

Energie- und Ressourceneffizienz in der grobkeramischen Industrie

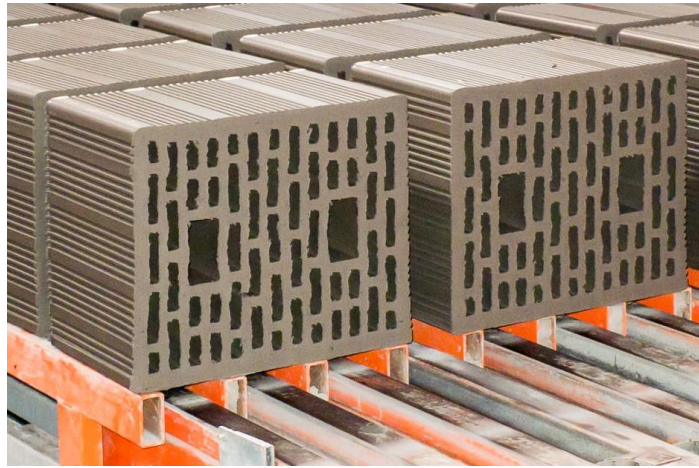
Dr.-Ing. Rigo Giese / Eckhard Rimpel

Institut für Ziegelforschung Essen e. V.
Am Zehnthof 197
45307 Essen

IZF- 1. Westerwälder Industriekolloquium, 20. November 2024

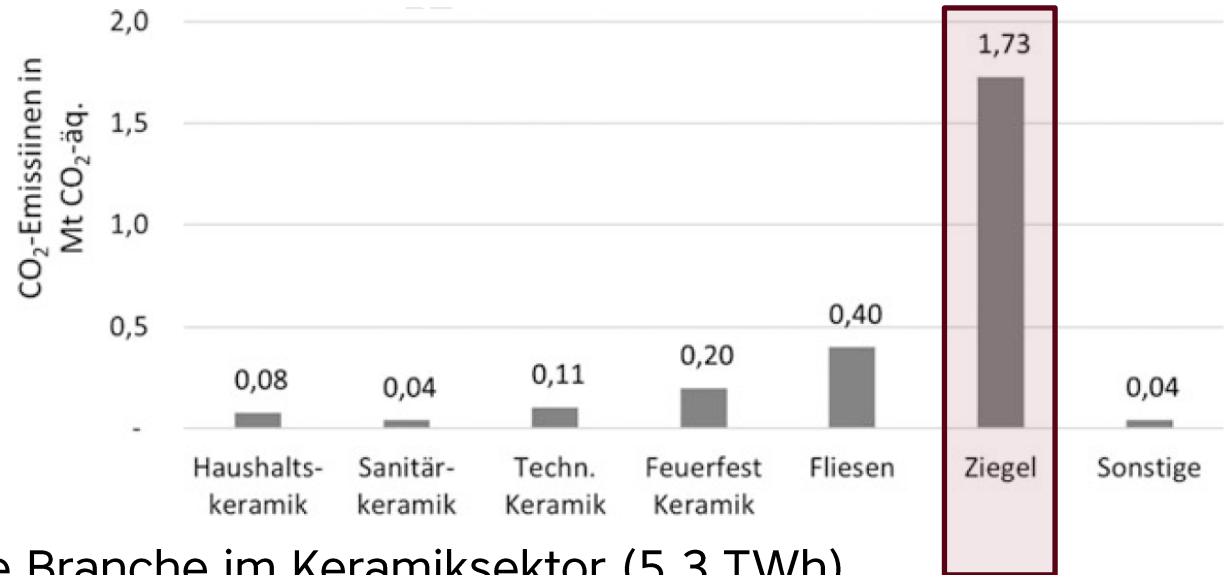


Produkte aus der grobkeramischen Industrie



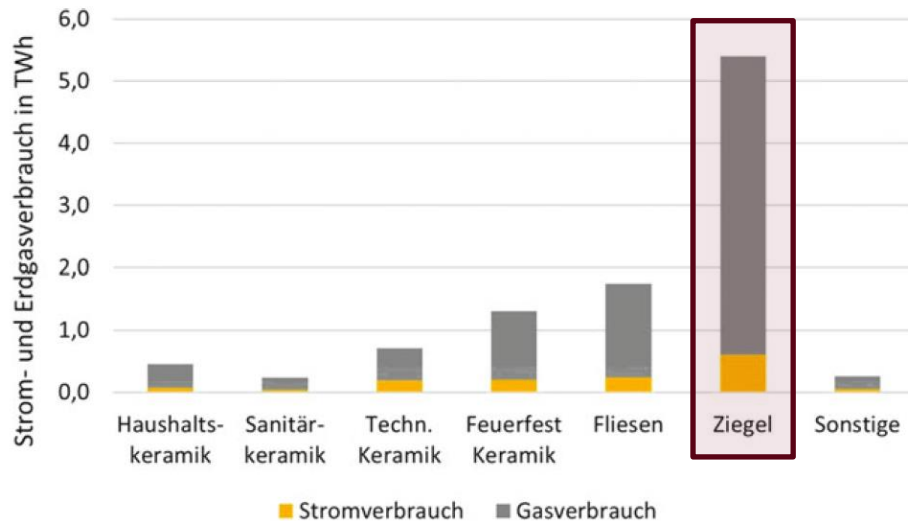
Energiebedarf Ziegelindustrie im Vergleich

(Jahn, et al., 2022)



