

# Potenzialanalyse zur Hybridisierung von Prozessen in der Grundstoffindustrie

**Frank Veitengruber<sup>1</sup>, Christa Dufter, Anna Gruber, Tobias Hübner,  
Andrej Guminski, Britta Kleinertz, Serafin von Roon**

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München,  
+49 89 158121-48, fveitengruber@ffe.de, www.ffegmbh.de

## **Kurzfassung:**

Im Zuge des Ausbaus volatiler, erneuerbarer Energieerzeugung ist es zunehmend von Bedeutung, einen netzdienlichen Betrieb von Verbrauchern zu etablieren [1]. Eine Möglichkeit besteht in der hybriden Erzeugung industrieller Prozesswärme für die energieintensive Grundstoffindustrie.

Ziel der Publikation ist es, sowohl Hybridisierungspotenziale als auch branchenübergreifende -hemmnisse von brennstoffbasierten Industrieprozessen am Beispiel der Glas-, Papier- und Zementindustrie aufzuzeigen. Die entwickelte Methodik besteht aus einer vorgelagerten Technologieanalyse sowie einer Branchen- und Potenzialanalyse. Je Industriezweig werden zunächst geeignete Prozessschritte mit Hilfe eines Kriteriums zur Hybridisierung identifiziert. Anhand der Übereinstimmung und Verknüpfung der Prozesseigenschaften mit den Technologiekriterien findet eine prozessspezifische Technologieauswahl elektrothermischer Verfahren statt. Auf dieser Basis wird das Hybridisierungspotenzial in Form eines technischen Substitutionspotenzials für eine hybride Wärmeerzeugung quantifiziert. Abschließend werden im Rahmen von Experteninterviews ermittelte Hemmnisse für eine hybride Prozesswärmebereitstellung aufgezeigt.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 03SFK300 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**Keywords:** Hybridisierung, Potenzialanalyse, Hybride Prozesswärme, Thermoelektrische Erwärmungsverfahren, Flexibilität, Grundstoffindustrie

---

<sup>1</sup> Jungautor

# 1 Einleitung

Nachfolgend wird in Kapitel 1.1 zunächst die Ausgangssituation, Motivation und Zielsetzung erläutert. Anschließend wird in Kapitel 1.2 die entwickelte Methodik näher beleuchtet.

## 1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Infolge der fluktuierenden erneuerbaren Energieerzeugung wird es zunehmend wichtiger, Flexibilität auf Verbraucherseite zu schaffen. Eine Möglichkeit stellt die Hybridisierung der industriellen Prozesswärme dar. [1] Diese kann insbesondere für Bestandsanlagen als Zwischenlösung auf dem Weg zu einer dekarbonisierten, flexiblen und erneuerbaren Energieversorgung dienen. [2] Im Rahmen dieses Papers steht der Konversionspfad von einer derzeit brennstoffbasierten hin zu einer hybriden Wärmebereitstellung im Fokus. Unter dem Begriff der hybriden Wärmeerzeugung ist ein kombiniertes Wärmebereitstellungssystem zu verstehen, das entweder zwischen brennstoffbasierter und thermoelektrischer Wärmeerzeugung umschalten oder dessen Erzeugungsverhältnis flexibel verschieben kann [3]. Dadurch soll einerseits mehr Flexibilität bei der Stromnachfrage geschaffen werden, um auf die zunehmend fluktuierende, erneuerbar erzeugte Elektrizität im Stromnetz zu reagieren. Andererseits soll neben der potenziellen Netzentlastung und verbesserten Integration erneuerbarer Energien auch eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen und Energiebezugskosten für die energieintensive Grundstoffindustrie erreicht werden. [4], [5] Das Ziel der Publikation ist es, sowohl Hybridisierungspotenziale als auch branchenübergreifende -hemmnisse von brennstoffbasierten Industrieprozessen aufzuzeigen. Darüber hinaus soll die entwickelte Methodik als exemplarischer Leitfaden verstanden werden, der auf weitere Branchen übertragen werden kann.

## 1.2 Methodik

Um das Hybridisierungspotenzial am Beispiel der Grundstoffindustrie zu evaluieren, ist eine Betrachtung mehrerer Analysepfade erforderlich (vgl. **Abbildung 1**). Durch eine vorgelagerte Technologieanalyse werden Kriterien für den Einsatz elektrothermischer Erwärmungsverfahren evaluiert. Anschließend wird unter Berücksichtigung der Erkenntnisse eine mehrstufige Branchen- bzw. Prozessanalyse angewandt. Letztere wird im Rahmen dieser Veröffentlichung am Beispiel der Branchen Glas, Papier und Zement durchgeführt.

- Zunächst ist für jeden Prozessschritt das Hybridisierungskriterium „Vorliegen einer brennstoffbasierten Beheizung“ zu prüfen. Die Erfüllung des Kriteriums ist eine Grundvoraussetzung, ob ein Prozessschritt einer weiterführenden Betrachtung unterzogen wird oder nicht. Dadurch wird sichergestellt, dass keine bereits elektrifizierten Prozesse, sondern ausschließlich mit Brennstoffen betriebene Prozesse für Hybridisierungsmaßnahmen betrachtet werden.
- In einem weiterführenden Schritt werden darauf aufbauend und unter Berücksichtigung der eingangs definierten Kriterien einer elektrothermischen Erwärmung entsprechende Integrationspunkte für ein hybrides Heizsystem identifiziert, die zur flexibel wechselnden Prozesswärmebereitstellung dienen können.

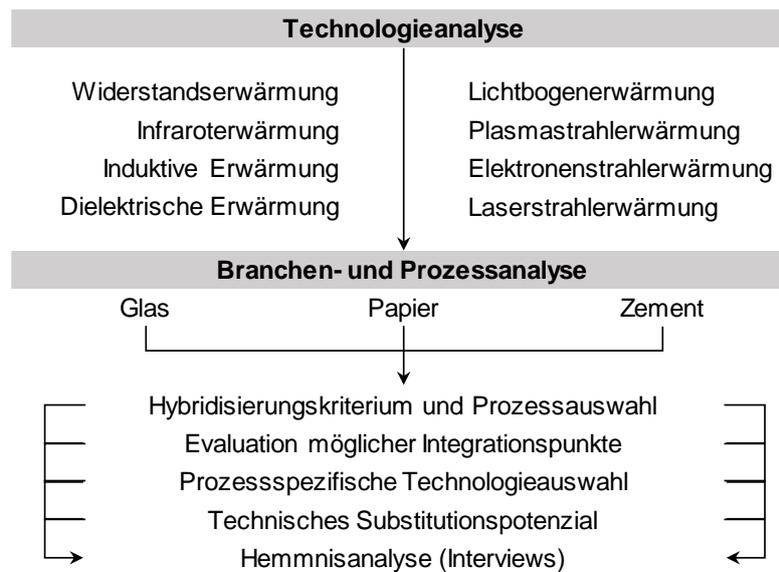


Abbildung 1: Methodik zur Potenzialermittlung

- Die prozessspezifische Technologieauswahl elektrothermischer Verfahren, die sich theoretisch für eine lokal hybride Prozesswärmebereitstellung eignen, ergibt sich anhand der Übereinstimmung und Verknüpfung der Prozesseigenschaften mit den Technologiekriterien. Anhand dessen wird das technische Substitutionspotenzial der hybriden Wärmeerzeugung ermittelt.
- Abschließend wird eine Hemmnisanalyse durchgeführt, bei der sowohl prozess- als auch anwendersensitive Gesichtspunkte evaluiert und diskutiert werden, die im Hinblick auf eine hybride Prozesswärmebereitstellung zu beachten sind.

## 2 Technologieanalyse thermoelektrischer Erwärmungsverfahren

Zu den thermoelektrischen Erwärmungsverfahren zählen grundsätzlich alle Technologien, bei denen Wärme in Form von Nutzenergie durch den Einsatz von elektrischer Energie erzeugt wird. Dies ist bei der Widerstands-, Infrarot-, induktiver und dielektrischer Erwärmung sowie der Lichtbogen-, Plasma-, Elektronen- und Laserstrahlerwärmung der Fall. Nicht berücksichtigt werden Technologien wie zum Beispiel die elektrische Wärmepumpe, bei denen elektrische Energie zum mechanischen Antrieb eines Verdichters genutzt wird, um thermische Energie mittels eines thermodynamischen Kreisprozesses auf ein höherwertigeres Niveau anzuheben. In diesen Fällen ist in der Regel das erzielbare Temperaturniveau zur Bereitstellung der industriellen Prozesswärme für Prozesse in der Grundstoffindustrie nicht ausreichend. **Tabelle 1** gibt einen Überblick zu den Technologiecharakteristika der elektrothermischen Erwärmungsverfahren.

Die Beheizungsart stellt ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal dar. Hierbei kann einem Objekt direkt elektrische Energie zugeführt werden, sodass eine Erwärmung unmittelbar im Stoff selbst stattfindet. Im Fall einer indirekten Erwärmung wird elektrische Energie außerhalb des Erwärmungsgutes in Wärme umgewandelt und anschließend meist aus einer Kombination von Konvektion, Wärmestrahlung oder Wärmeleitung auf das zu erwärmende Objekt übertragen. [6]

Je Technologie sind in Tabelle 1 mögliche Temperaturbereiche ausgewiesen, die als literarische Richtwerte zu verstehen sind. In der Praxis sind deutliche Abweichungen aufgrund vielfältiger Einflussfaktoren, wie zum Beispiel die elektrische Leitfähigkeit, Form, Beschaffenheit und Schüttdichte des Stoffes, möglich. Zusätzlich weisen technische Restriktionen auf potenzielle Einschränkungen zur Integration eines elektrothermischen Verfahrens hin. Im Folgenden wird die Funktionsweise der einzelnen Technologien beschrieben.

