

Energetische Hybridisierung von energieintensiven Prozessen – Leitfaden für die Erschließung der Potenziale im Unternehmen

Frank Veitengruber, M. Sc. Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
fveitengruber@ffe.de / www.ffegmbh.de

Im Zuge des Ausbaus volatiler, erneuerbarer Energieerzeugung ist es zunehmend von Bedeutung, Flexibilität auf Verbraucherseite zu schaffen, um zu jedem Zeitpunkt Erzeugung und Verbrauch in Einklang zu bringen. Eine Möglichkeit stellt hierbei die Hybridisierung industrieller Prozesswärme durch den flexiblen Einsatz von Endenergieträgern dar. Diese Art der Flexibilisierung kann insbesondere für Bestandsanlagen als Zwischenlösung auf dem Weg zu einer flexiblen und erneuerbaren Energieversorgung der Zukunft dienen.

Im Folgenden 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. Das Ziel ist es, sowohl Hybridisierungspotenziale als auch branchenübergreifende -hemmnisse von brennstoffbasierten Industrieprozessen aufzuzeigen. Am Beispiel der Papierindustrie, die in Deutschland zu den fünf energieintensivsten Branchen zählt [1], wird im Folgenden exemplarisch die entwickelte Methodik für eine Potenzialanalyse angewendet.

Methodik

Die nachfolgend dargestellte Methodik ist als Leitfaden zu verstehen, der branchenunabhängig angewandt werden kann. Die Vorgehensweise zeigt auf,

- was und wie hybridisiert werden kann und
- welche Hemmnisse bzw. Rahmenbedingungen zu berücksichtigen sind.

Durch eine Technologieanalyse werden Kriterien für den Einsatz elektrothermischer Erwärmungsverfahren evaluiert. Anschließend wird unter Berücksichtigung der Erkenntnisse eine mehrstufige Branchen- bzw. Prozessanalyse angewandt, deren Ablaufschritte **Bild 1** zu entnehmen sind. Mit dem definierten Hybridisierungskriterium „Vorliegen einer brennstoffbasierten Beheizung“ wird eingangs sichergestellt, dass keine bereits elektrifizierten, sondern ausschließlich mit Brennstoffen betriebene Prozesse für Hybridisierungsmaßnahmen untersucht werden.

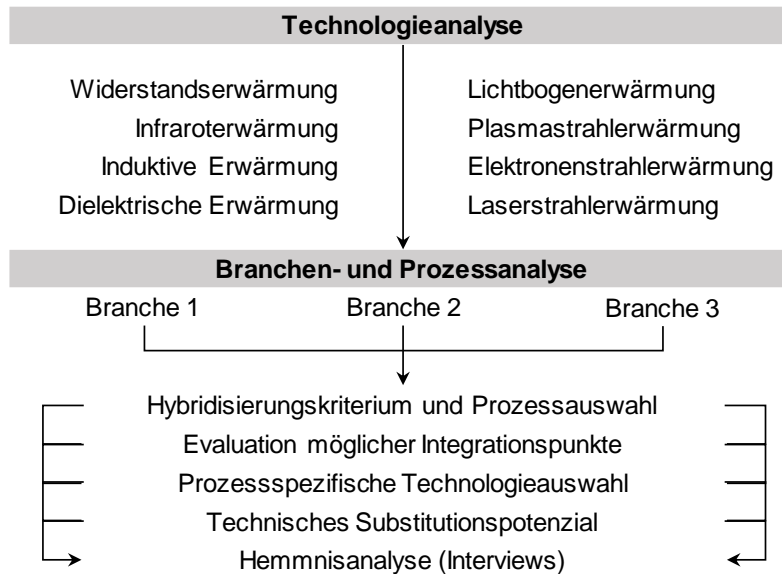


Bild 1 Methodik zur Potenzialermittlung

Technologieanalyse thermoelektrischer Erwärmungsverfahren

Zu den thermoelektrischen Erwärmungsverfahren zählen grundsätzlich alle Technologien, bei denen Wärme in Form von Nutzenergie durch den Einsatz elektrischer Energie erzeugt wird. Da die elektrische Wärmepumpe das notwendige Temperaturniveau für Prozesse in der Grundstoffindustrie meist nicht erreicht, ist sie im Technologieüberblick in **Tabelle 1** nicht enthalten.

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.

