

**FFE**

# Potenzialanalyse zur Hybridisierung von Prozessen in der Grundstoffindustrie

Frank Veitengruber et al.

14.02.2019

IEWT 2019

**2019**

# Agenda



- 1 Motivation, Zielsetzung und Methodik
- 2 Technologieanalyse thermoelektrischer Erwärmungsverfahren
- 3 Branchen- und Potenzialanalyse (Bsp. Glasindustrie)
- 4 Schlussfolgerungen und Ausblick

# 1 Motivation, Zielsetzung und Methodik

## Motivation und Zielsetzung

---

- Zunehmend fluktuierende erneuerbare Energieerzeugung
  - Erzeuger- und Verbraucherseite in Einklang bringen
- **Hybridisierung** der industriellen Prozesswärme
- Netzentlastung
  - Verbesserte Integrität Erneuerbarer Energien
  - Reduktion CO<sub>2</sub>-Emissionen
  - Reduktion Energiebezugskosten

### Zielsetzung

- Aufzeigen von Hybridisierungspotenzialen und branchenübergreifenden -hemmnissen
- Branchenunabhängige Anwendung der Methodik

## Methodik

---

### Technologieanalyse

- Evaluation von Kriterien für den Einsatz elektrothermischer Erwärmungsverfahren



### Branchen- und Prozessanalyse

- Hybridisierungskriterium und Prozessauswahl
- Technologieauswahl und Hybridisierungsoptionen
- Hybridisierungspotenzial bzw. technisches Substitutionspotenzial
- Hemmnisanalyse (Interviews)

# Agenda



- 1 Motivation, Zielsetzung und Methodik
- 2 Technologieanalyse thermoelektrischer Erwärmungsverfahren
- 3 Branchen- und Potenzialanalyse (Bsp. Glasindustrie)
- 4 Schlussfolgerungen und Ausblick

## 2 Technologieanalyse thermoelektrischer Erwärmungsverfahren

Tabelle 1: Technologiecharakteristika elektrothermischer Erwärmungsverfahren  
 [1] <sup>a</sup>, [2] <sup>b</sup>, [3] <sup>c</sup>, [4] <sup>d</sup>, [5] <sup>f</sup>, [6] <sup>g</sup>, [7] <sup>h</sup>, [8] <sup>i</sup>, [9] <sup>j</sup>, [10] <sup>k</sup>, [11] <sup>l</sup>, [12] <sup>m</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
Infraroterwärmung <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

## 2 Technologieanalyse thermoelektrischer Erwärmungsverfahren

Tabelle 2: Prozessbezogene Wirkungsgrade elektrothermischer Erwärmungsverfahren  
[1] <sup>a</sup>, [13] <sup>b</sup>, [14] <sup>c</sup>, [15] <sup>d</sup>, [16] <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	x			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

# Agenda



1

Motivation, Zielsetzung und Methodik

2

Technologieanalyse thermoelektrischer Erwärmungsverfahren

3

Branchen- und Potenzialanalyse (Bsp. Glasindustrie)

4

Schlussfolgerungen und Ausblick

# 3.1 Relevante Prozesse

## Schmelzen

- 1.400 – 1.700 °C
- 1,3 MWh/t (Behälterglas) bzw. 1,6 MWh/t (Flachglas)
- ca. 4 Mio. t/a (Behälterglas) und ca. 2 Mio. t/a (Flachglas)
- 8.700 h/a
- Prozesswirkungsgrad: ca. 49 %

### Erwärmung derzeit

- rein brennstoffbasiert
- brennstoffbasiert mit elektrischer Zusatzheizung
- vollelektrisch

## Abkühlen & Entspannen

- ≤ 600 °C
- 13 kWh/t (u. a. abhängig von Materialdicke)
- ca. 7,5 Mio. t/a (alle Glassorten)
- 8.700 h/a
- Prozesswirkungsgrad: ca. 45 %

### Erwärmung derzeit

- meist über horizontal installierte Gasbrenner
- z. T. ohne aktive Beheizung



Abbildung 1: Prozessschritte der Glasherstellung,  
Eigene Darstellung in Anlehnung an [4], [24], [25], [26], [27]

# 3.2 Technologieauswahl und Hybridisierungsoptionen

Nur Glassorten geeignet mit möglichst hohem Anteil an frei beweglichen Ionen

### Hybridisierungsoptionen Schmelze:

- Ausbau der elektrischen Zusatzheizung
- Umrüstung bzw. parallele vollelektrische Schmelzwanne