■ Energieintensivste Branche im Keramiksektor (5,3 TWh)

■ Größter Emittent im Keramiksektor (1,74 Mio. tCO₂ pro Jahr)

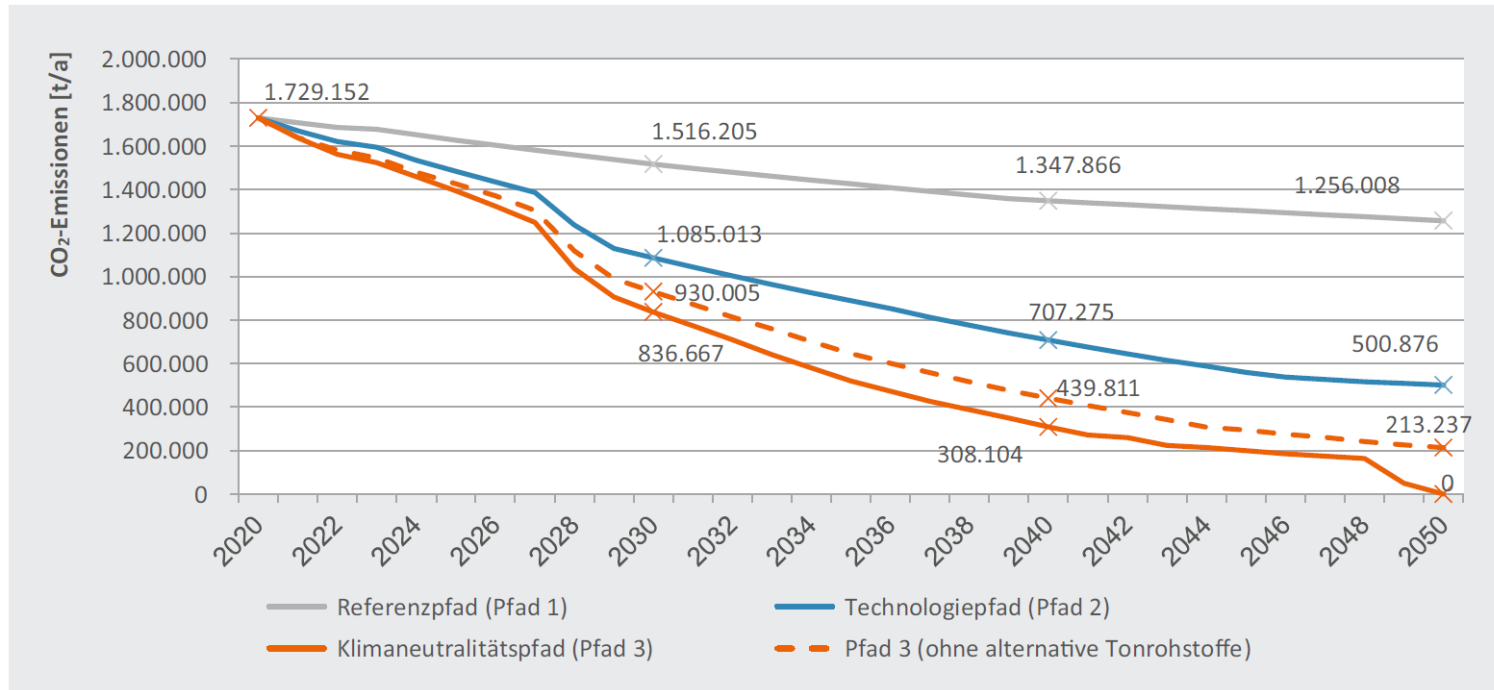


(Jahn, et al., 2022)