Die industrielle Wärmeversorgung ist für die Erwärmungsverfahren grundlegend in zwei Integrationsebenen – die Versorgungs- und Prozessebene – zu unterteilen. Die Versorgungsebene dient als Wärmeversorgung für untergeordnete Prozessschritte und Anwendungen. Eine zentrale Einbindung in den vorhandenen Heizkreis ist möglich [2]. Für eine Hybridisierung von Wärmenetzen auf Versorgungsebene bietet sich beispielsweise auch eine Kaskadenschaltung mehrerer Wärmeerzeuger an, um Temperaturen auf höherem Niveau möglichst effizient bereitzustellen [3]. Im Gegensatz dazu besteht auf Prozessebene die Option einer dezentralen Einspeisung, wodurch einzelne Anwendungen direkt mit dem individuell benötigten Temperaturniveau versorgt werden [2].

Tabelle 1 Technologiecharakteristika elektrothermischer Erwärmungsverfahren, Quellen siehe [4]

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

Branchen- und Potenzialanalyse am Beispiel der Papierindustrie

Die Papierproduktion gliedert sich unabhängig von der Papierart übergeordnet in die drei Abschnitte Stoff- und Papierherstellung sowie die Veredelung, siehe **Bild 2**.

In einem ersten Schritt erfolgt die Stoffaufbereitung des Faserstoffs, der zu einer Fasersuspension aufbereitet wird. Im nächsten Schritt erzeugt der Stoffauflauf einen homogenen Suspensionsstrahl, während in der Siebpartie der Wassergehalt der Suspension erstmals reduziert und ein endloses, gleichförmiges Bahnprofil eingestellt wird. 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 Trockenzylindern, so dass das verbliebene Restwasser aus dem Papier verdampft. 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.

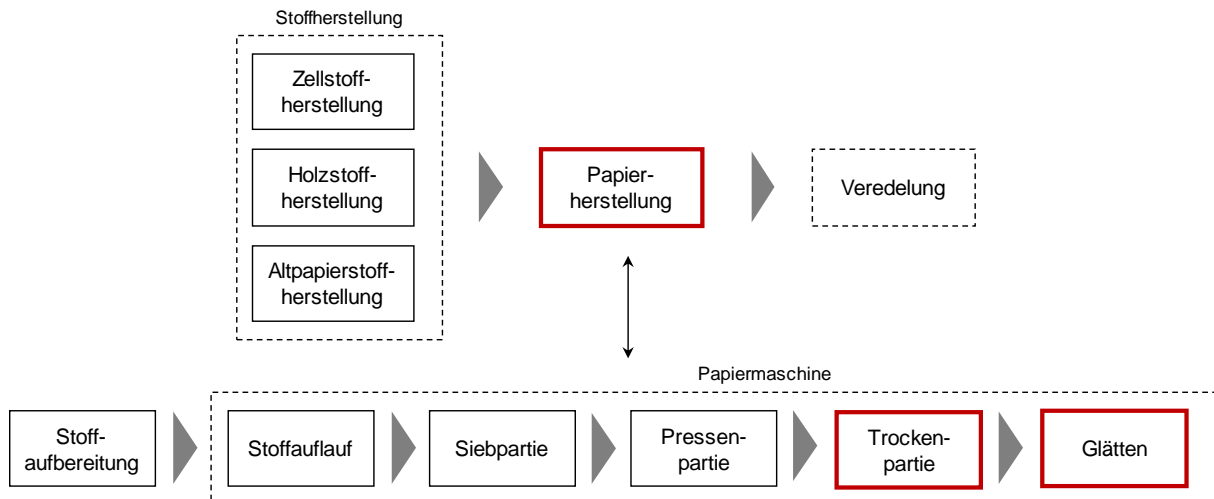


Bild 2 Prozessablaufschritte zur Papierherstellung in der Papiermaschine

Relevante Prozesse

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

Die Trocknung der Papierbahn mittels dampfbeaufschlagten Trockenzylindern stellt das gängigste Verfahren dar. Je nach Maschinengröße werden ca. 50 und bis zu 100 Zylinder umlaufen. Die eingestellten Zylindertemperaturen liegen im Bereich von ca. 140 °C, während der brennstoffbasierte Energiebedarf für die Trockenpartie ca. 1.245 kWh/t Papier beträgt [5].

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 [6]. Der Energieeinsatz liegt für diesen Veredelungsschritt schätzungsweise im Bereich von ca. 220 kWh/t Papier. [5]

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 nach **Bild 3**.