### Hybridisierungsoptionen Kühlöfen:

- Lufterwärmung oder Strahlungserwärmung

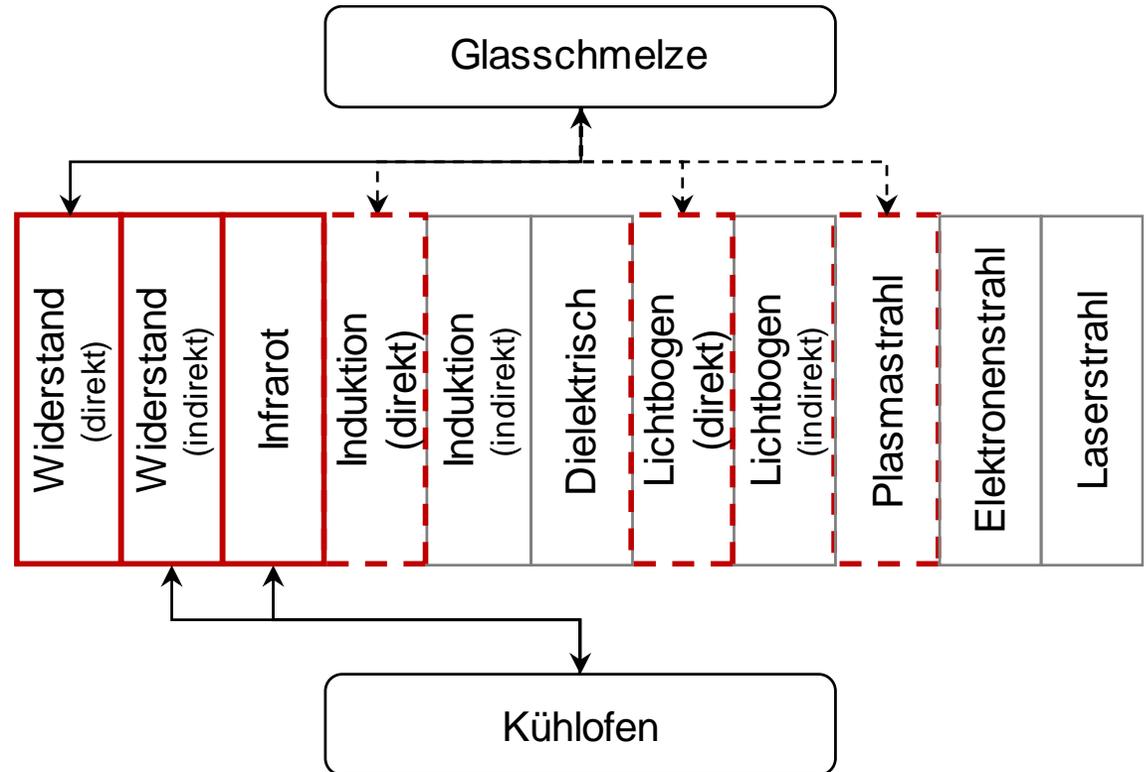


Abbildung 2: Technologien zur hybriden Prozesswärmebereitstellung

# 3.3 Technisches Substitutionspotenzial

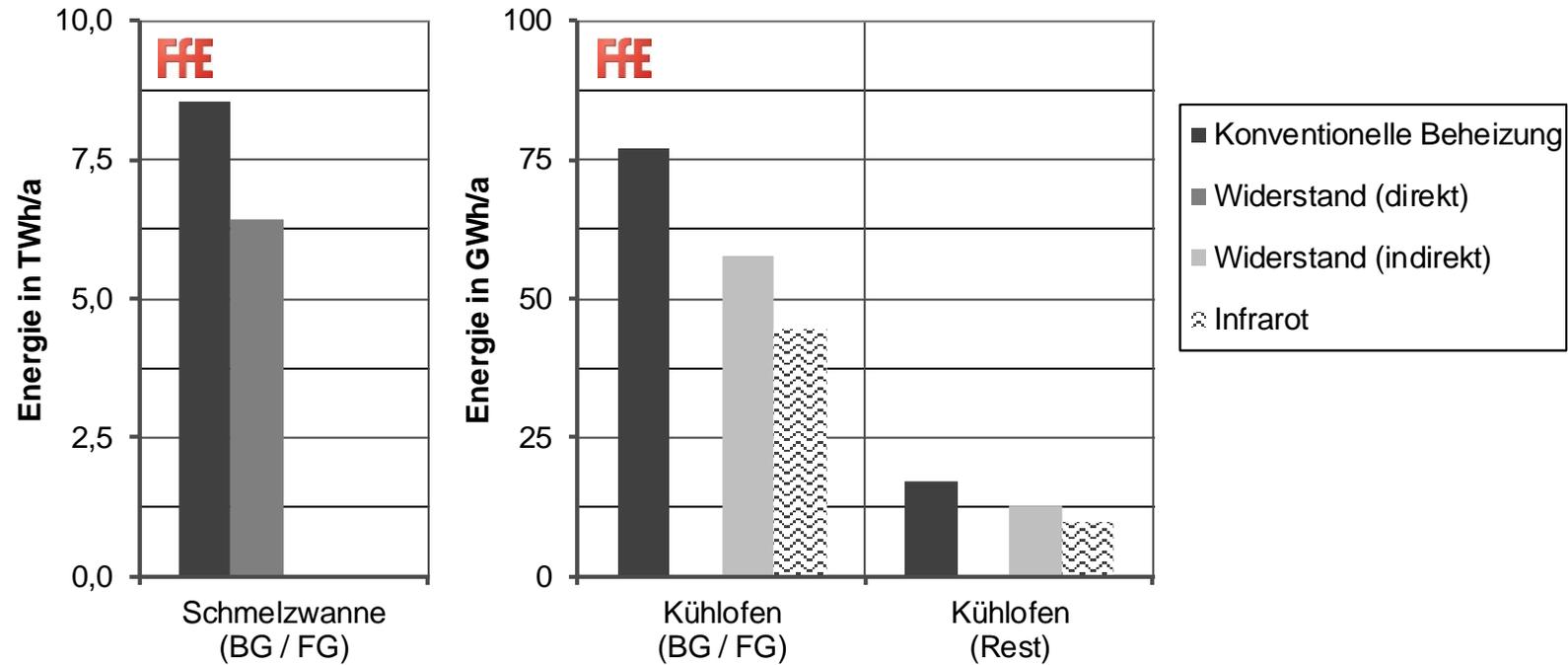


Abbildung 3: Technisches Substitutionspotenzial nach Prozess und Erwärmungsverfahren in der deutschen Glasindustrie