*Tabelle 1: Technologiecharakteristika elektrothermischer Erwärmungsverfahren [6]<sup>a</sup>, [7]<sup>b</sup>, [8]<sup>c</sup>, [9]<sup>d</sup>, [10]<sup>e</sup>, [11]<sup>f</sup>, [12]<sup>g</sup>, [13]<sup>h</sup>, [14]<sup>i</sup>, [15]<sup>j</sup>, [16]<sup>k</sup>, [17]<sup>l</sup>*

Technologie	Beheizungsart		Temperaturbereich	Technische Restriktionen
	direkt	indirekt		
Widerstandserwärmung <sup>a</sup>	x		bis ca. 3.000 °C	Nur für elektrisch leitfähige Materialien, anwendungsspezifische Verfahren
Infrarot Erwärmung <sup>a</sup>		x	bis ca. 2.000 °C	Universell einsetzbar
		x	bis ca. 2.100 °C	Hauptsächlich für Oberflächenerwärmung
Induktive Erwärmung <sup>a,b,c</sup>	x		abhängig von Frequenz	Nur für elektrisch leitfähige Materialien, möglichst gleichförmige Geometrie des Erwärmungsgutes
		x		Elektrisch leitendes Gefäß für konvektiven Wärmeübergang notwendig
Dielektrische Erwärmung <sup>a,b,d,e,f</sup>	x		bis ca. 1.800 °C	Nur für elektrisch nichtleitende Materialien mit polaren Eigenschaften (z. B. Wasser, Salze); Wärmeumwandlung material-, temperatur- und frequenzabhängig
Lichtbogenerwärmung <sup>a,b,g,h</sup>	x		ca. 1.000 - 2.500 °C	Nur für elektrisch leitfähige Materialien, i. d. R. für Schmelzvorgänge, diskontinuierliche Betriebsweise
		x		Anwendungsspezifische Verfahren
Plasmastrahlerwärmung <sup>a,i,j</sup>		x	ca. 1.000 - 5.000 °C	Arbeitsgas (Ar, H <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> oder Luft) erforderlich, wird zusätzlich in Prozess eingebracht
Elektronenstrahlerwärmung <sup>a</sup>	x		ca. 2.300 - 2.700 °C	Hochvakuum erforderlich
Laserstrahlerwärmung <sup>a,k,l</sup>		x	k. A.	Nur zur punktuellen Erwärmung; Einflussgrößen: Strahleinfallswinkel, umgebende Atmosphäre und Materialeigenschaften

- Die Widerstandserwärmung basiert auf dem Prinzip der Umwandlung von elektrischer Energie in joulesche Wärme. Der Widerstand kann entweder das Erwärmungsgut selbst oder ein Heizleiter sein, der die Wärme indirekt auf das Erwärmungsgut überträgt. [6], [18]
- Demzufolge ist auch die elektrische Infrarot Erwärmung eine Form der indirekten Widerstandserwärmung. In diesem Fall wird ein Heizleiter erhitzt, der Wärmestrahlung in einem definierten Wellenlängenspektrum emittiert und vom zu erwärmenden Objekt absorbiert wird [19].
- Bei der induktiven Erwärmung wird hauptsächlich die Erwärmungsmethode ohne Eisenkern angewandt. Um einen wechselstromdurchflossenen Leiter baut sich ein magnetisches Wechselfeld auf, das durch das Erwärmungsgut gerichtet wird und sich infolgedessen unmittelbar selbst erwärmt. [7] Die Eindringtiefe der Erwärmung ist in Abhängigkeit der Frequenz (50 Hz bis 3 MHz) regelbar und nimmt mit steigender Frequenz ab [8]. Bei einer indirekten Erwärmung erfolgt ein konvektiver Wärmeübergang vom elektrisch leitenden, induktiv erwärmten Behälter hin zum nichtleitenden Erwärmungsgut [6].

- Das Verfahren der dielektrischen Erwärmung ist auf elektrisch nichtleitende Stoffe mit polaren Eigenschaften beschränkt. Ein elektromagnetisches Wechselfeld bewirkt eine kontinuierliche Schwingung elektrisch polarisierter Moleküle. Die dadurch entstandene Molekülreibung bedingt eine gleichzeitige Wärmeentwicklung des gesamten Objektvolumens. [7] Durch das Angrenzen der Oberfläche an die kalte Umgebungsluft liegt im Fall der dielektrischen Erwärmung ein inverser Temperaturverlauf von innen nach außen vor. [9]
- Die Lichtbogenerwärmung wird typischerweise für Schmelzvorgänge metallischer Materialien angewandt [7]. Durch das Anlegen einer ausreichend hohen Spannung wird ein Lichtbogen initiiert, wodurch sich ein Stromfluss im ionisierten Gas des Lichtbogens einstellt. Grundsätzlich kann die Erwärmung direkt oder indirekt erfolgen. Im Fall der direkten Erwärmung brennt der Lichtbogen zwischen einer Elektrode und dem Erwärmungsgut, sodass die Wärme durch Konvektion, Wärmeleitung und -strahlung übertragen wird. Bei der indirekten Lichtbogenerwärmung brennt der Lichtbogen zwischen mehreren Elektroden, ohne das Erwärmungsgut zu berühren. Die Erwärmung erfolgt durch Strahlung und Konvektion. [13]
- Die Plasmastrahlerwärmung ist mit der Lichtbogenerwärmung verwandt, da prinzipiell alle Arten von Lichtbögen ein Plasma in Form eines ionisierten Gaskanals erzeugen [15]. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass in diesem Fall ein strömendes Arbeitsgas Verwendung findet, wodurch das Plasma gezielt für den Energietransport und die Wärmeübertragung auf das Erwärmungsgut genutzt wird [6].
- Bei der Elektronenstrahlerwärmung werden Elektronen an einer heißen Glühkathode der Elektronenstrahlkanone erzeugt und unter Hochspannung beschleunigt. Beim Auftreffen der Elektronen auf das Zielobjekt wird deren kinetische Energie durch elastische Zusammenstöße mit äußeren Hüllelektronen einzelner Stoffteilchen abgebaut und in Wärme umgewandelt. [6]
- Bei der Laserstrahlerwärmung werden masselose Photonen in einem Laser erzeugt und mittels eines optischen Systems auf das zu erwärmende Objekt fokussiert. Abhängig vom Absorptionsgrad des Erwärmungsguts regt ein Teil der Photonenenergie im Zielobjekt Gitterschwingungen an, die in Wärme umgewandelt werden. [17]

Zur Potenzialermittlung im Rahmen der nachfolgenden Branchenanalyse sind in **Tabelle 2** entsprechende prozessbezogene Wirkungsgrade für die elektrothermischen Erwärmungsverfahren zusammengefasst. Neben dem Technologiewirkungsgrad werden die Verluste, die bei und bis zu der Erwärmung eines Objektes oder Stoffes auftreten, berücksichtigt. Prozessbezogene Wirkungsgrade im Rahmen konventioneller Erwärmungsverfahren sind in **Tabelle A-1** im Anhang einzusehen.

Tabelle 2: Prozessbezogene Wirkungsgrade elektrothermischer Erwärmungsverfahren [6]<sup>a</sup>, [18]<sup>b</sup>, [20]<sup>c</sup>, [19]<sup>d</sup>, [21]<sup>e</sup>

Technologie	Beheizungsart		Wirkungsgrad	Bemerkungen
	direkt	indirekt		
Widerstandserwärmung	x		70 % <sup>a,b</sup>	Wirkungsgrad eines Elektrodenkessels ca. 99 % <sup>c</sup>
		x	60 % <sup>b</sup>	Wirkungsgrad eines Elektrokessels ca. 95 % <sup>ES</sup>
Infraroterwärmung		x	78 % <sup>d</sup>	
Induktive Erwärmung	x		75 % <sup>UES</sup>	Frequenzabhängig, 50 % (3 MHz) - 99 % (50 Hz) <sup>a</sup>
		x	70 % <sup>b</sup>	
Dielektrische Erwärmung - Hochfrequenzerwärmung - Mikrowellenerwärmung	x		49 % <sup>a</sup>	Große Verluste durch Hochspannungstrafo, Magnetron und Rückstrahlung
Lichtbogenerwärmung	x		73 % <sup>a</sup>	
		x	68 % <sup>OES</sup>	
Plasmastrahlerwärmung		x	70 % <sup>a</sup>	
Elektronenstrahlerwärmung	x		70 % <sup>e</sup>	
Laserstrahlerwärmung		x	6 % <sup>a</sup>	Große optische Verluste und Zusatzverbraucher

<sup>ES</sup> Expertenschätzung, <sup>UES</sup> Untere Expertenschätzung, <sup>OES</sup> Obere Expertenschätzung

Die industrielle Wärmeversorgung ist für die thematisierten Erwärmungsverfahren grundlegend in zwei Integrationsebenen zu unterteilen: die Versorgungsebene und die Prozessebene. Die Versorgungsebene dient als Wärmeversorgung für untergeordnete Prozessschritte und Anwendungen. Eine zentrale Einbindung in den vorhandenen Heizkreis ist möglich [22]. Für eine Hybridisierung von Wärmenetzen auf Versorgungsebene bietet sich beispielsweise auch eine Kaskadenschaltung mehrerer Wärmeerzeuger an, um Temperaturen auf höherem Niveau möglichst effizient bereitzustellen [23]. Im Gegensatz dazu besteht auf Prozessebene die Option einer dezentralen Einspeisung, wodurch einzelne Anwendungen direkt mit dem individuell benötigten Temperaturniveau versorgt werden [22].

### 3 Branchen- und Potenzialanalyse

In den Kapiteln 3.1 bis 3.3 wird die entwickelte Methodik zur Branchen- und Potenzialanalyse auf die Glas-, Papier- und Zementindustrie angewandt. Je Branche erfolgt zunächst eine Prozessbeschreibung. Auf dieser Basis werden relevante Prozesse identifiziert, eine Technologieauswahl vorgenommen und Hybridisierungsoptionen aufgezeigt. Anschließend folgt die Quantifizierung des Hybridisierungspotenzials sowie eine Hemmnisanalyse.

#### 3.1 Glasindustrie

Die Glasproduktion untergliedert sich grundlegend für alle Glasprodukte zur Herstellung von Behälter-, Flach-, Faser- oder Spezialglas in sechs Prozessschritte, siehe **Abbildung 2**.



Abbildung 2: Prozessablaufschritte der Glasherstellung, Eigene Darstellung in Anlehnung an [4], [24], [25], [26], [27]

In einem ersten Schritt werden mineralische und chemische Rohstoffe sowie Recycling- und Eigenscherven miteinander vermischt, um die benötigte chemische Zusammensetzung an Oxidverbindungen in der Schmelze einzustellen. Anschließend folgt das Einschmelzen des Gemenges zu einer blasenfreien und thermisch homogenen Schmelze. Je nach Produkt

variiert die darauffolgende Formgebungsmethode. Das Abkühlen und Entspannen der geformten Glasprodukte findet in Kühlöfen statt, um mechanische Spannungen kontrolliert abzubauen. Abschließend erfolgt gegebenenfalls eine zusätzliche Veredelung sowie die Qualitätsprüfung und Verpackung der Produkte. [4]

### 3.1.1 Relevante Prozesse

Nach dem Hybridisierungskriterium reduziert sich die Auswahl der Prozessschritte zur weiteren Betrachtung auf den fossil beheizten Schmelzprozess sowie auf das nachgelagerte Entspannen in den Kühlöfen.