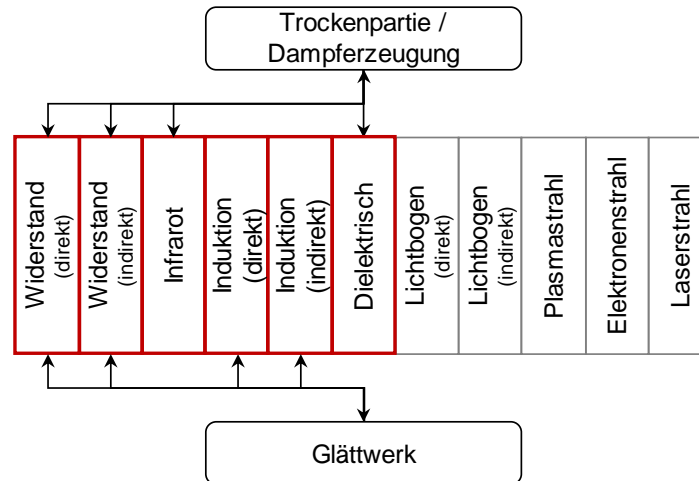


Bild 3 Technologien zur hybriden Prozesswärmebereitstellung in der Papierindustrie

Zur Dampferzeugung für die Trockenpartie ist eine Hybridisierung auf Versorgungsebene zu favorisieren. Neben einem hybriden Dampfkessel kann der Dampf entweder in einem weiteren Elektrokessel (indirekte Widerstandserwärmung mit Heizschwert) oder einem Elektrodenkessel (direkte Widerstandserwärmung des Wassers) erfolgen. Darüber hinaus kann eine zusätzliche Infrarotheizung im Vorfeld der Trockenpartie integriert werden, was neben einer Leistungssteigerung auch eine flexible Reduktion der benötigten Dampfmenge in den Trockenzylindern bewirken würde. Die Option einer dielektrischen (Vor-) Trocknung ist aufgrund der gleichmäßigen Papierbahngeometrie ebenfalls denkbar.

Für eine hybride Beheizung der Thermowalzen im Glättwerk ist die primärseitige Integration ohne Beeinflussung der Prozessparameter möglich. Dies wird zum Teil schon bei der Induktions- oder Widerstandserwärmung des Thermoöls angewendet. Alternativ können vollelektrische Tokuden-Walzen, bei denen sich die Walze direkt induktiv ohne ein zusätzliches Wärmeträgermedium erwärmt, eingesetzt werden.

Hybridisierungspotenzial

Als Hybridisierungspotenzial wird im Folgenden in **Bild 4** das technische Substitutionspotenzial ausgewiesen, das unter der Bedingung einer gegebenen Integrationsmöglichkeit und eines zeitweise vollelektrischen Betriebes vorliegt. Das technische Substitutionspotenzial ergibt sich anhand der verbesserten Wirkungsgrade der elektrothermischen Erwärmungsverfahren im Vergleich zur konventionellen Beheizung.

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 reduziert sich der Energiebedarf bei einer hybriden Dampferzeugung um ca. 3 TWh/a. Je Werk entspricht dies einem zusätzlichen Leistungsbezug von knapp 20 MW_{el}. Im Vergleich dazu resultiert für eine zeitweise vollständige Infrarottrocknung ein zusätzlicher Leistungsbezug von ca. 14 MW_{el} je Werk. Eine temporär vollständig dielektrische Trocknung hätte aufgrund eines verhältnismäßig niedrigeren Wirkungsgrades nahezu den gleichen ursprünglichen Energiebedarf bei einem zusätzlichen Leistungsbezug von knapp 22 MW_{el} je Werk.

Im Vergleich zur Trockenpartie ist der gesamte, konventionelle Energiebedarf verschwindend gering. Ein Widerstands- oder Induktionsverfahren zur Beheizung der Thermowalzen weist einen zusätzlichen Leistungsbezug von ca. 6 bis 8 kW_{el} je Werk auf.