Zusätzlicher elektrischer Leistungsbezug für Hybridbetrieb:

- Schmelze: ca. 7 MW<sub>el</sub> (Behälterglas) bzw. 29 MW<sub>el</sub> (Flachglas) je Wanne
- Kühlöfen: ca. 5 kW<sub>el</sub> je Wanne

## 3.4 Hemmnisanalyse – Glasindustrie

- Wannenlaufzeit 10-15 Jahre, währenddessen keine Umbaumaßnahmen an aktiver Wanne möglich
- „Echter“ bivalenter Betrieb: veränderte Abgasvolumina, dadurch andere Wannengeometrie notwendig
- Tendenziell grundsätzlicher Platzmangel aufgrund historischer Gebäude
- Parallelbetrieb durch Umschalten aktiver Produktionslinien nicht möglich
- Strominfrastruktur nicht ausreichend
- Erhöhtes Risiko einer Produktionsstörung
- Beeinflussung des Temperatur-Zeit-Regimes
- Wirtschaftlichkeit unter derzeitigen Rahmenbedingungen nicht gegeben



Quelle: [bvglas.de](http://bvglas.de)

Hybridisierung problematisch bis nicht durchführbar!

# 3.5 Hybridisierungs- bzw. Substitutionspotenzial im Vergleich

## Papierindustrie

---

- Hybridisierung der Trockenpartie bzw. der Dampfbereitstellung (ca. 140 °C) mittels
  - Elektro(den)kessel
  - Infrarot
  - Dielektrisch
  - Induktion
- Zusätzlicher elektrischer Leistungsbezug:
  - ca. **20 MW<sub>el</sub>** je Werk für hybride Dampferzeugung
  - ca. **14 MW<sub>el</sub>** je Werk für hybride Infrarottrocknung

## Zementindustrie

---

- Hybridisierung des Ofenprozesses (ca. 830 – 1.450 °C) mittels
  - maßgeblich Plasmabrenner
- Zusätzlicher elektrischer Leistungsbezug:
  - bis zu **90 MW<sub>el</sub>** je Zementwerk mit Klinkerbrennen und Vorcalcinierung

# Agenda

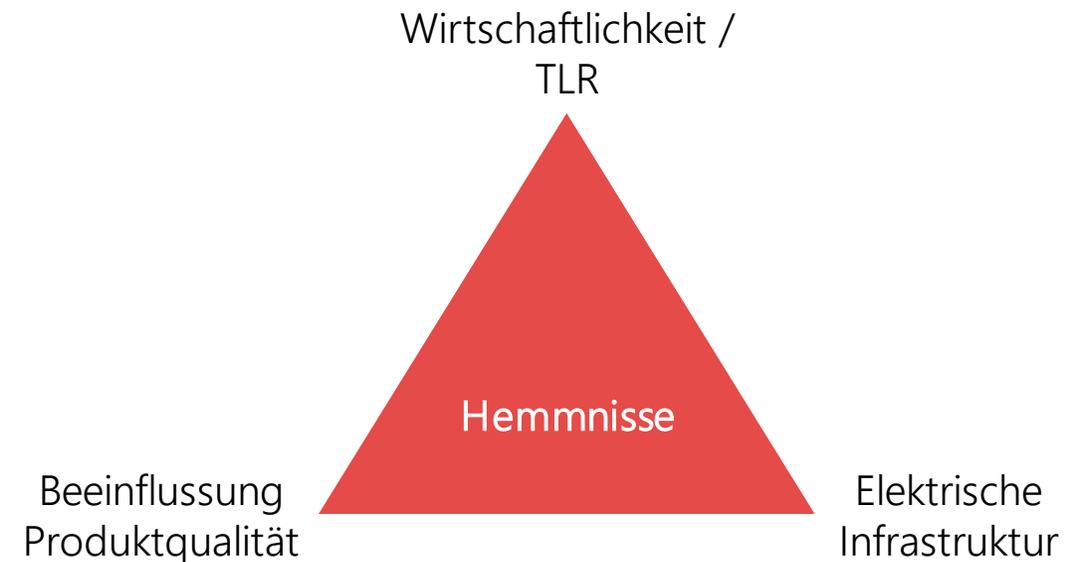
- 
- 1 Motivation, Zielsetzung und Methodik
  - 2 Technologieanalyse thermoelektrischer Erwärmungsverfahren
  - 3 Branchen- und Potenzialanalyse (Bsp. Glasindustrie)
  - 4 Schlussfolgerungen und Ausblick