Dekarbonisierte Prozesswärme

Wege zur Senkung der CO₂-Emissionen

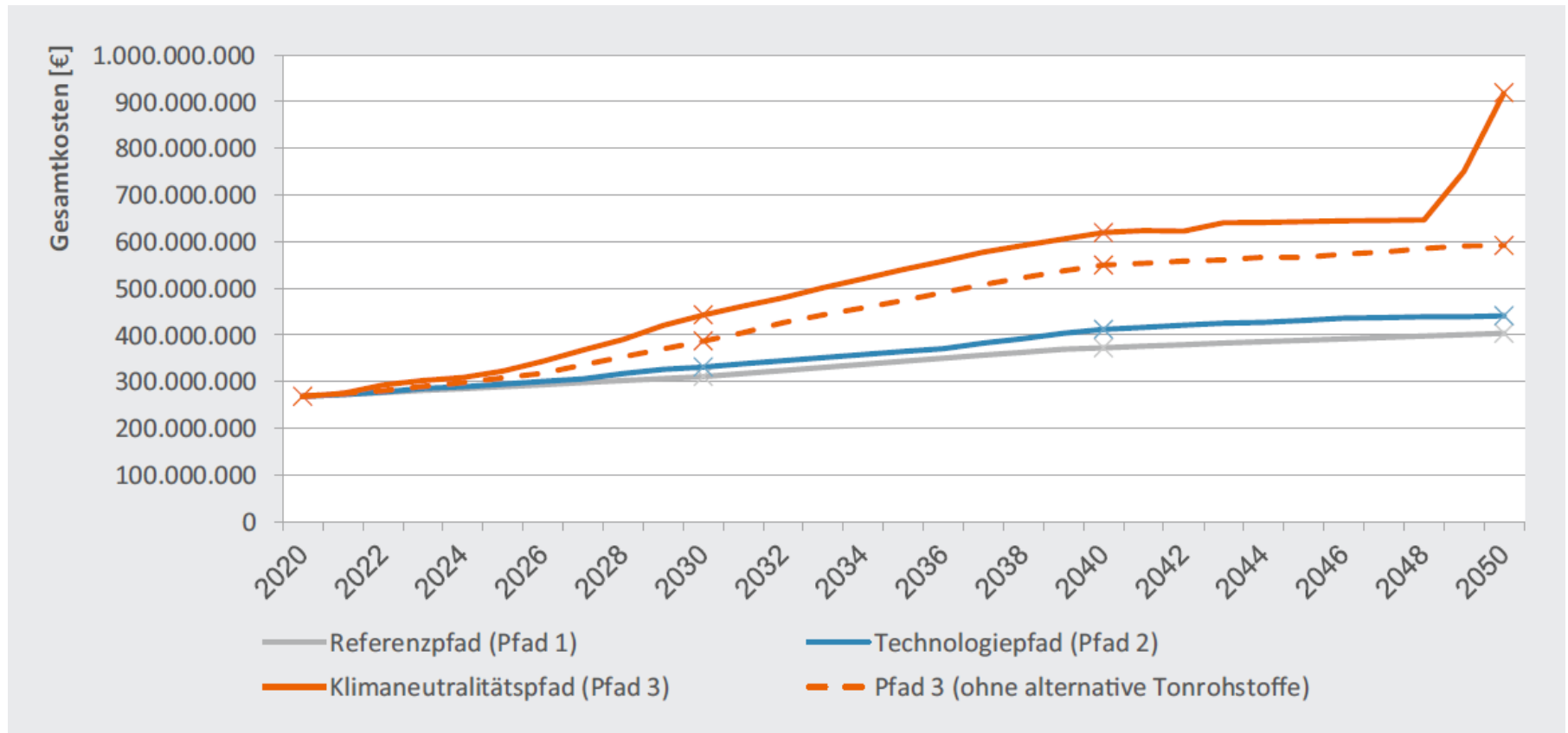
- Prozesseffizienz erhöhen → Senkung Brennstoffbedarf
- Brennstoffe mit niedrigem CO₂-Footprint (Erdgas-Biogas Mischung)
- Prozesse auf regenerative Gase umstellen → Biogas/-methan; grüner Wasserstoff, Ammoniak
- Elektrifizierung → nur sinnvoll aus erneuerbaren Quellen