Zum Einsatz für den energieintensiven Schmelzprozess kommen entweder gasbefeuerte Schmelzaggregate, gegebenenfalls mit Elektrozusatzheizung (EZH), für Produktionsmengen von bis zu 1.000 t/d oder vollelektrische Schmelzeinheiten (VES) für Tonnagen von bis zu 50 t/d. Hierbei weisen die derzeit weltgrößten vollelektrischen Wannenöfen eine tägliche Produktionsrate von ca. 200 t/d auf. [4]

Der energieintensive Kernprozess beim Einschmelzen des Gemenges zu einer blasenfreien und thermisch homogenen Schmelze findet im Bereich von ca. 1.400 °C bis 1.700 °C statt. Der spezifische Energiebedarf liegt für Behälterglas (BG) in der Größenordnung von ca. 1,3 MWh/t verkaufsfähigem Glas und variiert je nach Gemengezusammensetzung. Bei der Flachglasproduktion (FG) nimmt der Schmelzprozess einen Anteil von ca. 65 % des gesamten Energiebedarfs ein und weist einen spezifischen Energiebedarf von ca. 1,6 MWh/t auf. Die Beheizung erfolgt vereinzelt vollelektrisch oder meist mit brennstoffbeheizten Feuerungsanlagen, die in der Regel in horizontaler Ebene angeordnet sind und oftmals Gas als Primärenergieträger verwenden. Um bei einer nicht ausreichenden Flammeneindringtiefe, hohen Durchsatzraten und je nach Glassorte die erforderlichen physikalischen Eigenschaften einzuhalten, kommt bei Bedarf eine elektrische Zusatzheizung zum Einsatz. Dies ist allerdings nicht als Hybridansatz im engeren Sinn zu verstehen, da technologisch bedingt zur homogenen Temperaturverteilung ein zeitgleicher Einsatz unterschiedlicher Energieträger – ca. 90 % Brennstoff, 10 % EZH – erforderlich ist. [4]

In den Kühlöfen wird die Temperatur des Ofenguts von ca. 600 °C bis auf Umgebungstemperatur reduziert, um mechanische Spannungen kontrolliert abzubauen. Der Energieeinsatz zur Beheizung der Kühlöfen beträgt ca. 10 bis 15 kWh/t. [4] Heutige Kühlöfen sind üblicherweise auf eine Strecke von bis zu ca. 100 m eingehaust und in mehrere Temperaturzonen unterteilt. Die Beheizung erfolgt meist über seitlich installierte Gasbrenner, die das Glasprodukt zoniert temperieren. [28]

### 3.1.2 Technologieauswahl und Hybridisierungsoptionen

Unter Beachtung der Technologiecharakteristika aus Tabelle 1 und Verknüpfung mit den zuvor beschriebenen prozessrelevanten Parametern ergibt sich die Technologieauswahl zur hybriden Prozesswärmebereitstellung (vgl. **Abbildung 3**).

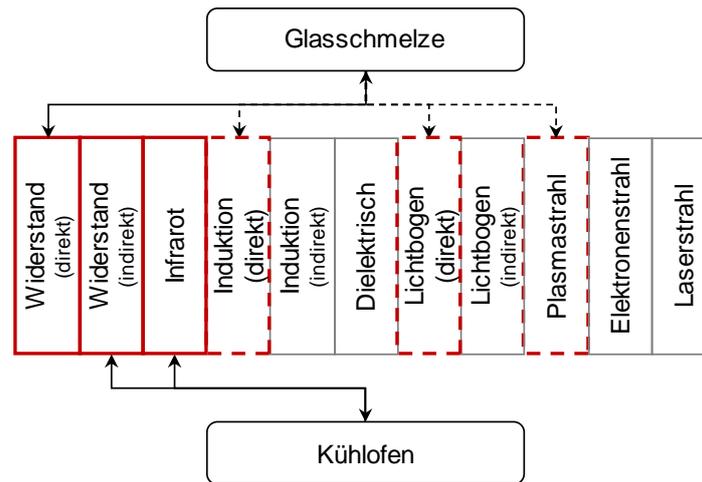


Abbildung 3: Technologien zur hybriden Prozesswärmebereitstellung in der Glasindustrie

Für einen (teil-) elektrifizierten Schmelzprozess sind prinzipiell nur Glassorten geeignet, die einen möglichst hohen Anteil an frei beweglichen Ionen aufweisen, beispielsweise alle Natron-Kalk-Gläser [29]. Die Ionen reduzieren maßgeblich den elektrischen Widerstand und begünstigen bei hohen Temperaturen einen direkten Stromfluss im Erwärmungsgut. Sowohl bei der EZH als auch bei einer VES werden nach aktuellem Technikstand überwiegend Molybdänelektroden für eine direkte Widerstandserwärmung eingesetzt. [30] Für eine Teil- oder vollelektrische Schmelze bei brennstoffbeheizten Bestandsanlagen liegen Maßnahmen zur Hybridisierung entweder in einem Ausbau der EZH oder in einer Umrüstung auf eine vollelektrische Schmelzwanne. Beide Optionen weisen jedoch deutliche Umsetzungshemmnisse auf, die Kapitel 3.1.4 zu entnehmen sind.

Darüber hinaus ist eine Glasschmelze mittels direkter Induktion, beispielsweise an einem Induktortiegel [31], mittels direkter Lichtbogen- oder einer Plasmastrahlerwärmung denkbar. Dieser Ansatz befindet sich aber noch im Forschungsstadium und ist nach derzeitigem Kenntnisstand auch aufgrund des hohen spezifischen Energieverbrauchs nur für geringe Tonnagen von Spezialgläsern und -produkten geeignet [29]. Alle anderen elektrothermischen Verfahren liegen außerhalb der technischen Anforderungen für einen elektrifizierten Schmelzprozess oder erfüllen diese nicht.

### 3.1.3 Hybridisierungspotenzial

Als Hybridisierungspotenzial wird im Folgenden in **Abbildung 4** das technische Substitutionspotenzial ausgewiesen, das unter der Bedingung einer gegebenen Integrationsmöglichkeit und eines zeitweise vollelektrischen Betriebes vorliegt. Im Fall der Glasherstellung wird die Potenzialbetrachtung für den Schmelzprozess auf die Behälter- und Flachglasherstellung eingeschränkt, die zusammen über 80 % der Jahres-Gesamtproduktionsmenge aller Glasarten verkörpern.

Im Fall der Spezialglasproduktion, die ca. 5 % der gesamten Jahres-Glasproduktionsmenge aller Glasarten darstellt, hängt die elektrische Leitfähigkeit von der zu erschmelzenden Glasart ab und damit von der jeweiligen Glaszusammensetzung. Bei der Vielzahl der Glasarten ist eine generelle Aussage der Eigenschaften zum Spezialglas nicht möglich. [29] Aufgrund eines zu hohen Spezialisierungsgrades eines jeden Prozessschrittes im

Spezialglasbereich ist eine detailliertere Betrachtung nicht gegeben. Folgend wird auf diesen Produktionszweig und ebenso auf die Glasfaserherstellung nicht näher eingegangen.

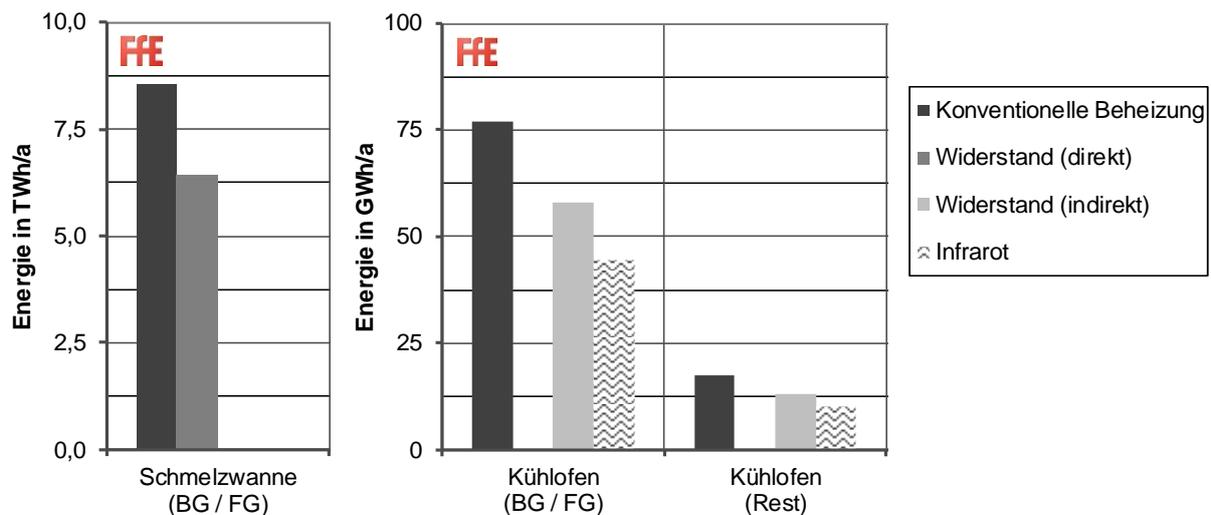


Abbildung 4: Technisches Substitutionspotenzial nach Prozess und Erwärmungsverfahren in der deutschen Glasindustrie

Bei einer Jahrestonnage von ca. 2,1 Mio. t (FG) und ca. 4,1 Mio. t (BG) wird in Abbildung 4 ersichtlich, dass in Summe zur konventionellen Beheizung der Behälter- und Flachglasschmelze ein Energiebedarf in Deutschland von ca. 8,5 TWh/a vorliegt. Für eine VES der gleichen Produktionsmenge in Verbindung mit einer direkten Widerstandsheizung reduziert sich der elektrische Energieeinsatz um ca. 2 TWh/a. Berücksichtigung finden bereits bestehende EZH an 45 BG-Wannen und 4 FG-Wannen, die in Summe einen elektrischen Energieeintrag von ca. 570 GWh<sub>el</sub>/a aufweisen und potenzialvermindernd wirken. Für die 60 BG-Wannen würde dies je BG-Schmelzwanne eine Steigerung des zusätzlichen elektrischen Leistungsbezugs um durchschnittlich ca. 7 MW<sub>el</sub> und für die 11 FG-Wannen je Wanne ca. 29 MW<sub>el</sub> bedeuten.

Für den konventionellen Energieeinsatz zum Entspannen in den Kühlöfen ergibt sich in Summe für Behälter- und Flachglas sowie Spezial- und Faserglas (Rest) ein Energiebedarf von ca. 94 GWh/a. Ein Betrieb mit einer 100 % hybriden Infrarotheizung würde den Energiebedarf um insgesamt 40 GWh/a senken bei einem zusätzlichen elektrischen Leistungsbezug von ca. durchschnittlich 7 kW<sub>el</sub> je vorhandener Schmelzwanne.

### 3.1.4 Hemmnisanalyse

Auf Basis der vorangegangenen Überlegungen und Ergebnisse wird ein Brancheninterview [32] durchgeführt, mit dem Ziel, technische, prozessbezogene Restriktionen sowie mögliche Umsetzungshemmnisse aufzuzeigen. Diese werden im Folgenden erläutert.