## 4 Schlussfolgerungen und Ausblick

- Je nach eingesetzter Technologie sind alle benötigten Temperaturniveaus der Grundstoffindustrie erreichbar
- Hybride Erwärmungsmethode von individuellen Prozess- und Umgebungsbedingungen abhängig

### Hybridisierung

- für **Glasindustrie** problematisch bis nicht durchführbar
- für **Papierindustrie** auf Versorgungsebene heute schon sehr gut umsetzbar
- für **Zementindustrie** möglich, aber technologischer Entwicklungsstand heute noch nicht ausreichend



Hybridisierung ↔ Elektrifizierung ↔ Flexibilisierungsmaßnahmen

# Literatur

- [1] Rudolph, M.; Schaefer, H.: Elektrothermische Verfahren - Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1989
- [2] De Wachter, Bruno: Introduction to Industrial Electrical Process Heating. Brüssel: European Copper Institute, 2015.
- [3] Was ist Induktionserwärmung?. Reichenbach: Inductoheat Europe GmbH, 2015.
- [4] Imenokhoyev, Ivan et al.: Mikrowellenerwärmungstechnik: Potentiale und Grenzen. In: DKG Vol. 89, No 11-12. Eschenfelden: Linn High Therm GmbH, 2012.
- [5] Imenokhoyev, Ivan et al.: Microwave Heating Technology: Potentials and Limits. Eschenfelden: LINN HIGH THERM GmbH, 2013.
- [6] Industrial microwave technology - High-performance solutions for your industrial processes. Marseille: IDCO, 2014.
- [7] Understanding the Benefits of Electric Arc Furnace Technology. Manchester: Washington Mills Electro Minerals Limited, 2015.
- [8] Handbuch Elektrische Energietechnik. Braunschweig/Wiesbaden: Liviu Constantinescu-Simon, 1996.
- [9] 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.
- [10] Center for Materials Production: Plasma Arc Technology. Pittsburgh: EPRI Center for Materials Production (CMP), 1991.
- [11] 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.

# Literatur

- [12] Lexikon Produktionstechnik Verfahrenstechnik. Düsseldorf: Heinz Hiersig, 1995.
- [13] Center for Materials Fabrication: Indirect Resistance Heating. In: Techapplication Vol.3, Nr.7. Columbus, Ohio: EPRI Center for Materials Fabrication (CMF), 1994.
- [14] 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
- [15] 2012 ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment. Tullie Circle, Atlanta: ASHRAE, 2012.
- [16] Schmidt, Peter: Der Elektronenstrahl, ein faszinierendes Instrument für neue Perspektiven in der Schweißtechnik. Rudolfstetten: SwissBeam AG, 2015.



## Frank Veitengruber M. Sc.

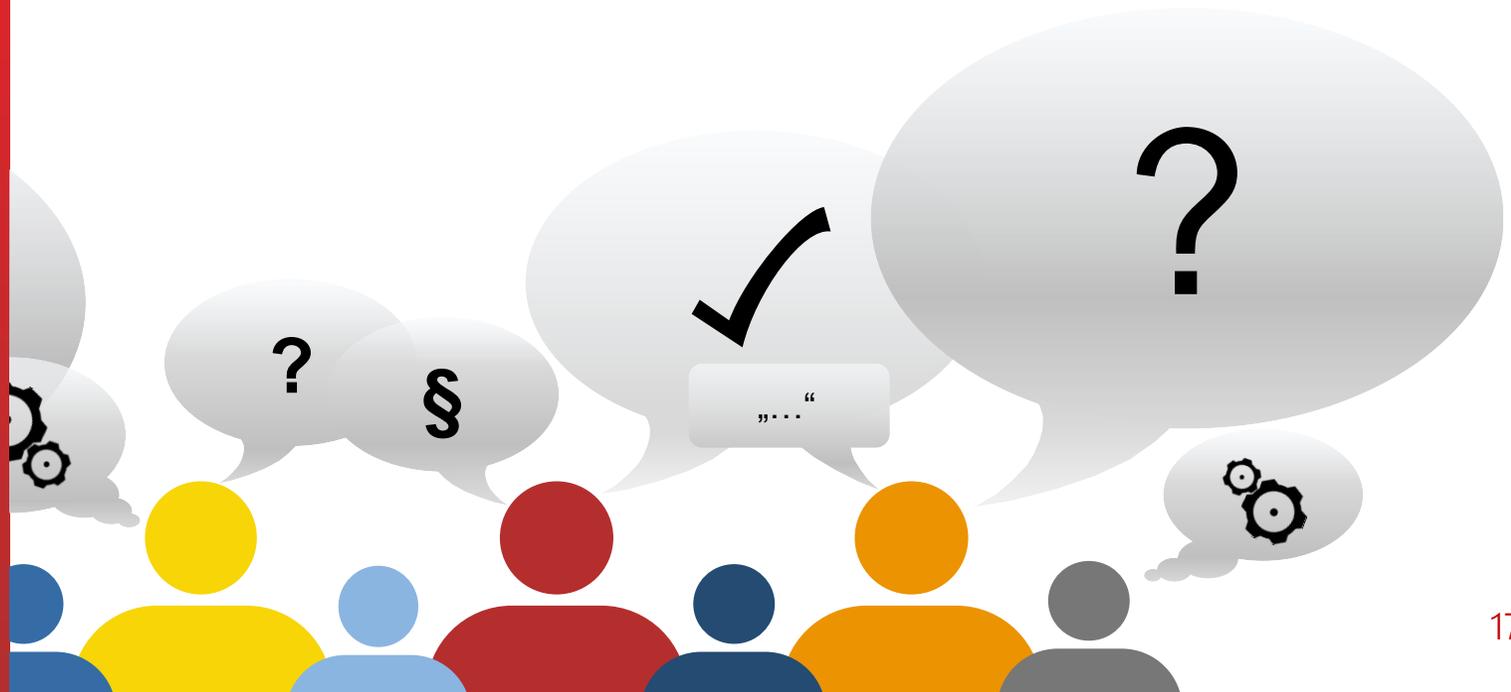
Wissenschaftlicher Mitarbeiter / Projektgenieur  
 Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH

Tel.: +49(0)89 15 71 21- 48

Email: [fveitengruber@ffe.de](mailto:fveitengruber@ffe.de)

Internet: [www.ffegmbh.de](http://www.ffegmbh.de)

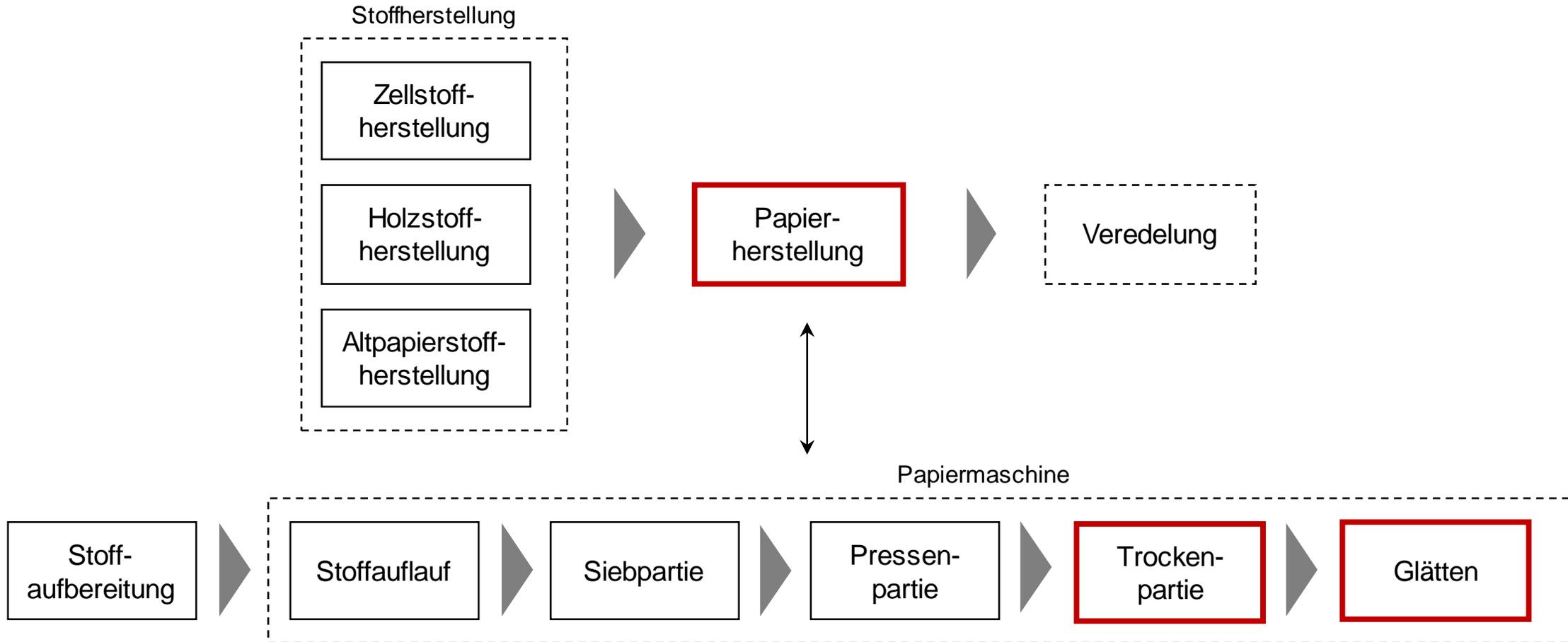
Twitter: [@FFe\\_Muenchen](https://twitter.com/FFe_Muenchen)



