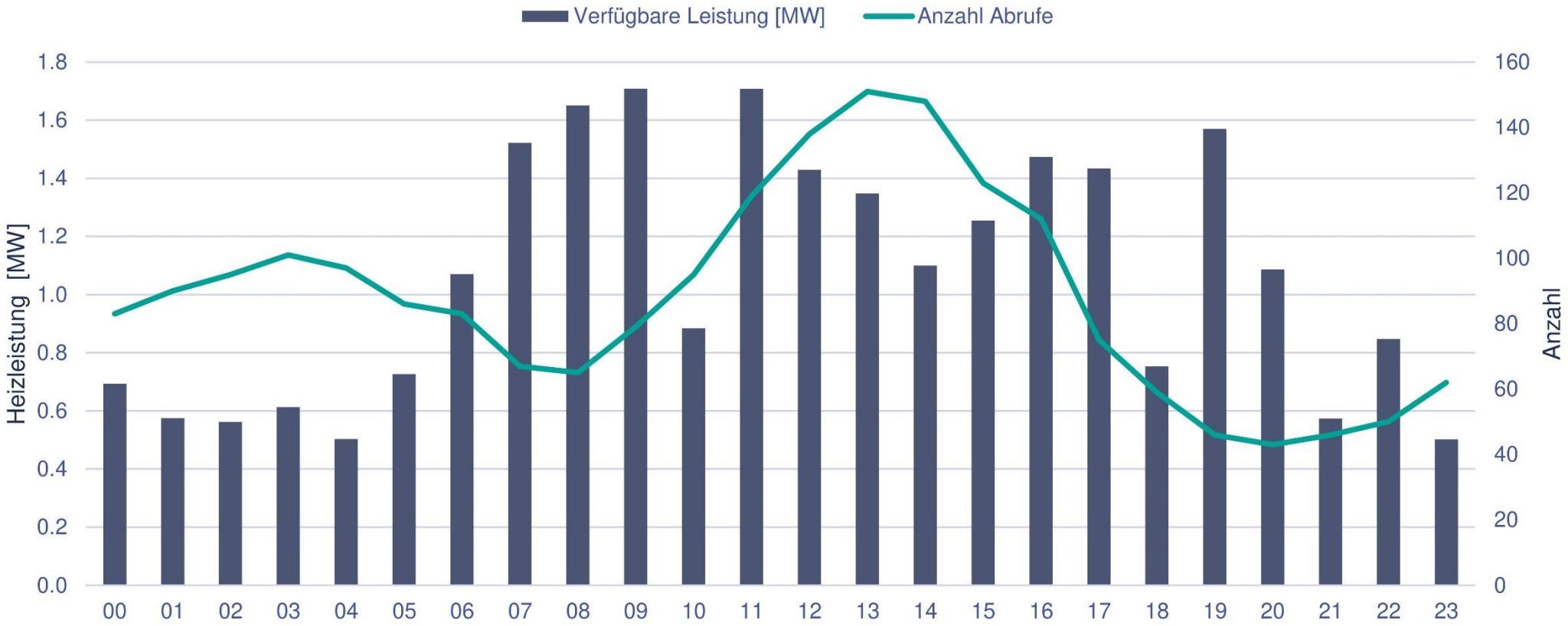
- **Status Quo:**
  Strompreisunabhängige Beheizung, i.d.R. zu den teuersten Stunden

- **Optimal für elektrische Beheizung:**
  Strompreisorientierte Beheizung,
  zB. Mittags und Offpeak