Quelle: Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland, 2021

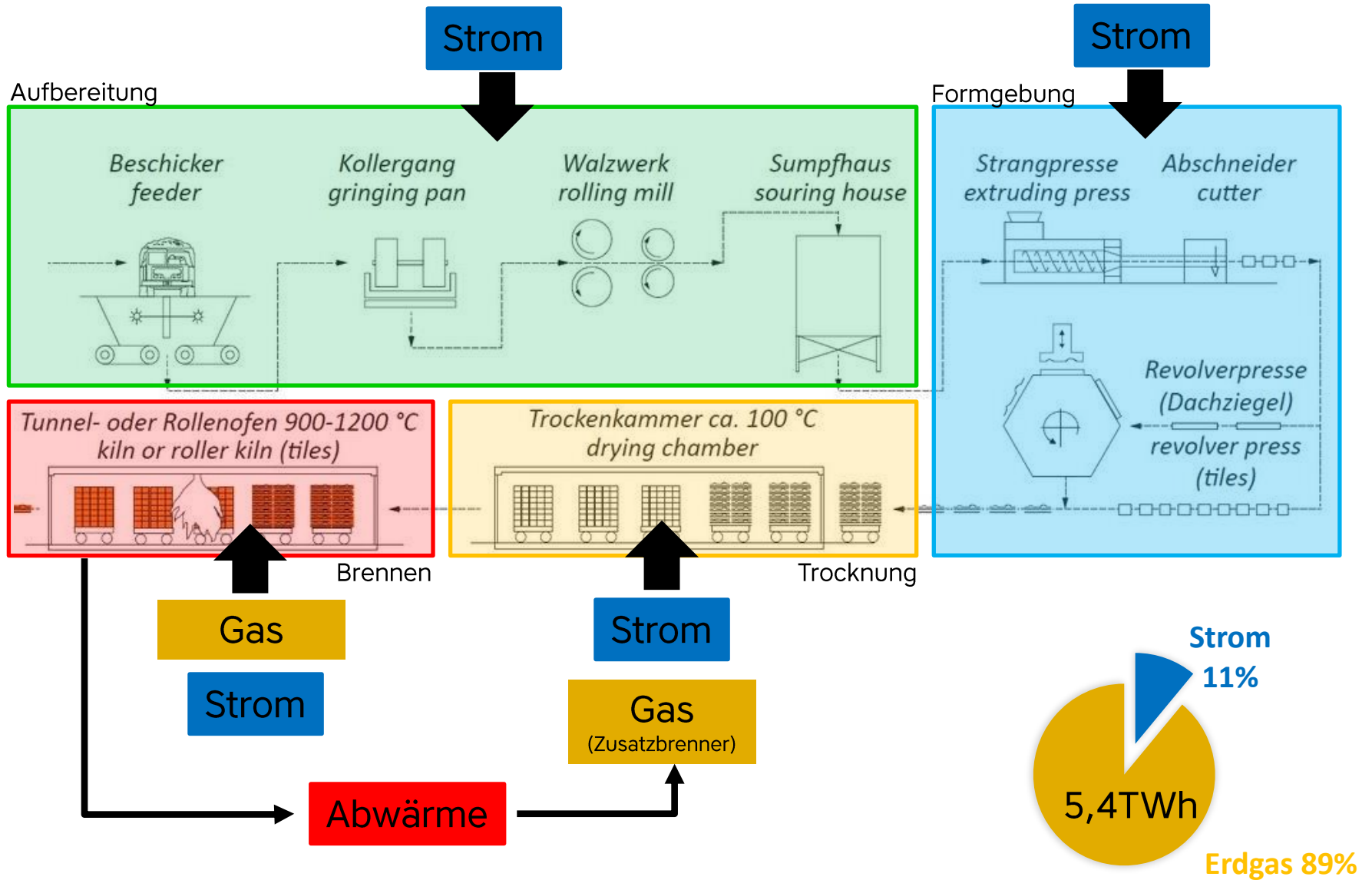
Dekarbonisierte Prozesswärme

Kosten zur Senkung der CO₂-Emissionen



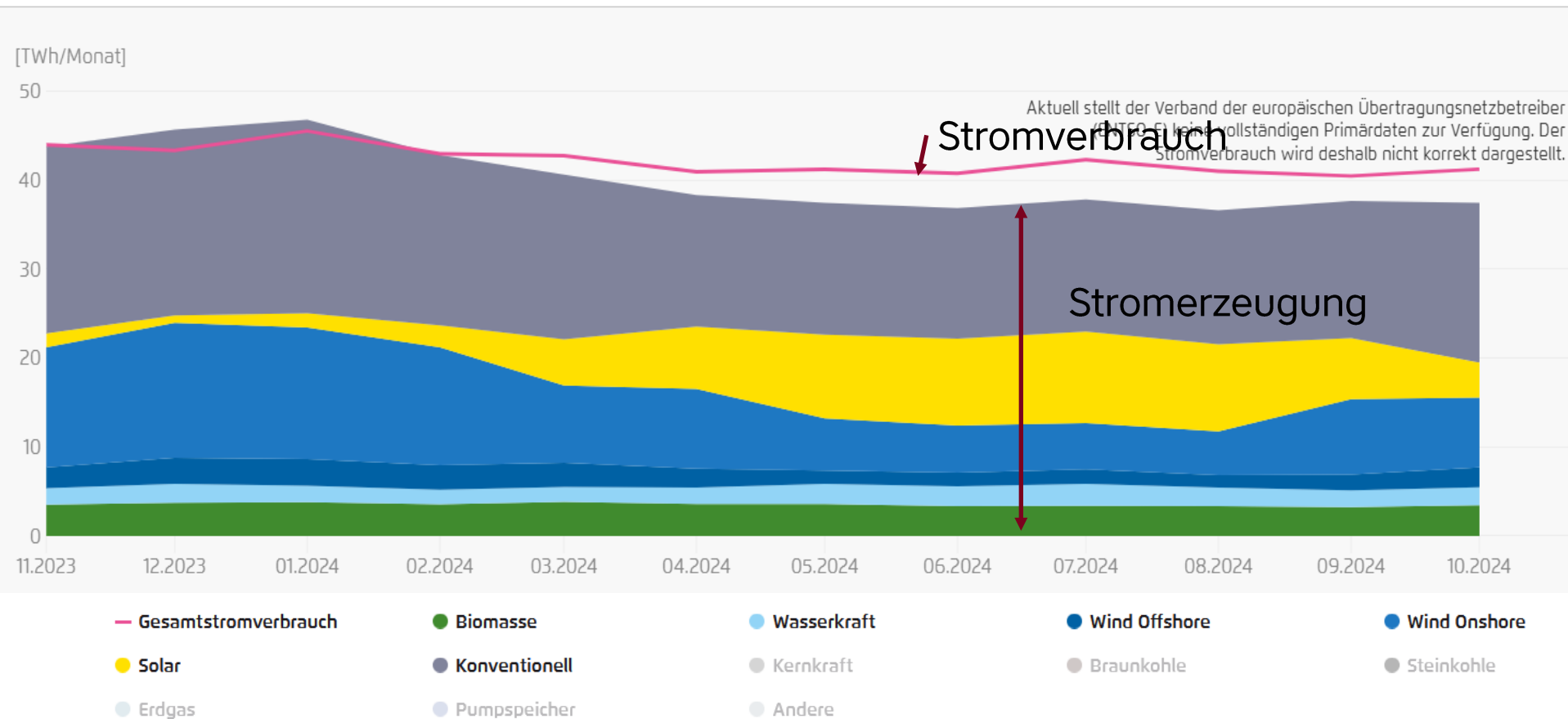
Quelle: Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland, 2021