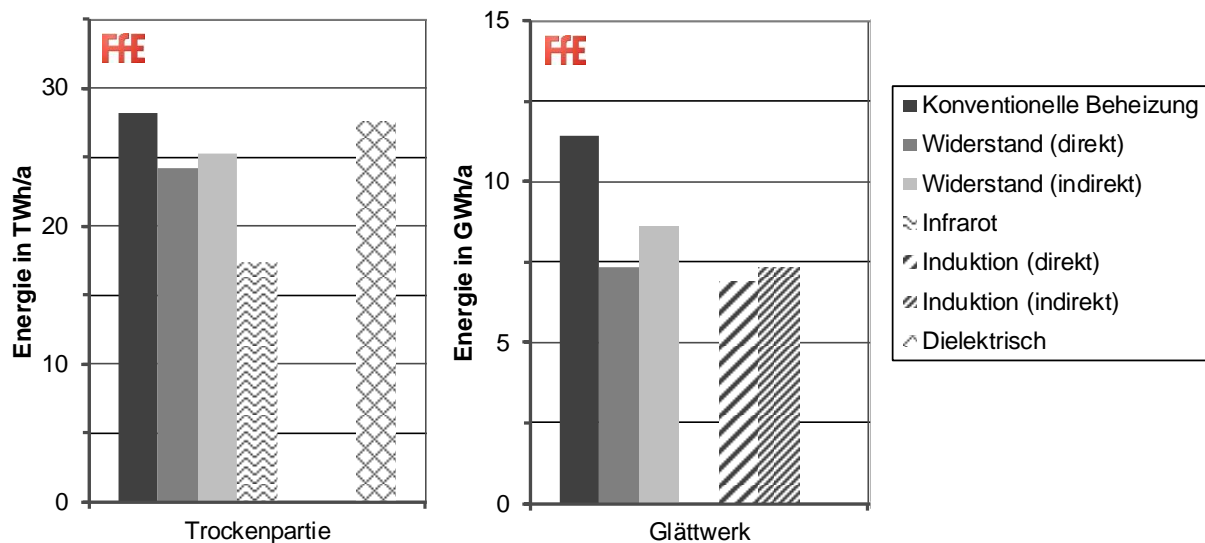


Bild 4 Technisches Substitutionspotenzial nach Prozess und Erwärmungsverfahren in der deutschen Papierindustrie

Hemmnisanalyse

Auf Basis der vorangegangenen Überlegungen und Ergebnisse wurde ein Brancheninterview [7] durchgeführt, mit dem Ziel, technische, prozessbezogene Restriktionen sowie mögliche Umsetzungshemmnisse aufzuzeigen.

In der Papierindustrie gibt es derzeit bereits konkrete Überlegungen, die Dampferzeugung auf Versorgungsebene bivalent zu gestalten, sodass ein flexibler Betrieb im wirtschaftlichen Optimum ermöglicht wird. Beim Einstellen des Energieträgerverhältnisses ist darauf zu achten, mögliche Schwankungen in der Dampfbereitstellung zu vermeiden, da dies zu einem Bahnabriss führen könnte. Die Anlagen laufen nahezu ganzjährig und erreichen eine Lebensdauer von ca. 50 Jahren und mehr. Längere Stillstandzeiten – außer Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten – werden in der Regel aufgrund von Profitabilitätsverlusten nicht toleriert. Darüber hinaus sind Amortisationszeiten für Investitionen von ca. einem Jahr gängige Praxis. Eine generelle Umstellung des Trocknungsverfahrens ist prinzipiell möglich, findet aber bisher keine Anwendung. Für Bestandsanlagen liegt das Hemmnis maßgeblich in der Unwirtschaftlichkeit bei dem aktuellen Energiepreinsniveau.

Schlussfolgerung und Ausblick

Die Recherche der zur Verfügung stehenden elektrothermischen Erwärmungsverfahren zeigt, dass je nach eingesetzter Technologie theoretisch alle in der Grundstoff- bzw. Papierindustrie benötigten Temperaturniveaus erreicht werden können. 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.

Im Vergleich weiterer Industriezweige stellt branchenübergreifend der technische wie wirtschaftliche Aspekt ein Haupthemmnis dar, gefolgt von dem Risiko einer Beeinflussung der Produktqualität für Hybridisierungsmaßnahmen auf Prozessebene, siehe auch [4]. Sowohl unzureichender Kenntnis-, Forschungs- als auch Entwicklungsstand für den Einsatz elektrothermischer Verfahren im Industriemaßstab begünstigen weiterhin den Einsatz konventioneller Technologien zur Prozesswärmebereitstellung. Ein drittes Haupthemmnis 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.

Weitere Informationen zur Potenzialanalyse für die Papier-, Glas- und Zementindustrie sind in [4] zu finden.

Literatur

- [1] Umweltbundesamt: Zellstoff- und Papierindustrie (Abruf: 24.09.2019) Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2019.
- [2] Schmitt, Bastian et al.: SolFood - Leitfaden zur Nutzung solarer Prozesswärme in der Ernährungsindustrie. Kassel: Universität Kassel, 2015.
- [3] Kleinertz, Britta et al.: Flexibility potential of industrial thermal networks through hybridization. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft, 2019.
- [4] Veitengruber, Frank et al.: Potenzialanalyse zur Hybridisierung von Prozessen in der Grundstoffindustrie. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2019.
- [5] Laufendes, Projekt: Energiewende in der Industrie: Potenziale, Kosten und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor (2018 - 2021). München: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2019.
- [6] Blechschmidt, Jürgen: Taschenbuch der Papiertechnik. München: Carl Hanser Verlag München, 2013.
- [7] Carda, Stephan: Interview - Hybridisierungsmaßnahmen und -hemmnisse in der Papierindustrie; Interview, geführt von Veitengruber, Frank, Gruber, Anna, Dufter, Christa; FFE GmbH, München: UPM GmbH, 2019.