In der Glasindustrie gestaltet sich eine Hybridisierung des Schmelzprozesses als problematisch bis nicht durchführbar. Dies hat mehrere Gründe. Bei der Schmelze müssen die glasspezifischen Prozessparameter möglichst konstant eingehalten werden, um beispielsweise eine ideale Viskosität zur Weiterverarbeitung zu gewährleisten. Aus diesem Grund sind Temperaturschwankungen in der Schmelze auf  $\pm 5$  K begrenzt [4]. Jegliche Verzögerungen im Prozessablauf, die zu einem ungewollten, deutlichen Abkühlen der Glasschmelze führen, sind zu vermeiden, da dies die Zerstörung sämtlicher

schmelzeführender Teile zur Folge hätte. In Abhängigkeit der Glasart kann bei brennstoffbeheizten Schmelzwannen eine EZH zum Einsatz kommen. Hierbei ist die EZH bei Bestandsanlagen nicht beliebig skalierbar, um einen erhöhten Hybridisierungsgrad zu erreichen. Dies hätte neben einer geringeren Temperaturverteilung über dem Schmelzbad auch verminderte Abgasvolumina zur Folge und würde eine gänzlich neue Wannengeometrie sowie neue Feuerfestmaterialien erfordern. Das veränderte Abgasverhalten hätte zudem Auswirkungen auf nachgeschaltete Abgasreinigungsanlagen sowie sämtliche Peripherieprozesse, die einer Anpassung bzw. Umrüstung benötigen würden. Bei Wannenlaufzeiten von 10 bis 15 Jahren ist es für Bestandsanlagen innerhalb der praxisüblichen Hauptreparatur von ca. 6 bis 12 Wochen nicht möglich, derartige Innovationsmaßnahmen umzusetzen.

Um theoretisch dennoch eine Hybridisierung des Schmelzprozesses zu erreichen, wäre der Bau einer zweiten, vollelektrischen Produktionslinie notwendig. Dieser Ansatz scheitert aus heutiger Einschätzung jedoch aus mehreren Gründen.

- Die Produktionsstätten befinden sich historisch bedingt oftmals in denkmalgeschützten Bauwerken, die sowohl in ihrer Grundfläche als auch durch bauliche Restriktionen eingeschränkt sind. Dadurch liegt tendenziell ein grundsätzlicher Platzmangel für größere Zubauten vor.
- Die Schmelzwanne der brennstoffbasierten Produktionslinie dürfte aus prozessrelevanten Sicherheitsgründen nicht abkühlen, sodass eine parallele, vollelektrische Linie keinen flexiblen Energieträgereinsatz, sondern Zubau an Produktionskapazität bedeuten würde.
- Die gesamte Strominfrastruktur einer bestehenden Produktionsstätte müsste geändert werden, da mehrere Megawatt an zusätzlichem Strombezug anfallen würden.
- Das Risiko einer Produktionsstörung infolge einer Störung der Stromversorgung für vollelektrisch beheizte Prozesse wird tendenziell höher eingestuft als ein Ausfall des brennstoffbasierten Betriebes.
- Elektroden verschleifen und sind in regelmäßigen Abständen auszutauschen. Potenziell stellt ein Elektrodenwechsel ein höheres Sicherheitsrisiko dar, als ein brennstoffbasierter Betrieb ohne aktiven Komponententausch an der Schmelzwanne.
- Die Wirtschaftlichkeit für Hybridisierungsmaßnahmen des Glasschmelzprozesses in Bestandsanlagen ist in naher Zukunft nicht gegeben.

Im Fall der Floatglasherstellung wurden bereits erste Versuche für einen elektrischen Schmelzprozess unternommen, die eine maximale Tonnage von ca. 200 t/d erreichen konnten. Im Rahmen des Formgebungsprozesses ist in Deutschland jedoch eine Menge von 500-800 t/d erforderlich, sodass eine elektrifizierte bzw. hybride Fahrweise für den Flachglassektor zum aktuellen Zeitpunkt schwer vorstellbar ist. Des Weiteren weisen derzeit lediglich vier Flachglaswannen eine EZH auf, die im Normalfall für die reguläre Flachglasproduktion an anderen Wannen technologisch nicht benötigt wird. Infolge

konstruktiver Maßnahmen des Schmelzaggregates wird das Glas bereits ohne EZH ausreichend und homogen erschmolzen. [29]

Eine Hybridisierung des Kühlrofens ist grundsätzlich möglich. Es gibt jedoch mehrere Aspekte, die auch bei diesem Prozessschritt als Hemmnis zu verstehen sind und infolgedessen gegen eine Hybridisierung sprechen.

Im Gegensatz zu einer Technologie- bzw. Verfahrensumstellung ist eine hybride Einbindung von Infrarotstrahlern in die bestehende Einhausung des auf den Brennstoffeinsatz optimierten Kühlprozesses aus platz- und prozesstechnischen Gründen nicht gegeben. Zudem werden inzwischen zur Beheizung der Kühlöfen im Sinne der Energieeinsparung auch Abwärmeströme aus dem Schmelzprozess verwendet oder die Kühlöfen bei geeigneten Glasprodukten rein mittels deren Eigenwärme betrieben [4]. Dadurch kann unter Umständen eine aktive Beheizung gänzlich entfallen [4].

Weiterhin existiert für jedes Glasprodukt eine charakteristische Abkühlkurve, die innerhalb eines definierten Temperatur-Zeit-Regimes zu durchlaufen ist, um Spannungen in der Glasstruktur zu vermeiden. Die Einhaltung der Prozessparameter gilt als essentiell zur Gewährleistung der Produktqualität. Eine theoretisch hybride Fahrweise an einem bestehenden Kühlrofen würde aufgrund von Latenzzeiten beim Einstellen des bivalenten Energieträgerverhältnisses auf der einen Seite ein zusätzliches Risiko für Abweichungen von prozesskritischen Parametern bedeuten. Auf der anderen Seite wäre infolgedessen analog zum Schmelzprozess eine zweite, vollelektrische Kühllinie mitzudenken. Im Sinne von realitätsnahen Hybridisierungsmaßnahmen auf Prozessebene erscheinen beide Varianten als nicht praktikabel.

### 3.2 Papierindustrie

Die Papierproduktion gliedert sich unabhängig von der Papierart übergeordnet in drei Abschnitte, siehe **Abbildung 5**. Die Stoffherstellung dient eingangs zur Herstellung von Primär- oder Sekundärfasern. Während letztere durch das Recycling von Altpapier gewonnen werden, fallen Primärfasern im Zuge der Zell- oder Holzstoffherstellung an. Nachdem in Deutschland nahezu kein Zellstoff für die Papierherstellung erzeugt [33], sondern maßgeblich importiert wird, setzen deutsche Papierfabriken hauptsächlich Altpapier als Rohstoff für die Papiererzeugung ein [34]. Die Papierherstellung findet anschließend in der Papiermaschine statt. Dabei werden sechs Prozessschritte durchlaufen.

Sofern es sich nicht um eine integrierte Papierproduktion – einer gemeinsamen Stoff- und Papierherstellung am gleichen Standort [35] – handelt, erfolgt in einem ersten Schritt die Stoffaufbereitung des trocken angelieferten Faserstoffs, der unter Zugabe von Wasser zu einer Fasersuspension aufbereitet wird. Im nächsten Schritt erzeugt der Stoffauflauf einen homogenen Suspensionsstrahl in Maschinenrichtung und Papierbahnbreite. In der Siebpartie wird der Wassergehalt der Suspension erstmals reduziert und ein endloses, gleichförmiges Bahnprofil eingestellt. Anschließend erfolgt in der Pressenpartie eine Verdichtung und Entwässerung des Papiergefüges, wodurch die Festigkeit der Papierbahn erhöht wird. Diese durchläuft daraufhin eine Vielzahl an dampfbeheizten Trockenzyklindern, sodass das verbliebene Restwasser aus dem Papier über Kontakttrocknung verdunstet und ein gewünschter Endtrockengehalt von 2 bis 10 % erreicht wird. Im Anschluss an die

Trockenpartie folgt oftmals ein Glättwerk mit temperierten Kalandervalzen, wodurch die Papierbahn eine glatte Oberfläche und gleichmäßige Blattdicke erhält, bevor sie final aufgerollt wird. [36], [37], [38]

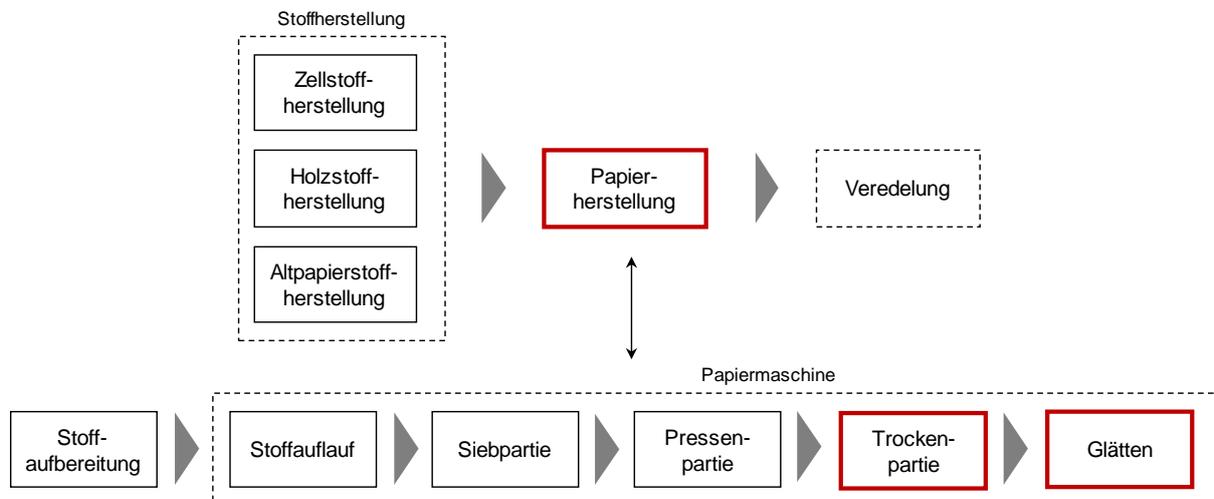


Abbildung 5: Prozessablaufschritte zur Papierherstellung in der Papiermaschine, Eigene Darstellung in Anlehnung an [37]

### 3.2.1 Relevante Prozesse

Dem Hybridisierungskriterium zufolge beschränkt sich bei der Papierherstellung der maßgebliche Einsatz an durch Brennstoffen bereitgestellter, thermischer Energie auf die Prozessschritte der Trockenpartie und dem konsekutiven Glättwerk – sofern vorhanden. Alle anderen Prozessschritte weisen entweder keinen direkten oder einen vergleichsweise verschwindend geringen Heizenergiebedarf auf.

Zur Trocknung der Papierbahn existieren mehrere praxisübliche Trocknungsverfahren. Davon stellt die Trocknung mittels dampfbeaufschlagten Trockenzyklindern die gängigste Form dar. Je nach Maschinengröße werden ca. 50 und bis zu 100 Zylinder umlaufen. Die eingestellten Zylindertemperaturen liegen im Bereich von ca. 140 °C und sind maßgeblich abhängig von der Papiersorte und dem Fouling in den Trockenzyklindern. Der brennstoffbasierte Energiebedarf für die Trockenpartie beträgt ca. 1.245 kWh pro Tonne Papier [38].