Energiebedarf Ziegelindustrie



*Quelle: Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland, 2021

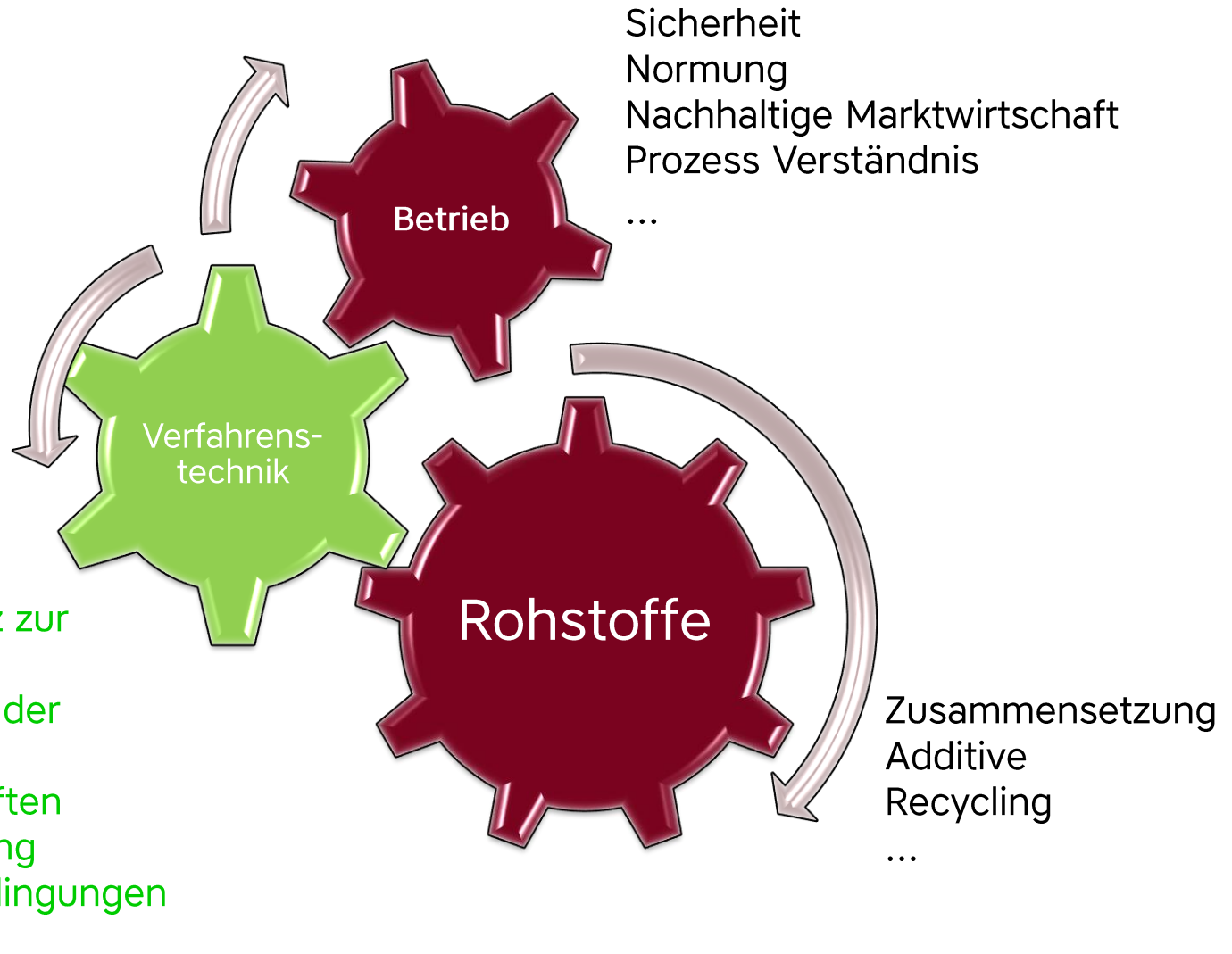
Substitution der fossilen Energieträger



Deutschland ist Energieimportland auch bei 61,5% aus erneuerbaren Energien im ersten Halbjahr 2024

Quelle: Agora Energiewende, Stand 14.11.2024

Quelle: Statistisches Bundesamt, Stand 09.09.2024



spez. Energieverbräuche am Ringofen (1882)

**spez. Energieverbräuche:
(2014)**

MZ: 1325 kJ/kg
418 kJ/kg Rohst.

VMZ: 2275 kJ/kg
-18 kJ/kg Rohst.

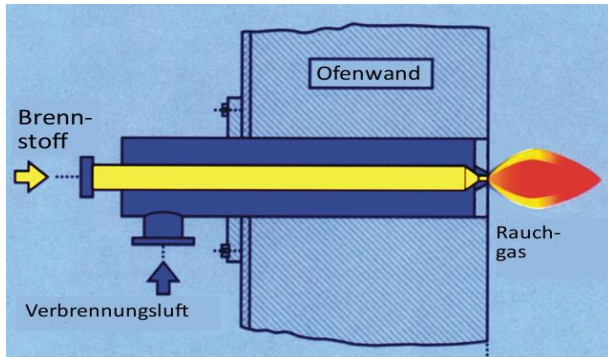
DZ: 2268 kJ/kg
-80 kJ/kg Rohst.