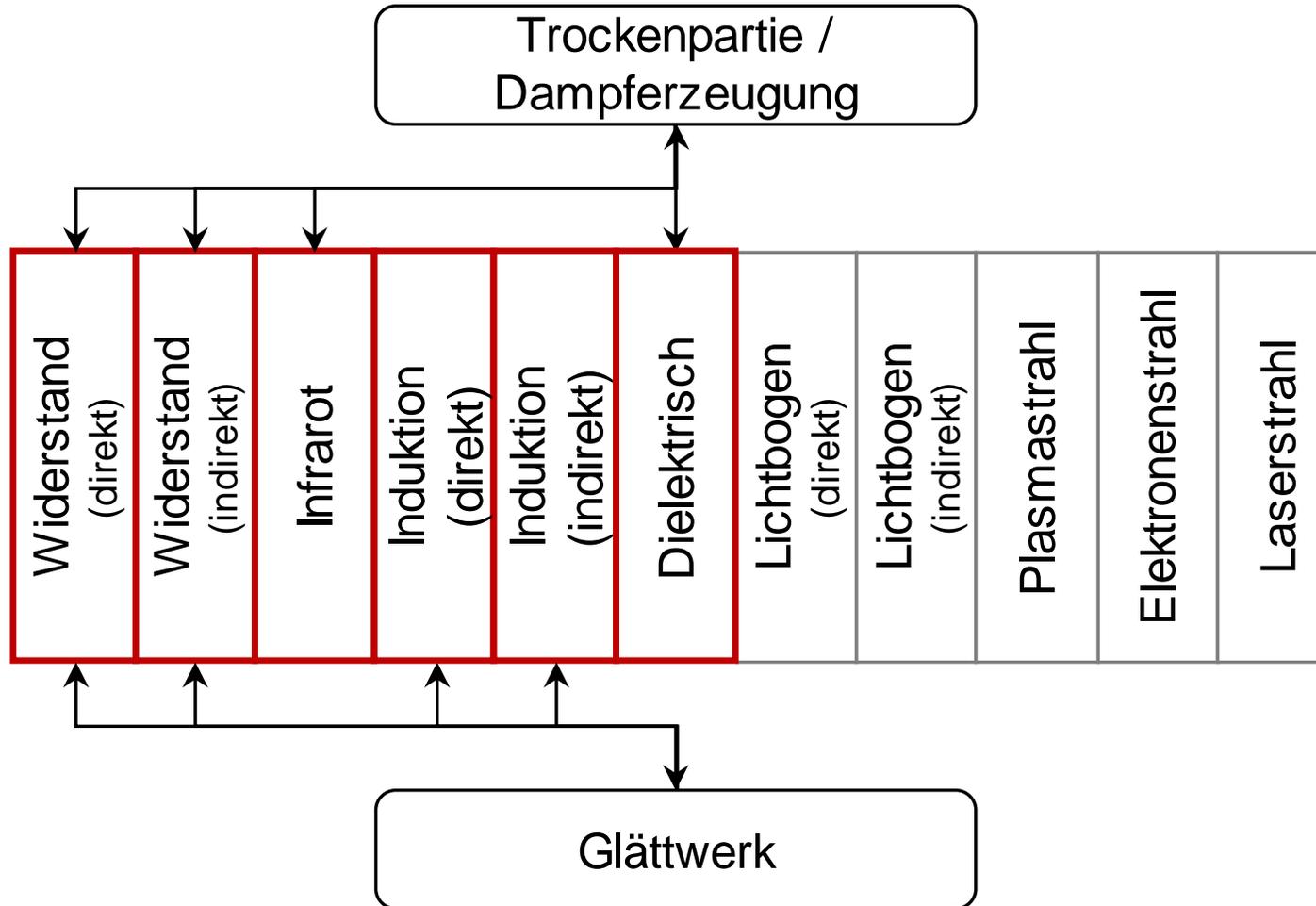
Prozessschritt	Wirkungsgrad	Bemerkungen
Schmelzwanne	49 % <sup>a</sup>	ca. 60 % bei vollelektrischer Schmelze <sup>a</sup>
Kühlofen	45 % <sup>b</sup>	typische Befeuerung mit Gasbrenner
Trockenpartie	48 % <sup>ES,c</sup>	85 % <sup>ES</sup> Konventionelle Dampferzeugung und
Glättwerk	45 % <sup>ES</sup>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