Zur Glättung der Papierbahn werden Kalandervalzen eingesetzt, die indirekt über ein gasbeheiztes Wärmeträgermedium oder Dampf temperiert werden. Die Temperaturen liegen üblicherweise zwischen 80 und 400 °C – je nach Anforderung und Papiersorte. Im Temperaturbereich bis 120 °C kommt Heißwasser oder Dampf zum Einsatz, bis 170 °C Dampf oder Thermoöl, bis 220 °C ausschließlich Thermoöl und bis 400 °C entweder Thermoöl mit induktiver Zusatzheizung oder eine direkt induktive Erwärmung der Kalandervalzen [37]. Der Energieeinsatz pro Tonne Papier liegt für diesen Veredelungsschritt schätzungsweise im Bereich von ca. 220 kWh/a bei einer Feuerungsleistung von ca. 10 kW. [38]

### 3.2.2 Technologieauswahl und Hybridisierungsoptionen

Unter Beachtung der Technologiecharakteristika aus Tabelle 1 und Verknüpfung mit den zuvor beschriebenen prozessrelevanten Parametern ergibt sich für die Papierherstellung

eine mögliche Technologieauswahl zur hybriden Prozesswärmebereitstellung nach **Abbildung 6**.

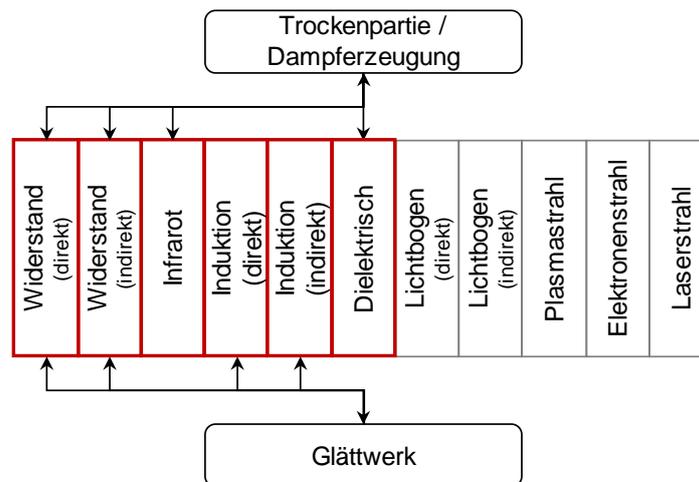


Abbildung 6: Technologien zur hybriden Prozesswärmebereitstellung in der Papierindustrie

Nachdem der Trocknungsprozess in Bestandsanlagen bereits sehr effizient abläuft und Wärmerückgewinnungspotenziale weitgehend erschlossen sind, ist als primäre Hybridisierungsmöglichkeit eine übergeordnete Hybridisierung auf Versorgungsebene zu favorisieren [39], [40]. Neben einem hybriden Dampfkessel kann der Dampf entweder in einem weiteren Elektrokessel (indirekte Widerstandserwärmung mit Heizschwert) oder einem Elektrodenkessel (direkte Widerstandserwärmung des Wassers) erfolgen.

Eine weitere Möglichkeit zur Hybridisierung der Trockenpartie liegt darin, eine zusätzliche Infrarotheizung im Vorfeld der Trockenpartie zu integrieren: Für die der Trockenpartie vorgelagerten Prozessschritte gilt das Bestreben eines möglichst konstanten Temperaturniveaus um die 55 °C [40]. Die Integration einer elektrischen Infrarotheizung als zusätzliche Vortrocknung zur Trockenpartie würde sowohl eine Leistungssteigerung einer bestehenden Trockenpartie als auch eine flexible Reduktion der benötigten Dampfmenge in den Trockenzylindern bewirken [37]. Die Option einer dielektrischen Trocknung ist aufgrund der gleichmäßigen Papierbahngeometrie theoretisch ebenfalls möglich.

Die Thematik zur Umstellung auf eine hybride Dampfbereitstellung auf Versorgungsebene gilt analog für eine hybride Beheizung der Thermowalzen im Glättwerk: eine primärseitige Integration eines zusätzlichen elektrothermischen Erwärmungsverfahrens wie der zum Teil schon angewandten Induktionserwärmung des Thermoöls ist ohne Beeinflussung der Prozessparameter möglich. Gleiches gilt für die Erwärmung des Wärmeträgermediums mittels Widerstandsheizung. Eine weitere Option liegt im Einsatz von sogenannten vollelektrischen Tokuden-Walzen, bei denen sich die Walze direkt induktiv ohne ein zusätzliches Wärmeträgermedium erwärmt [37], [41].

Die weiteren Verfahren der Lichtbogen-, Plasma-, Elektronen- oder Laserstrahlerwärmung sind aufgrund ihrer technischen Restriktionen für keinen der beiden Prozessschritte möglich und finden prinzipiell nur für Hochtemperaturprozesse Verwendung.

### 3.2.3 Hybridisierungspotenzial

Als Hybridisierungspotenzial wird im Folgenden in **Abbildung 7** das technische Substitutionspotenzial ausgewiesen, das unter der Bedingung einer gegebenen Integrationsmöglichkeit und eines zeitweise vollelektrischen Betriebes vorliegt.

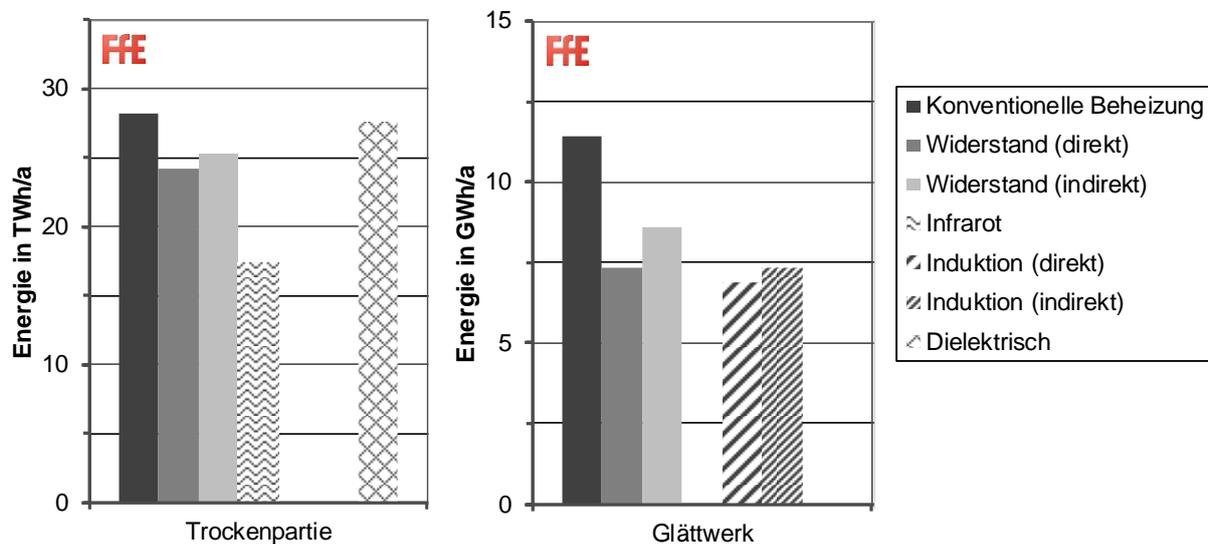


Abbildung 7: Technisches Substitutionspotenzial nach Prozess und Erwärmungsverfahren in der deutschen Papierindustrie

Im Fall der Papierherstellung liegt für die konventionelle Dampfbereitstellung im Bereich der Trockenpartie ein Energiebedarf von über 28 TWh/a in Deutschland vor. Unter Einsatz eines Elektro- oder Elektrodenkessels resultiert für einen vollständig hybriden Einsatz des elektrischen Widerstandsverfahrens zur hybriden Dampferzeugung ein verminderter Energiebedarf von ca. 25 TWh/a. Je Werk in Deutschland entspricht dies einem zusätzlichen elektrischen Leistungsbezug von knapp 20 MW<sub>el</sub> für eine hybride Dampfbereitstellung zur Versorgung der Trockenpartie. Im Vergleich dazu resultiert für eine zeitweise vollständige Infrarottrocknung ein um ca. 40 % verringerter Energiebedarf von ca. 17 GWh<sub>el</sub>/a bei einem zusätzlichen elektrischen Leistungsbezug von ca. 14 MW<sub>el</sub> je Werk. Eine temporär vollständig dielektrische Trocknung hätte aufgrund eines verhältnismäßig niedrigeren Wirkungsgrades nahezu den gleichen ursprünglichen Energiebedarf bei einem zusätzlichen elektrischen Leistungsbezug von knapp 22 MW<sub>el</sub> je Werk.

Im Vergleich zur Trockenpartie ist der gesamte, konventionelle Energiebedarf für das Glätten mit ca. 11 GWh/a verschwindend gering. Sowohl ein Widerstands- als auch Induktionsverfahren zur Beheizung der Thermowalzen weist einen Energiebedarf von ca. 7 bis 9 GWh<sub>el</sub>/a auf. Dies bedingt einen zusätzlichen elektrischen Leistungsbezug von ca. 6 bis 8 kW<sub>el</sub> je Werk.

### 3.2.4 Hemmnisanalyse

Auf Basis der vorangegangenen Überlegungen und Ergebnisse wurde ein Brancheninterview [40] durchgeführt, mit dem Ziel, technische, prozessbezogene Restriktionen sowie mögliche Umsetzungshemmnisse aufzuzeigen. Diese werden im Folgenden erläutert.

In der Papierindustrie gibt es derzeit bereits konkrete Überlegungen und das Bestreben, die Dampferzeugung auf Versorgungsebene bivalent zu gestalten. Die Umbaumaßnahmen

hierfür beschränken sich hauptsächlich auf den Tausch eines konventionellen mit einem hybriden Dampfkessel oder auf die Installation eines zusätzlichen vollelektrischen Dampfkessels. Dadurch ist die Option einer sowohl mono- als auch bivalenten Betriebsweise gegeben, sodass in Abhängigkeit der Energiepreise ein flexibler Betrieb im wirtschaftlichen Optimum ermöglicht wird. Beim Einstellen des Energieträgerverhältnisses ist darauf zu achten, mögliche Schwankungen in der Dampfbereitstellung zu vermeiden. Obwohl dies für die Prozessparameter der Trockenpartie als tendenziell unkritisch anzusehen ist, besteht bei Dampfschwankungen die Möglichkeit eines Bahnabrisses an vorgelagerten Prozessschritten, wie beispielsweise der Pressenpartie, was zu einem Produktionsausfall führen würde.