**spez. Energieverbräuche:
(1882)**

1596 kJ/kg

Serial No.	typ of fuel used in Hoffmann anular kiln	fuel used for 1000 bricks (2,5 kg each) [kg coal]	fuel cost per 1000 bricks (3000 Rs/ton) [Rs/1000bricks]	energy consumption [kJ/kg]
1	mineral coal	121	362	1.415
2	mineral coal	174	521	2.035
3	mineral coal	106	319	1.248
4	mineral coal	124	373	1.457
5	mineral coal	121	362	1.415
6	mineral coal	163	489	1.909
7	mineral coal	108	324	1.264
8	mineral coal	106	319	1.248
9	mineral coal	123	369	1.440
10	brown coal	139	416	1.388
11	brown coal	131	394	1.316
12	mineral coal	143	429	1.675
13	mineral coal	127	381	1.491
14	mineral coal	110	330	1.290
15	mineral coal	127	381	1.491
16	mineral coal	123	369	1.440
17	mineral coal	154	461	1.800
18	brown coal	179	536	1.788
19	mineral coal	139	418	1.633
20	brown coal	311	934	3.119
21	mineral coal	129	386	1.507
22	mineral coal	148	444	1.733
23	brown coal	166	497	1.660
24	brown coal	200	600	2.003
25	brown coal	141	424	1.416
26	mineral coal	112	336	1.315
Average		143	430	1.596

■ Vorgewärmte Verbrennungsluft



Verbrennungsrechnung

Der Brenner wirkt auf den Ofenraum und das Brenngut durch Mengenstrom, Geschwindigkeit, Temperatur und O_2 -Gehalt des ausströmenden Verbrennungsgases

Brennstoff:

$$\dot{m}_B, h_U$$

Verbrennungsluft:

$$\dot{m}_L = \lambda \cdot L_{\min} \cdot \dot{m}_B$$

Abgasmenge:

$$\dot{m}_V = (1 + \lambda \cdot L_{\min}) \cdot \dot{m}_B$$

Stöchiometrie:

$$\dot{m}_V = \dot{m}_B + \dot{m}_L$$

Kalorik:

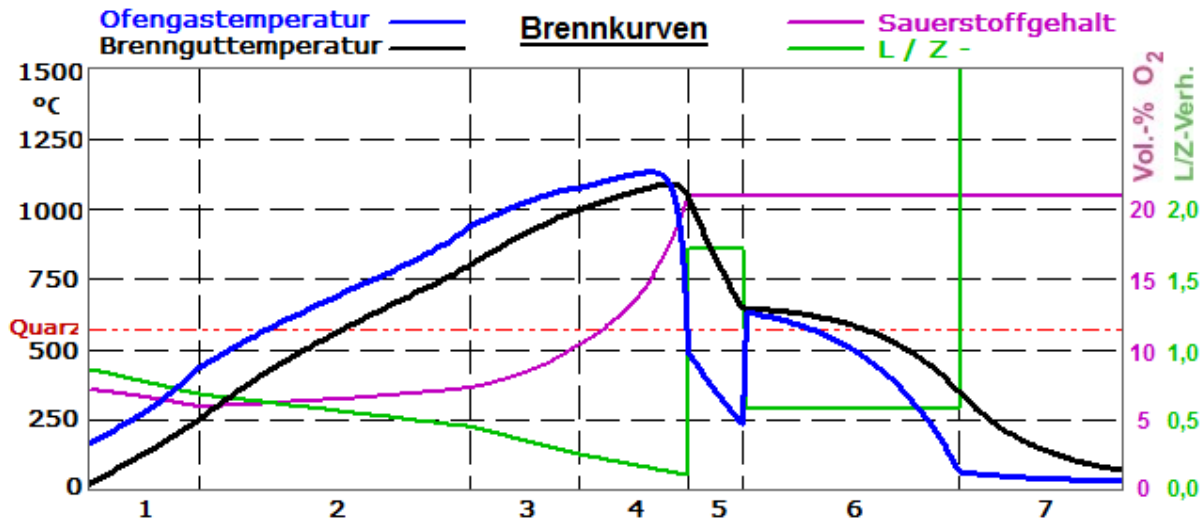
$$\dot{Q}_V = \dot{m}_V \cdot \vartheta_V \cdot c_{pm,V} = \dot{m}_B \cdot h_U + \dot{m}_L \cdot \vartheta_L \cdot c_{pm,L}$$