<sup>ES</sup> Expertenschätzung

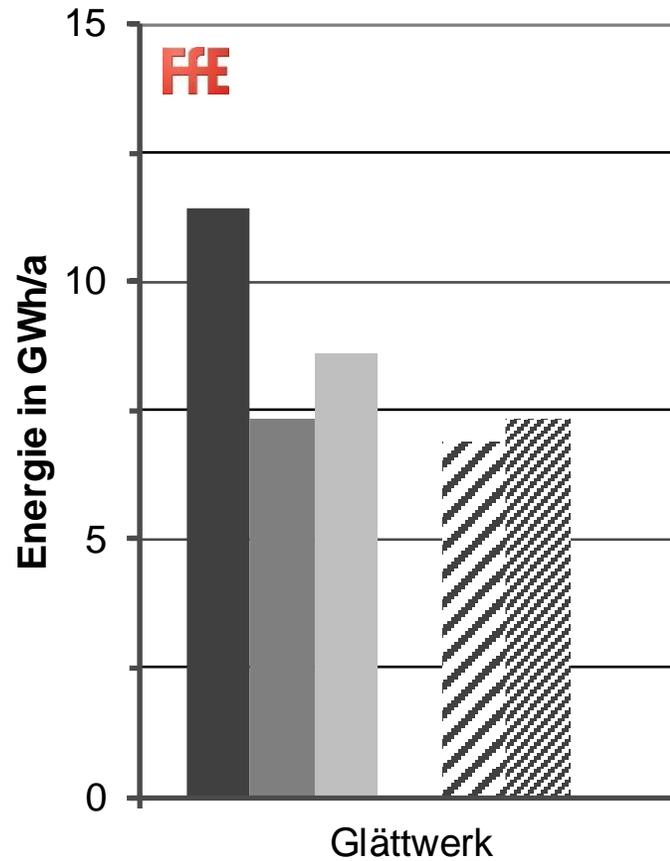
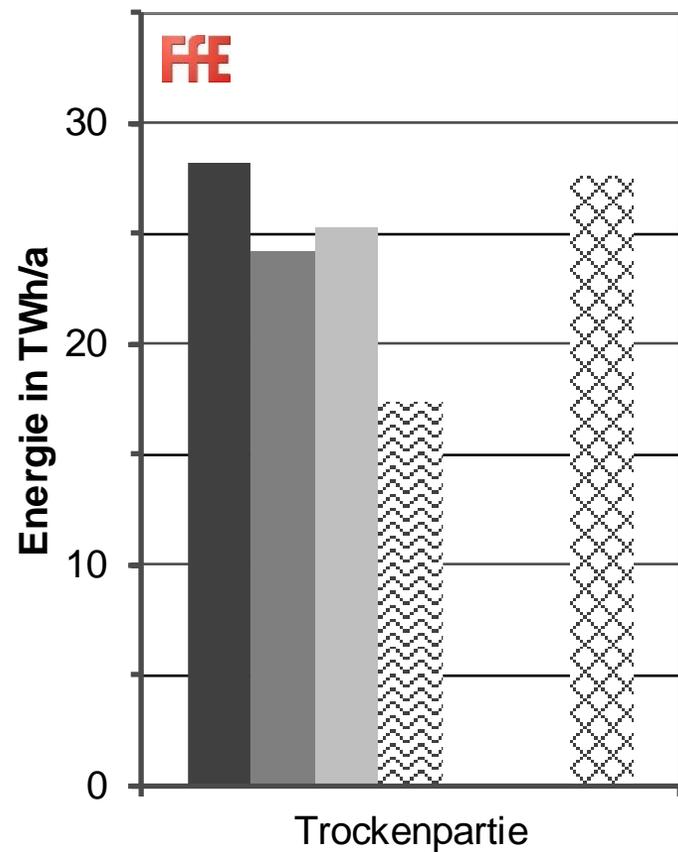
# Backup – Papier