Die Anlagen laufen üblicherweise ca. 8.100 h/a und erreichen eine Lebensdauer von ca. 50 Jahren und mehr. Neben einem Sommer- und Weihnachtsstillstand von maximal 10 Tagen finden alle zwei bis drei Wochen für je vier bis acht Stunden reguläre Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten statt. Längere Stillstandzeiten werden in der Regel aufgrund von Profitabilitätsverlusten nicht toleriert. Folglich ist wenig Toleranz für potenzielle Umbaumaßnahmen auf Prozessebene vorhanden. Darüber hinaus sind Amortisationszeiten für Investitionen von ca. einem Jahr gängige Praxis.

Eine allgemeine Umstellung des Trocknungsverfahrens auf beispielsweise reine Infrarot- oder dielektrischer Trocknung, wie in Kapitel 3.2.3 ausgewiesen, ist prinzipiell möglich [39], findet aber bisher keine Anwendung. Für Bestandsanlagen liegt das Hemmnis maßgeblich in der Unwirtschaftlichkeit bei dem aktuellen Energiepreinsniveau. Erst mit deutlich veränderten Rahmenbedingungen im Energiesystem ist davon auszugehen, dass auch auf Prozessebene eine Wirtschaftlichkeit für Hybridisierungs- bzw. Elektrifizierungsmaßnahmen vorliegt und ein Anreiz für eine systemdienliche Produktionsfahrweise geschaffen wird. Ein weiteres Hemmnis liegt in der Gewährleistung der Produktqualität in Verbindung mit neuen und bivalenten Technologien auf Prozessebene. Ein noch geringer Forschungs- und Wissensstand zur praxisnahen Umsetzung begünstigen weiterhin den Einsatz bewährter, konventioneller Technologien.

### 3.3 Zementindustrie

Die Zementherstellung erfolgt primär in drei Abschnitten – der Rohstoffgewinnung inklusive -aufbereitung, dem Ofenprozess und der Fertigstellung, siehe **Abbildung 8**.

Die abgebauten Rohstoffe Kalkstein, Ton und Quarz werden in einem ersten Schritt zerkleinert und für eine vordefinierte Zusammensetzung homogenisiert. Nach einem weiteren Zerkleinerungsschritt des Rohmaterials zu Rohmehl folgt der Ofenprozess bzw. das Brennen des Zementklinkers. Hierzu wird das Rohmehl über mehrere Zyklonstufen meist mit heißem Ofenabgas vorgewärmt, im Calcinator vorentsäuert und anschließend im Drehrohrofen zu sogenanntem Klinker gebrannt. Im Anschluss folgt die Klinkerkühlung auf einem Transportrost mittels konvektiver Luftkühlung. In einem letzten Schritt wird der gebrannte Klinker in einem abschließenden Mahl- und Mischprozess zu Zement fertiggestellt. [33]

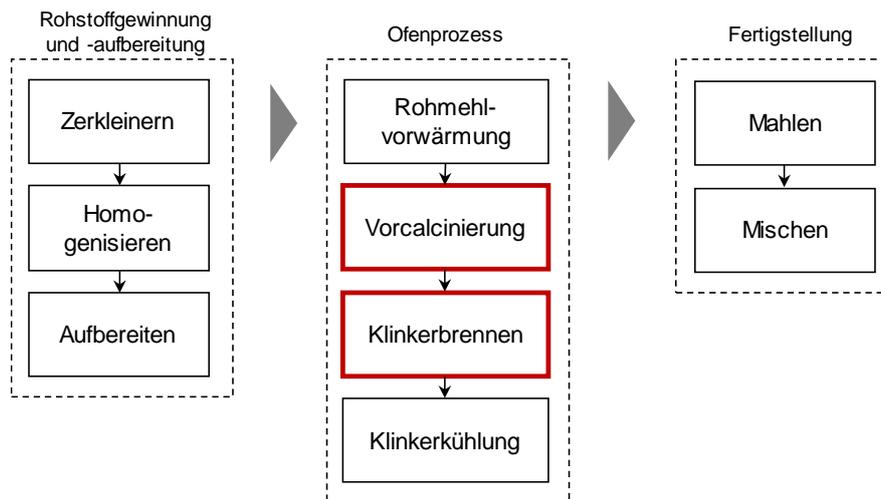


Abbildung 8: Prozessablaufschritte zur Zementherstellung, Eigene Darstellung in Anlehnung an [42], [43], [33], [49]

### 3.3.1 Relevante Prozesse

Infolge des Hybridisierungskriteriums ist die Betrachtung von Hybridisierungsmöglichkeiten für die Zementproduktion auf die zwei brennstoffbasierten Prozessschritte des Ofenprozesses – die Entsäuerung im Calcinator sowie dem Brennen im Drehrohr – limitiert.

Bei der Vorcalcinierung, d. h. Entsäuerung, wird Heißmehl aus der zweituntersten Zyklonstufe von der Ofen- oder Tertiärluft des Drehrohrofens mitgerissen und in den schachtförmigen Calcinator eingebracht. Dort reagieren die beiden Komponenten intensiv miteinander, sodass sich die Abgastemperatur abrupt von ca. 1.200 °C auf das Niveau der Entsäuerungstemperatur bei ca. 830 °C abkühlt. Zur Aufrechterhaltung der endothermen Entsäuerungsreaktion werden an dieser Stelle oftmals heizwertarme, ballastreiche Brennstoffe, wie zum Beispiel Altreifen, Tiermehle, Siedlungsabfälle und Klärschlamm [44], zugegeben. Je nach Ofenanlage kann der spezifische Wärmeeintrag bei Temperaturen zwischen 830 °C und 950 °C bis zu ca. 480 kWh je Tonne Zement bzw. 60 % des gesamten Brennstoffenergiebedarfs betragen [38]. [45]

Das Brennen des vorgetrockneten und -entsäuerten Rohmehls im Drehrohr findet bei Temperaturen von ca. 1.450 °C statt. Der Durchmesser des feuerfest ausgekleideten Drehrohrs beträgt bis zu 6 m bei einem Länge-Durchmesserverhältnis von 10-17. Durch die kontinuierliche Drehbewegung und einer Neigung von 3° bis 4° findet ein stationärer Massentransport vom Ofeneinlauf in Richtung des am Ofenauslauf installierten Brenners statt. Der spezifische Brennstoffenergieeinsatz für das Klinkerbrennen im Drehrohr beträgt ca. 180 kWh pro Tonne Zement, wenn, wie zuvor beschrieben, eine Vorcalcinierung stattfindet. Ohne den vorgelagerten Prozessschritt beträgt der spezifische Brennstoffeinsatz ca. 660 kWh/t [38] aufgrund der energieintensiven Trocknung, Aufheizung und Calcinierung des Rohmaterials im Drehrohr. [45]

### 3.3.2 Technologieauswahl und Hybridisierungsoptionen

Unter Beachtung der Technologiecharakteristika aus Tabelle 1 und Verknüpfung mit den zuvor beschriebenen prozessrelevanten Parametern ergibt sich für die Zementherstellung

eine mögliche Technologieauswahl zur hybriden Prozesswärmebereitstellung nach **Abbildung 9**.

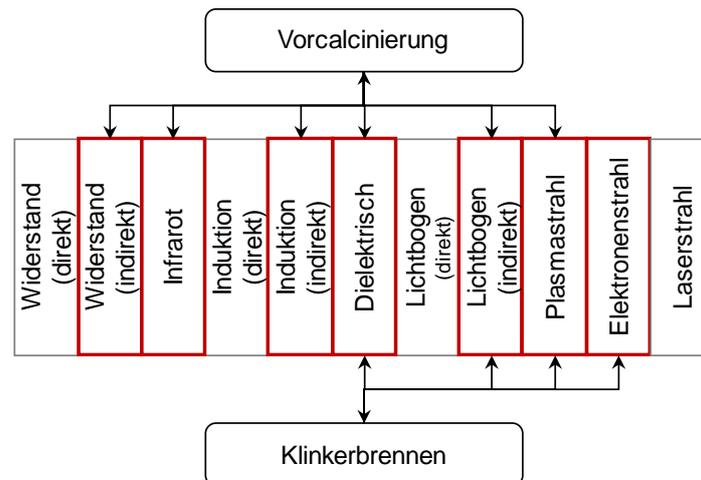


Abbildung 9: Technologien zur hybriden Prozesswärmebereitstellung in der Zementindustrie

Da es sich bei der Zementproduktion maßgeblich um ein elektrisch nichtleitendes Erwärmungsgut im kontinuierlichen Transportprozess handelt, finden die direkte Widerstands-, Induktions- und Lichtbogenerwärmung zur Vorcalcinierung keine Anwendung. Ebenso auszuschließen ist eine Laserstrahlerwärmung, die nur zur punktuellen Erwärmung einsetzbar ist und sich zusätzlich nicht für grobkörniges Schüttgut eignet. Neben den indirekten Verfahren, der Infrarot- und der dielektrischen Erwärmung kann ebenso eine Plasmastrahlerwärmung zum Einsatz kommen.

Als Hybridisierungsmöglichkeit für das Klinkerbrennen besteht die Option einer dielektrischen Erwärmung sowie einer indirekten Lichtbogen-, Plasma- oder Elektronenstrahlerwärmung. Der Einsatz weiterer Verfahren ist aufgrund ihrer technischen Restriktionen für den Prozessschritt des Klinkerbrennens nicht gegeben.

Zum aktuellen Zeitpunkt sind die genannten Verfahren Gegenstand von Prototypentests zur strombasierten Zementproduktion. Sie finden bisher aber noch keine Anwendung in produzierenden Betrieben. [46]

### 3.3.3 Hybridisierungspotenzial

Als Hybridisierungspotenzial wird im Folgenden in **Abbildung 10** das technische Substitutionspotenzial ausgewiesen, das unter der Bedingung einer gegebenen Integrationsmöglichkeit und eines zeitweise vollelektrischen Betriebes vorliegt.