=



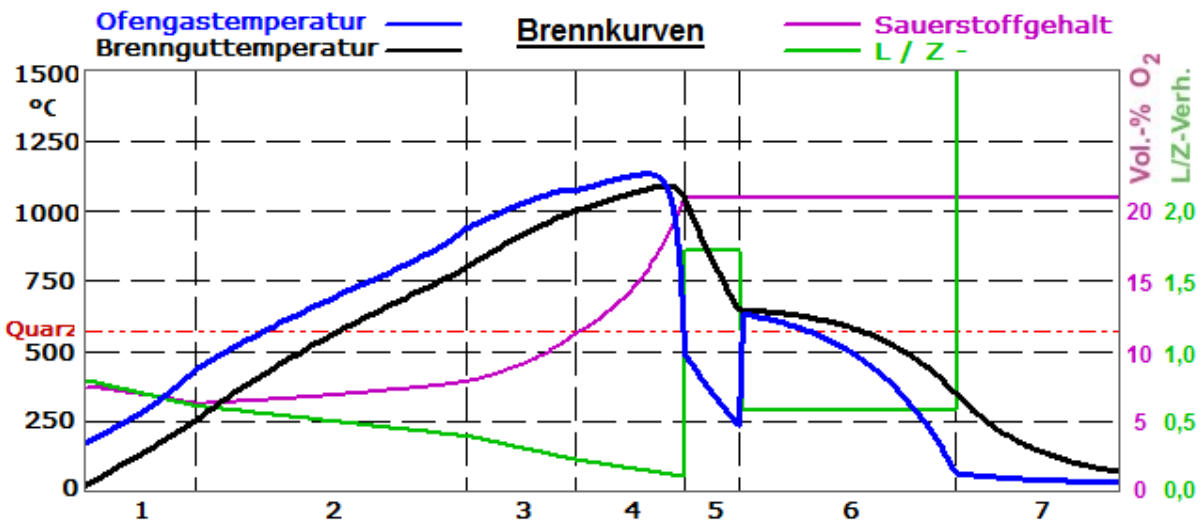
Brennluftvorwärmung

Verbrennungslufttemperatur 30°C



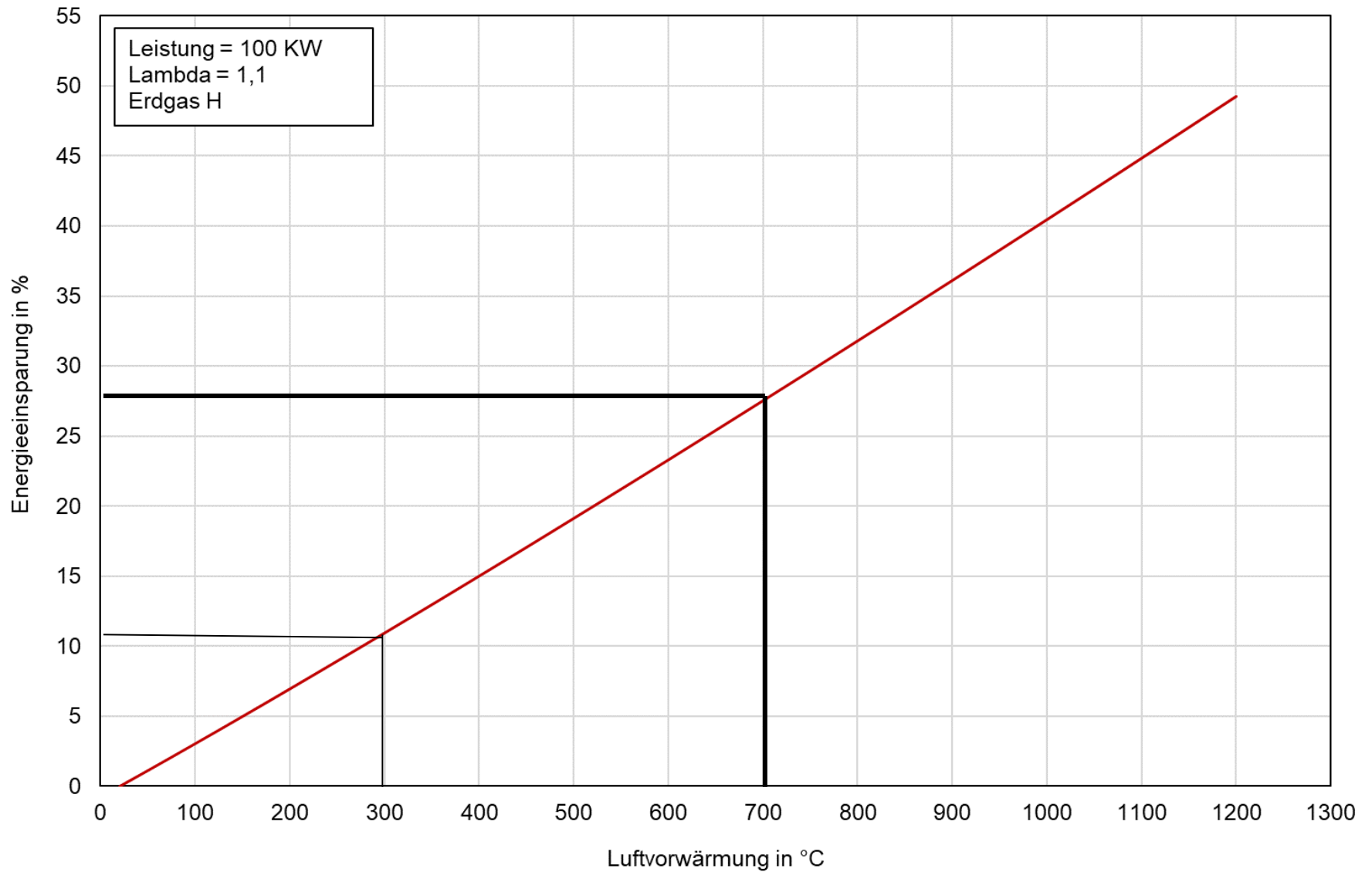
bezogen auf	Energiebilanz		
	kJ / kg	kWh /	kcal /
Brennstoffzufuhr	1508,8	419,1	360,4
Luftzufuhr	115,2	32,0	27,5
einf. Brenngut	0,0	0,0	0,0
einfahrende	0,0	0,0	0,0
Rohstoffreaktionier	0,0	0,0	0,0
Abgasverluste	125,2	34,8	29,9
Luftabsaugungen	1171,4	325,4	279,8
Ausblasungen	0,0	0,0	0,0
ausf. Brenngut	50,0	13,9	11,9
ausfahrende	180,0	50,0	43,0
Isolationsverluste	96,1	26,7	23,0