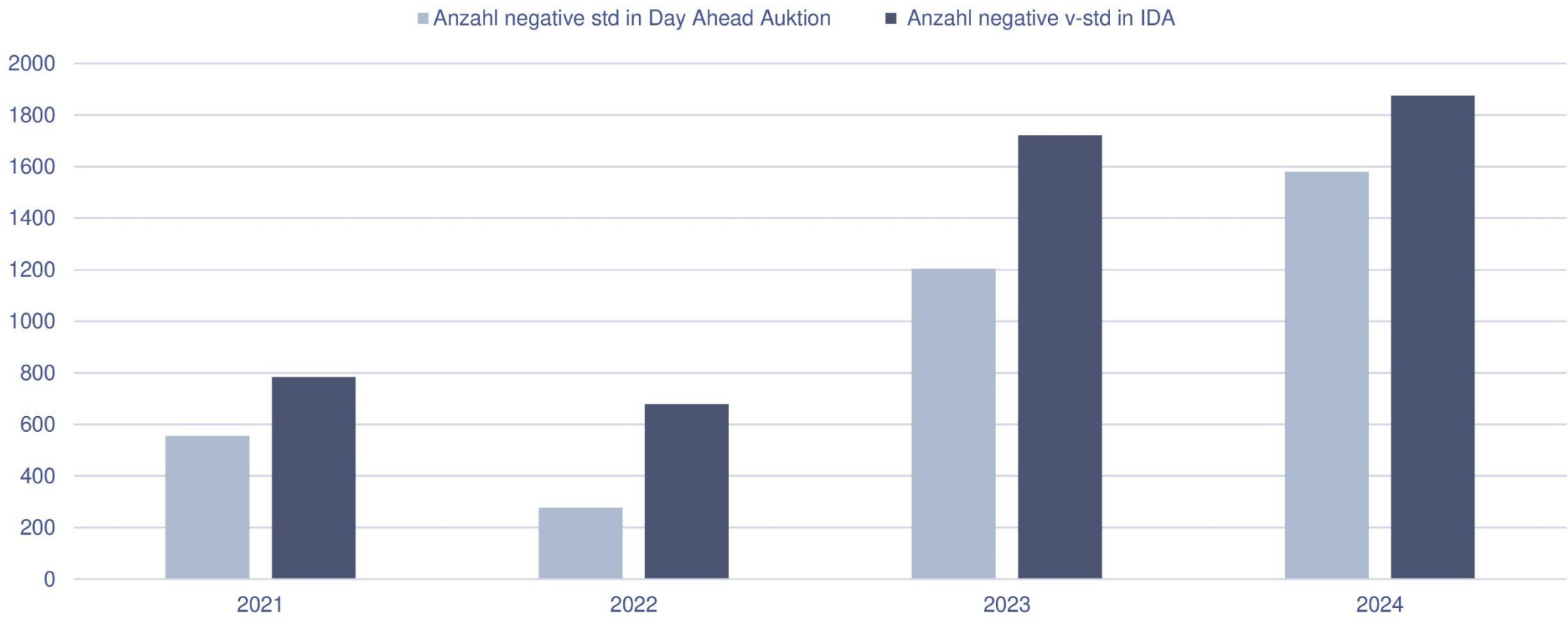
© ESFORIN SE 2024

Wann wurde in der Simulation die Beheizung durch elektr. Energie erzeugt? (Am Beispiel 2023)



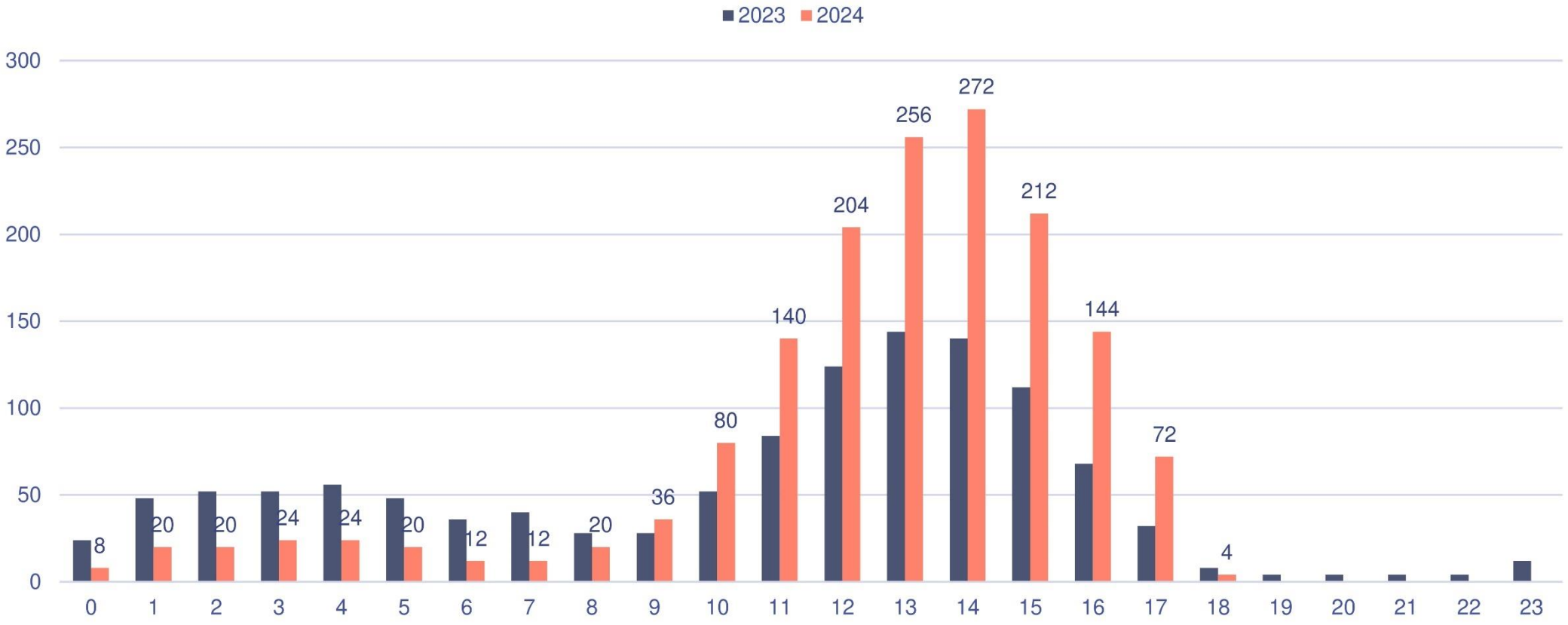
© ESFORIN SE 2024

Anzahl negativer Preise in Day Ahead Auktion und Intraday Auktion



© ESFORIN SE 2024

Anzahl negativer Stundenpreise in der DayAhead Auktion je Uhrzeit



© ESFORIN SE 2024

ES·FOR·IN
Energy Services for Industry
RETHINK ENERGY.
RESHAPE ECONOMY.