Für die Potenzialermittlung ist die Struktur der deutschen Zementwerke nicht unerheblich: In Deutschland gibt es 53 Zementwerke, von denen 34 als „vollwertige“ Produzenten anzusehen sind, die eine Klinkerproduktion im Drehrohfen betreiben. Dementsprechend ist der thermische Energieeinsatz zur Zementproduktion maßgeblich auf diese 34 Werke zurückzuführen. Davon wiederum betreiben 20 Werke bzw. knapp 60 % eine dem Drehrohfen vorgeschaltete Vorcalcinierung, die den Energieeinsatz im Drehrohfen deutlich reduziert. [47]

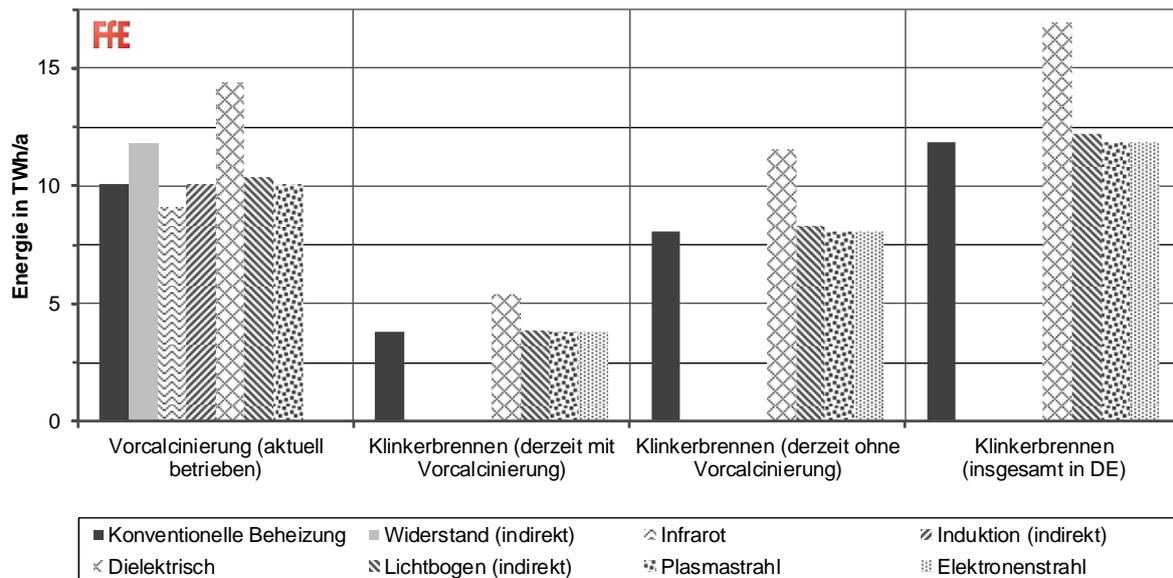


Abbildung 10: Technisches Substitutionspotenzial nach Prozess und Erwärmungsverfahren in der deutschen Zementindustrie

Demzufolge zeigt sich in Abbildung 10 für die konventionelle Beheizung der Vorcalciniierung ein thermischer Energiebedarf in Deutschland von ca. 10 TWh/a. Eine hybride Substitution des fossilen Energieträgers würde nur im Fall einer Infraroterwärmung aufgrund eines verbesserten Wirkungsgrades zu einem theoretisch verminderten Energiebedarf von ca. 9 TWh<sub>el</sub>/a führen. Ein konträres Verhalten zeigt sich für die Anwendung einer indirekten Widerstandsheizung, die einen um ca. 2 TWh/a erhöhten Energiebedarf aufweist.

Prozessübergreifend ist folgender Sachverhalt ersichtlich: Sowohl für eine indirekte Induktions- oder Lichtbogen- als auch für eine Plasma- und gegebenenfalls Elektronenstrahlerwärmung liegt jeweils ein ähnlicher Energiebedarf im Vergleich zur konventionellen Beheizung vor. Zusätzlich weist insbesondere ein dielektrisches Erwärmungsverfahren für die Vorcalciniierung und das Klinkerbrennen einen um ca. 43 % erhöhten thermischen Energiebedarf auf. Dies ist maßgeblich auf signifikante Umwandlungsverluste (ca. 37 %) der elektrisch bezogenen Energie zur Erzeugung der elektromagnetischen Wellen zurückzuführen [6].

Unter der Annahme, beide Prozessschritte beispielsweise auf eine hybride Plasmastrahlerwärmung umzurüsten, ergibt sich für Werke mit aktuell betriebener Vorcalciniierung und Klinkerbrennen in Summe ein zusätzlicher elektrischer Leistungsbedarf von durchschnittlich über 90 MW<sub>el</sub> je Werk in Deutschland. Für die verbleibenden Werke mit alleinigem Klinkerbrennen, die keine Vorcalciniierung betreiben, resultiert ein zusätzlicher elektrischer Leistungsbedarf von über 75 MW<sub>el</sub> je Werk.

### 3.3.4 Hemmnisanalyse

Auf Basis der vorangegangenen Überlegungen und Ergebnisse wurde ein Brancheninterview [46] durchgeführt, mit dem Ziel, technische, prozessbezogene Restriktionen sowie mögliche Umsetzungshemmnisse aufzuzeigen. Diese werden im Folgenden erläutert.

In der Zementindustrie stellt eine anteilige Hybridisierung in Kombination mit dem brennstoffbasierten Erwärmungsverfahren eine Übergangslösung auf dem Weg zu einer

angestrebten, vollständig strombasierten Zementproduktion dar. Auf diese Weise könnten Zementwerke vor dem Hintergrund ihres erheblichen Leistungsbedarfes zur Stabilität des Stromnetzes beitragen. In diesem Zusammenhang ist es denkbar, insbesondere Plasmabrenner gegebenenfalls modular in bestehende Drehrohröfen zu integrieren, die aufgrund derzeitiger Leistungsklassen maximal 5 bis 20 % zur benötigten thermischen Leistung bereitstellen können. Im Fall einer hybriden Integration mit einem Plasmabrenner sind keine Auswirkungen auf die Produktqualität zu erwarten. Dennoch müsste die Calcinatorgeometrie aufgrund veränderter Abgasströme angepasst sowie eine zusätzliche Kühlung des Plasmabrenners realisiert werden.

Für eine hybride bzw. elektrifizierte Zementproduktion liegen darüber hinaus weitere potenzielle Hemmnisse vor, die auf Analysen und Einschätzungen des VDZ beruhen [48]:

- Unter der Annahme eines strombasierten Klinkerbrennprozesses werden brennstoffbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden, die ca. ein Drittel der anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen darstellen. Die restlichen Emissionen stammen aus der Entsäuerung des Rohmaterials und sind prozessbedingt unvermeidbar. Dieser Sachverhalt entkräftet somit den Hebel zur Umsetzungsbereitschaft einer bivalenten oder rein strombasierten Fahrweise, da kein vollständig emissionsfreier Prozess möglich ist. Der Drehrohröfen ist zudem ein Müllverwerter, bei dem bis zu ca. 60 % alternative Brennstoffe eingesetzt werden [44]. Dies stellt ein zusätzliches Substitutionshemmnis dar.
- Gegen den Einsatz von Elektrolichtbogenöfen beim Klinkerbrennprozess sprechen nachzeitigem Kenntnisstand, dass nur verhältnismäßig geringe Mengen verarbeitet werden könnten. Zudem würde eine veränderte Ofenatmosphäre vorliegen, die sich reduzierend auf den Klinker auswirkt. Eine für den Klinkerbrennprozess notwendige Ofengröße ist in absehbarer Zeit nicht gegeben.
- Ein allgemein technologisches Hemmnis liegt darin, dass das Rohmehl bzw. der Klinker nur bedingt elektrisch leitend ist. Dadurch eignen sich prinzipiell nur indirekte elektrothermische Erwärmungsverfahren, die vor allem auf dem Prinzip der Wärmestrahlung basieren. Unter Einsatz der Elektrodenstrahltechnik ist beispielsweise keine homogene Erwärmung des Materials zu erreichen. Ebenso resultieren für eine dielektrische Materialerwärmung in einem Mikrowellenofen hohe Energieverluste und Investitionskosten.
- Für einen strombasierten Klinkerbrennprozess wären drastische Strommengen erforderlich, die über die lokale, bestehende Strominfrastruktur nicht zu Verfügung gestellt werden können. Demzufolge bedarf es für Hybridisierungsmaßnahmen einer weitreichenden Erneuerung der Strominfrastruktur auf Betriebsebene.
- Eine vollständig hybride bzw. elektrische Zementproduktion würde im weitesten Sinne eine technologische Neuentwicklung des Klinkerbrennprozesses bedeuten. Beispielsweise ist nachzeitigem Kenntnisstand davon auszugehen, dass ein rein strombasierter Prozess nur im Batch-, nicht aber im bisher kontinuierlichen Betrieb, möglich ist.

## 4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Recherche der zur Verfügung stehenden elektrothermischen Erwärmungstechnologien zeigt, dass je nach eingesetzter Technologie theoretisch alle in der Glas-, Papier- oder Zementindustrie benötigten Temperaturniveaus erreicht werden können. Welche elektrische Erwärmungsmethode sich für die Hybridisierung bestimmter Prozesse eignet, ist von den individuellen Prozess- und Umgebungsbedingungen abhängig. Dabei spielt die Integrierbarkeit in die bestehende Prozessführung sowie die Regelbarkeit der konventionellen Erwärmung eine große Rolle. Für die Industrie ist dabei wichtig, dass durch die hybride Wärmebereitstellung keine Produktionsprobleme, wie zum Beispiel Qualitätsverluste oder Verzögerungen, auftreten. Im Vergleich der drei durchgeführten Branchenanalysen wird Folgendes deutlich:

Eine „echte“ Hybridisierung an Bestandsanlagen des energieintensiven Schmelzprozesses für die Glasherstellung gestaltet sich problematisch bis nicht durchführbar. Eine deutliche Steigerung des elektrischen Energieeintrages über das Maß einer elektrischen Zusatzheizung hinaus würde eine neue Wannengeometrie, andere Feuerfestmaterialien sowie einen vollumfänglichen Umbau eines Glaswerkes bedeuten. Bei Wannelaufzeiten von ca. 15 Jahren ist im laufenden Betrieb kein derartiger Eingriff in den laufenden Prozess gegeben. Vor diesem Hintergrund ist es wahrscheinlicher, dass in Bestandsanlagen bevorzugt synthetische, erneuerbar erzeugte Brennstoffe zum Einsatz kommen werden.

Die Branchenanalyse der Papierindustrie zeigt, dass Hybridisierungsmaßnahmen im Bereich der Wärmeerzeugung auf Versorgungsebene schon heute verhältnismäßig einfach umsetzbar sind. Beispielsweise kann für die Dampferzeugung ein hybrider Kesseltausch vorgenommen oder ein paralleler, elektrischer Kessel installiert werden. Dies hat zum Vorteil, dass eine Beeinflussung von Prozessparametern oder der Produktqualität auszuschließen ist. Eine Umsetzung von netzdienlichen Investitionen für Hybridisierungsmaßnahmen auf Prozessebene steht zum heutigen Zeitpunkt noch in starker Konkurrenz mit dem derzeitigen Energiepreisniveau bei üblichen Amortisationszeiten von ca. einem Jahr.

Für die Zementherstellung ist eine Hybridisierung des energieintensiven Ofenprozesses, beispielsweise mittels Plasmabrenner, möglich. Heute verfügbare Leistungsgrößen schränken allerdings bis auf Weiteres den Hybridisierungsgrad an elektrisch bereitgestellter Prozesswärme auf 5 bis 20 % ein, sofern keine modulare Integration möglich ist. Ein zusätzlicher elektrischer Leistungsbezug von ca. 75 bis 90 MW<sub>el</sub> je Werk bedingt zudem bei Bestandsanlagen eine ganzheitliche Erneuerung der elektrischen Infrastruktur.