# Backup – Papier

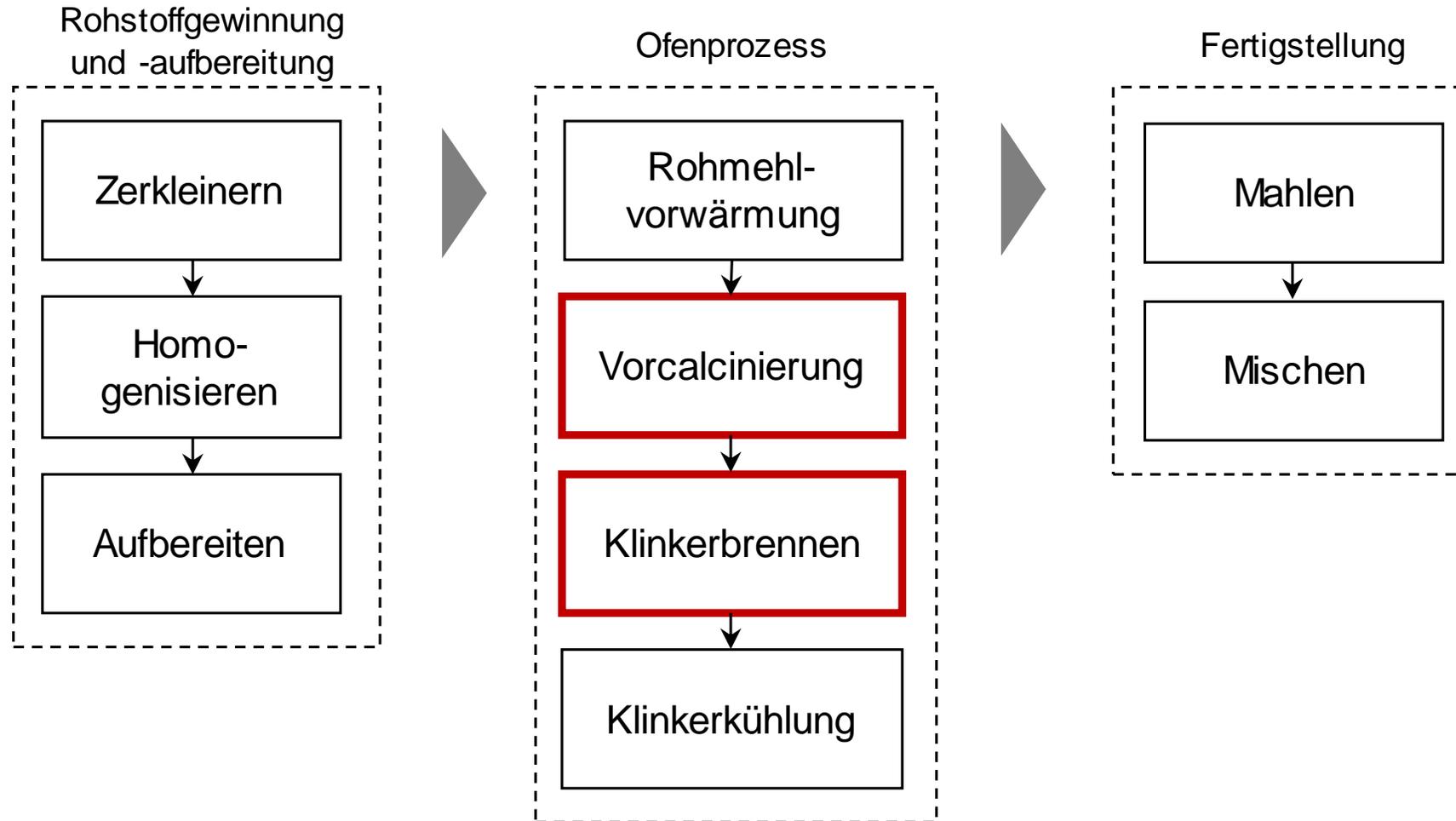


# Backup – Papier

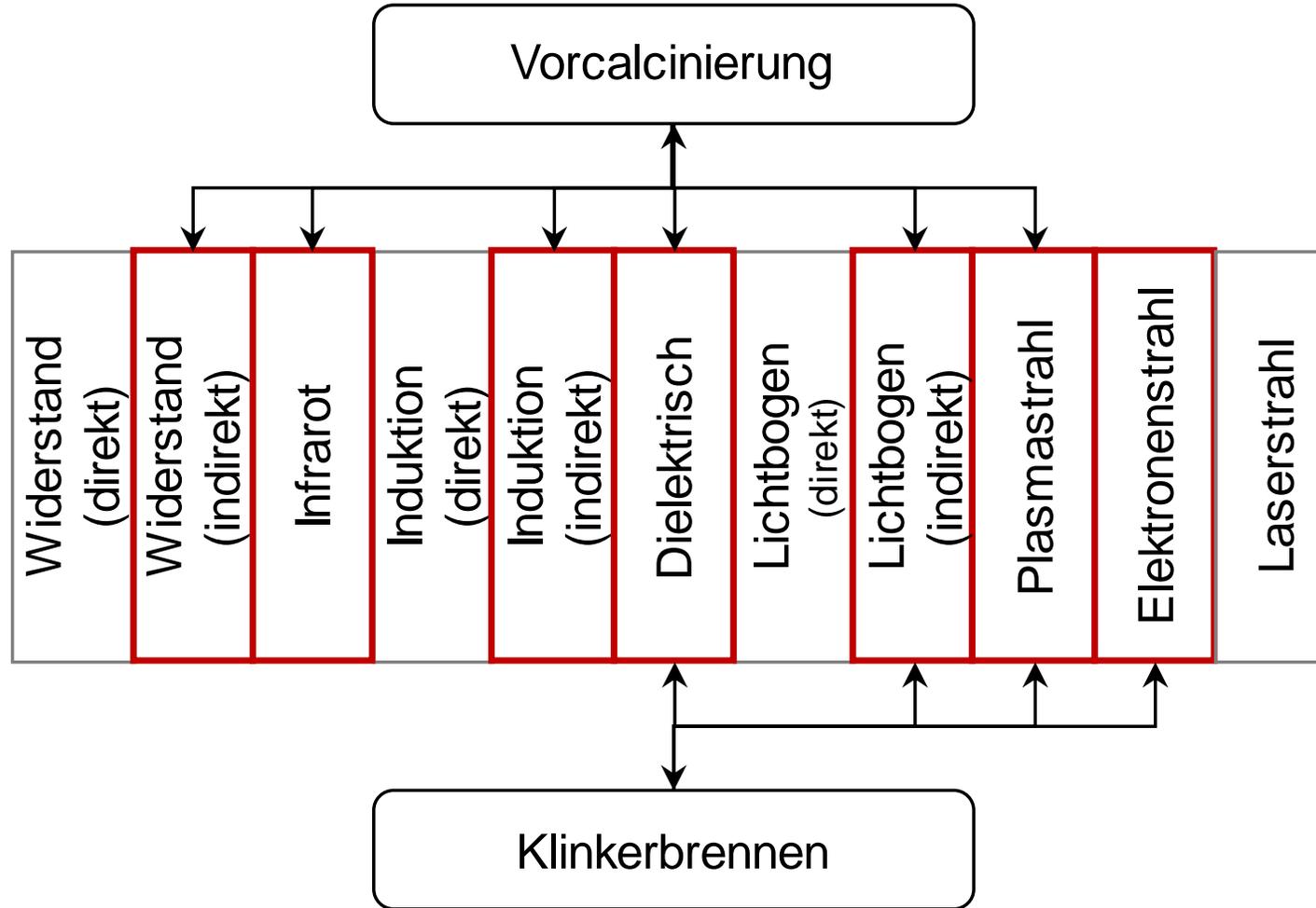


- Konventionelle Beheizung
- Widerstand (direkt)
- Widerstand (indirekt)
- ⋈ Infrarot
- ▨ Induktion (direkt)
- ▩ Induktion (indirekt)
- ⋄ Dielektrisch

# Backup – Zement



# Backup – Zement



# Backup – Zement