Branchenübergreifend wird ersichtlich, dass zum heutigen Zeitpunkt, der technische wie wirtschaftliche Aspekt ein Haupthemmnis darstellt, gefolgt von dem Risiko einer Beeinflussung der Produktqualität für Hybridisierungsmaßnahmen auf Prozessebene. Sowohl unzureichender Kenntnis-, Forschungs- als auch Entwicklungsstand für den Einsatz elektrothermischer Verfahren im Industriemaßstab begünstigen weiterhin den Einsatz konventioneller Technologien zur Prozesswärmebereitstellung. Ein drittes Hemmnis ist im Bereich der derzeit unzureichenden elektrischen Infrastruktur für Bestandsanlagen zu sehen, die für eine deutliche Steigerung des elektrischen Leistungsbezugs bei einer hybriden Fahrweise nicht ausgelegt ist.

**Literatur**

- [1] Duffer, Christa; Guminski, Andrej; Orthofer, Clara; von Roon, Serafin; Gruber, Anna: Lastflexibilisierung in der Industrie – Metastudienanalyse zur Identifikation relevanter Aspekte bei der Potenzialermittlung in: Paper und Vortrag bei der IEWT 2017 in Wien. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2017
- [2] Schüwer, Dietmar et al.: Electrification of industrial process heat: long-term applications, potentials and impacts. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 2018.
- [3] Technology Assessments - Chapter 6: Innovating Clean Energy Technologies in Advanced Manufacturing - Process Heating. Washington DC, USA: U. S. Department of Energy, 2015.
- [4] Ausfelder, Florian et al.: Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie - Methodik | Potenziale | Hemmnisse. München, Frankfurt/Main, Stuttgart: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2018.
- [5] Gruber, Anna; Biedermann, Franziska; von Roon, Serafin: Industrielles Power-to-Heat Potenzial in: Vortrag bei der IEWT 2015 in Wien. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2015
- [6] Rudolph, M.; Schaefer, H.: Elektrothermische Verfahren - Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1989
- [7] De Wachter, Bruno: Introduction to Industrial Electrical Process Heating. Brüssel: European Copper Institute, 2015.
- [8] Was ist Induktionserwärmung?. Reichenbach: Inductoheat Europe GmbH, 2015.
- [9] Imenokhoyev, Ivan et al.: Mikrowellenerwärmungstechnik: Potentiale und Grenzen. In: DKG Vol. 89, No 11-12. Eschenfelden: Linn High Therm GmbH, 2012.
- [10] Imenokhoyev, Ivan et al.: Microwave Heating Technology: Potentials and Limits. Eschenfelden: LINN HIGH THERM GmbH, 2013.
- [11] Industrial microwave technology - High-performance solutions for your industrial processes. Marseille: IDCO, 2014.
- [12] Understanding the Benefits of Electric Arc Furnace Technology. Manchester: Washington Mills Electro Minerals Limited, 2015.
- [13] Handbuch Elektrische Energietechnik. Braunschweig/Wiesbaden: Liviu Constantinescu-Simon, 1996.
- [14] Pragnesh, Dave et al.: Plasma pyrolysis and gasification of plastics waste – a review. In: Journal of Scientific & Industrial Research Vol. 69. Neu Delhi: National Institute of Science Communication and Information Resources, 2010.
- [15] Center for Materials Production: Plasma Arc Technology. Pittsburgh: EPRI Center for Materials Production (CMP), 1991.

- [16] Wie heiß ist eigentlich der Laserstrahl?. In: <https://www.eurolaser.com/de/kunden-service/faq/wie-heiss-ist-eigentlich-der-laserstrahl/>. (Abruf am 2019-01-30); Lüneburg: eurolaser GmbH, 2019.
- [17] Lexikon Produktionstechnik Verfahrenstechnik. Düsseldorf: Heinz Hiersig, 1995.
- [18] Center for Materials Fabrication: Indirect Resistance Heating. In: Techapplication Vol.3, Nr.7. Columbus, Ohio: EPRI Center for Materials Fabrication (CMF), 1994.
- [19] 2012 ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment. Tullie Circle, Atlanta: ASHRAE, 2012.
- [20] Gerhardt, Norman et al.: Potenziale für Strom im Wärmemarkt bis 2050 - Wärmeversorgung in flexiblen Energieversorgungssystemen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien. Frankfurt am Main: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., 2015
- [21] Schmidt, Peter: Der Elektronenstrahl, ein faszinierendes Instrument für neue Perspektiven in der Schweißtechnik. Rudolfstetten: SwissBeam AG, 2015.
- [22] Schmitt, Bastian et al.: SolFood - Leitfaden zur Nutzung solarer Prozesswärme in der Ernährungsindustrie. Kassel: Universität Kassel, 2015.
- [23] Kleinertz, Britta et al.: Heat Dispatch Centre – Symbiosis of heat generation units to reach cost efficient low emission heat supply. In: Energy Procedia (2019). Munich: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
- [24] Langfeld, Roland; Schaeffer, Helmut A.: Werkstoff Glas - Alter Werkstoff mit großer Zukunft in: Technik im Fokus. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014
- [25] Glas - Ein Werkstoff mit vielen Talenten. Düsseldorf: Bundesverband Glasindustrie e.V, 2014
- [26] Scalet, Bianca et al.: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass. Sevilla: Joint Research Centre of the European Commission (JRC), 2013
- [27] Worrell, Ernst; Galitsky, Christina; Masanet, Eric; Graus, Wina: Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Glass Industry - An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers. Berkeley, Kalifornien: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Lab, 2008
- [28] Herstellung von Floatglas. In: <https://www.glastroesch.ch/services/glaswissen/herstellung-und-physikalische-begriffe/herstellung-von-floatglas.html>. (Abruf am 2019-01-31); Bützberg, Schweiz: Glas Trösch Holding AG, 2019.
- [29] Fleischmann, Bernhard: Interview - Technische Aspekte zu Hybridisierungsmaßnahmen in der Glasindustrie; Interview, geführt von Gruber, Anna, Veitengruber, Frank; FfE GmbH, München: Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e. V., 2019
- [30] Teschner, Roman: Glasfasern. Würzburg: Springer Vieweg, 2013.
- [31] Nacke, B.: Glasschmelzen ohne Tiegel am ETP - Induktives Skull-Melting von Glas im

- Induktortiegel. In: Strom & Wärme 02/2004. Hannover: Institut für Elektrothermische Prozesstechnik und Vereinigung zur Förderung des Instituts für Elektrowärme der Universität Hannover e.V., 2004.
- [32] Anonym: Interview - Hybridisierungsmaßnahmen und -hemmnisse in der Glasindustrie; Interview, geführt von Veitengruber, Frank, Gruber, Anna; FfE GmbH, München: Anonym, 2019
- [33] Blesl, Markus; Kessler, Alois: Energieeffizienz in der Industrie in: Springer Verlag. Berlin Heidelberg: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Forschung und Innovation, Karlsruhe, 2013.
- [34] Vassiliadis, Michael; Wolf, Iris; Nieber, Tomas: Papiererzeugung in Deutschland - Eine Branchenanalyse. Hannover: Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie, 2014
- [34] Glasindustrie in Deutschland - Eine Branchenanalyse. Hannover: Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (IGBCE), 2014.
- [35] Zellstoff- und Papierindustrie in: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaftskonsum/industriebereiche/holz-zellstoff-papierindustrie/zellstoff-papierindustrie> (Abruf: 24.09.2017) (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6tmxnpEcR>). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2014
- [36] Papier machen - Industrielle Papierproduktion. Bonn: Verband Deutscher Papierfabriken e.V., 2015
- [37] Blechschmidt, Jürgen: Taschenbuch der Papiertechnik. München: Carl Hanser Verlag München, 2013
- [38] Laufendes, Projekt: Energiewende in der Industrie: Potenziale, Kosten und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor (2018 - 2021). München: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2019.
- [39] The Annual Report of the Austrian Paper Industry - Jahresbericht der Papierindustrie 2013. Wien: Austropapier - Vereinigung der Österreichischen Papierindustrie, 2013.
- [40] Carda, Stephan: Interview - Hybridisierungsmaßnahmen und -hemmnisse in der Papierindustrie; Interview, geführt von Veitengruber, Frank, Gruber, Anna, Duffer, Christa; FfE GmbH, München: UPM GmbH, 2019
- [41] Heizen Sie schon induktiv?. Malente: Kendrion Kuhnke Automation GmbH, 2016.
- [42] Zement-Taschenbuch 51. Ausgabe. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2008
- [43] Schneider, Martin: Zementindustrie im Überblick 2016/2017. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2016
- [44] Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2015
- [45] Schneider, M.: Zement - Taschenbuch 2002. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2002

- [46] Anonym: Interview - Hybridisierungsmaßnahmen und -hemmnisse in der Zementindustrie; Interview, geführt von Veitengruber, Frank, Gruber, Anna; FfE GmbH, München: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2019
- [47] Brunke, Jean-Christian; Blesl, Markus: Energy conservation measures for the German cement industry and their ability to compensate for rising energy-related production costs in: Journal of Cleaner Production. Amsterdam: Elsevier, 2014
- [48] Ruppert, Johannes et al.: Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie: Entwurf Endbericht. Düsseldorf: VDZ gGmbH, 2018.
- [49] Hübner, Tobias: Simulation von Referenzprozessen zur Bestimmung von Flexibilitätspotenzialen und der Auswirkungen von Effizienzmaßnahmen in der Grundstoffindustrie. Masterarbeit. Herausgegeben durch Technische Universität München, betreut durch die Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH: München, 2017.
- [50] Treppe, Konrad et al.: Energetische Optimierung der Trockenpartie - Wärmetechnische Bewertung zur Steigerung der Energieeffizienz. Dresden: Technische Universität Dresden, 2012.

**Anhang**

Tabelle A-1: *Prozessbezogene Wirkungsgrade konventioneller Erwärmungsverfahren je Prozessschritt [4]<sup>a</sup>, [18]<sup>b</sup>, [50]<sup>c</sup>, [46]<sup>d</sup>*

<b>Prozessschritt</b>	<b>Wirkungsgrad</b>	<b>Bemerkungen</b>
Schmelzwanne	49 % <sup>a</sup>	ca. 60 % bei vollelektrischer Schmelze <sup>a</sup>
Kühlofen	45 % <sup>b</sup>	typische Befuerung mit Gasbrenner
Trockenpartie	48 % <sup>ES,c</sup>	85 % <sup>ES</sup> Konventionelle Dampferzeugung und
Glättwerk	45 % <sup>ES</sup>	Verluste in der Trockenpartie ca. 44 % <sup>c</sup>
Vorcalcinierung Klinkerbrennen	70 % <sup>d</sup>	

<sup>ES</sup> Expertenschätzung