Verbrennungslufttemperatur 300°C



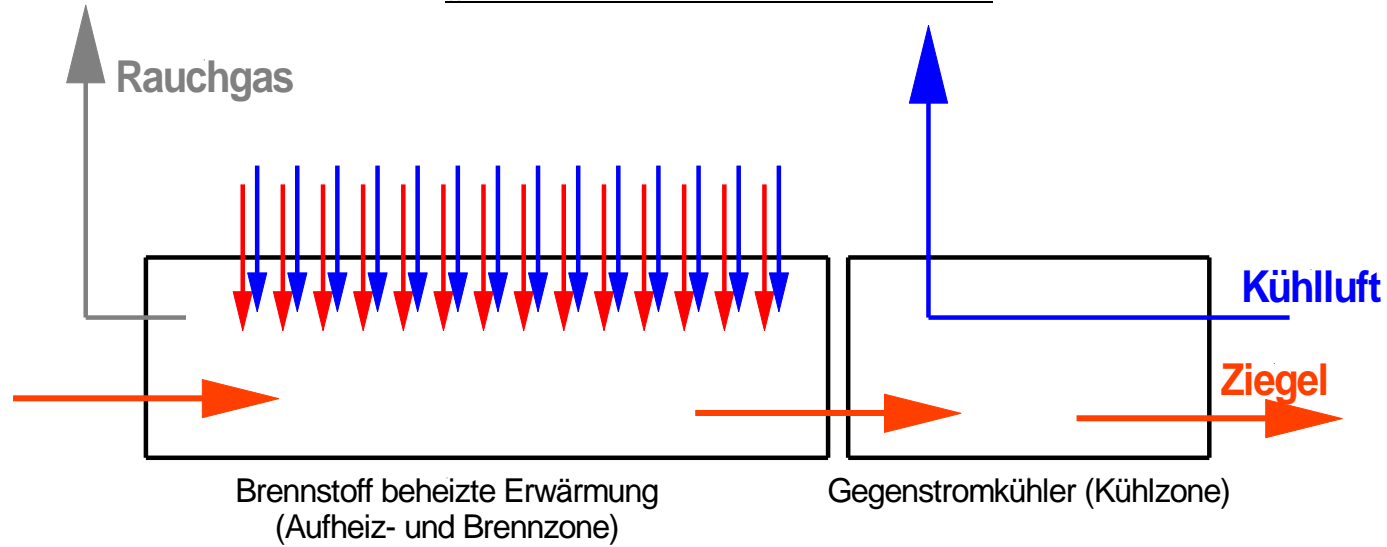
bezogen auf	Energiebilanz		
	kJ / kg	kWh /	kcal /
Brennstoffzufuhr	1355,0	376,4	323,6
Luftzufuhr	264,2	73,4	63,1
einf. Brenngut	0,0	0,0	0,0
einfahrende	0,0	0,0	0,0
Rohstoffreaktionier	0,0	0,0	0,0
Abgasverluste	120,2	33,4	28,7
Luftabsaugungen	1171,4	325,4	279,8
Ausblasungen	0,0	0,0	0,0
ausf. Brenngut	50,0	13,9	11,9
ausfahrende	180,0	50,0	43,0
Isolationsverluste	96,1	26,7	23,0

Brennluftvorwärmung

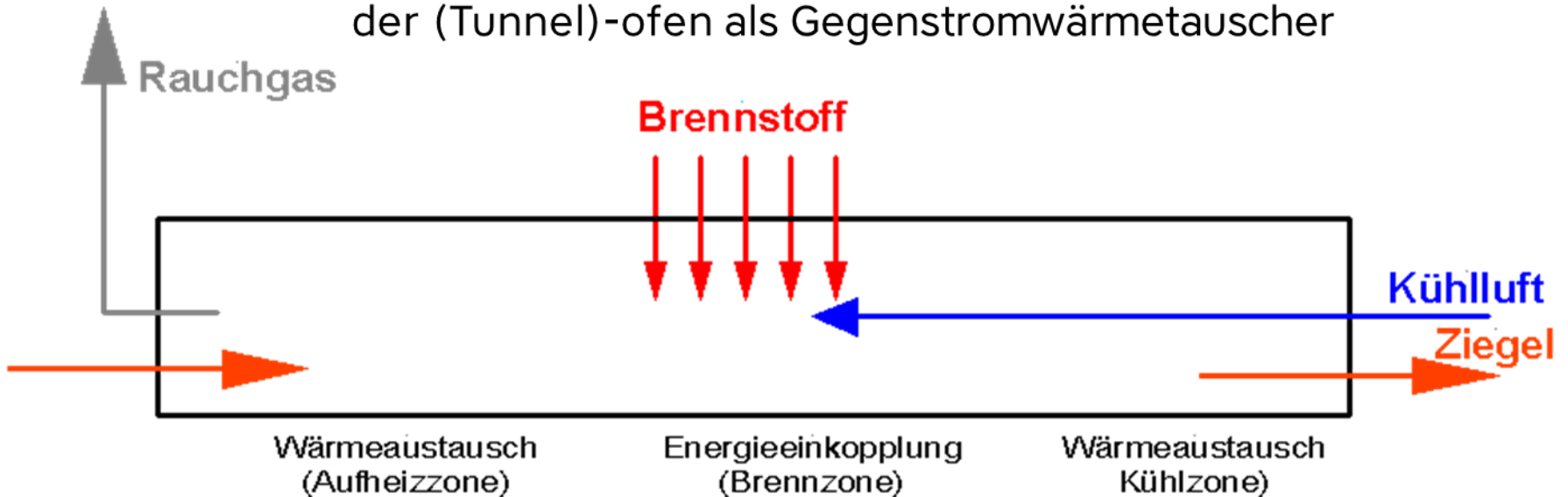


Brennluftvorwärmung

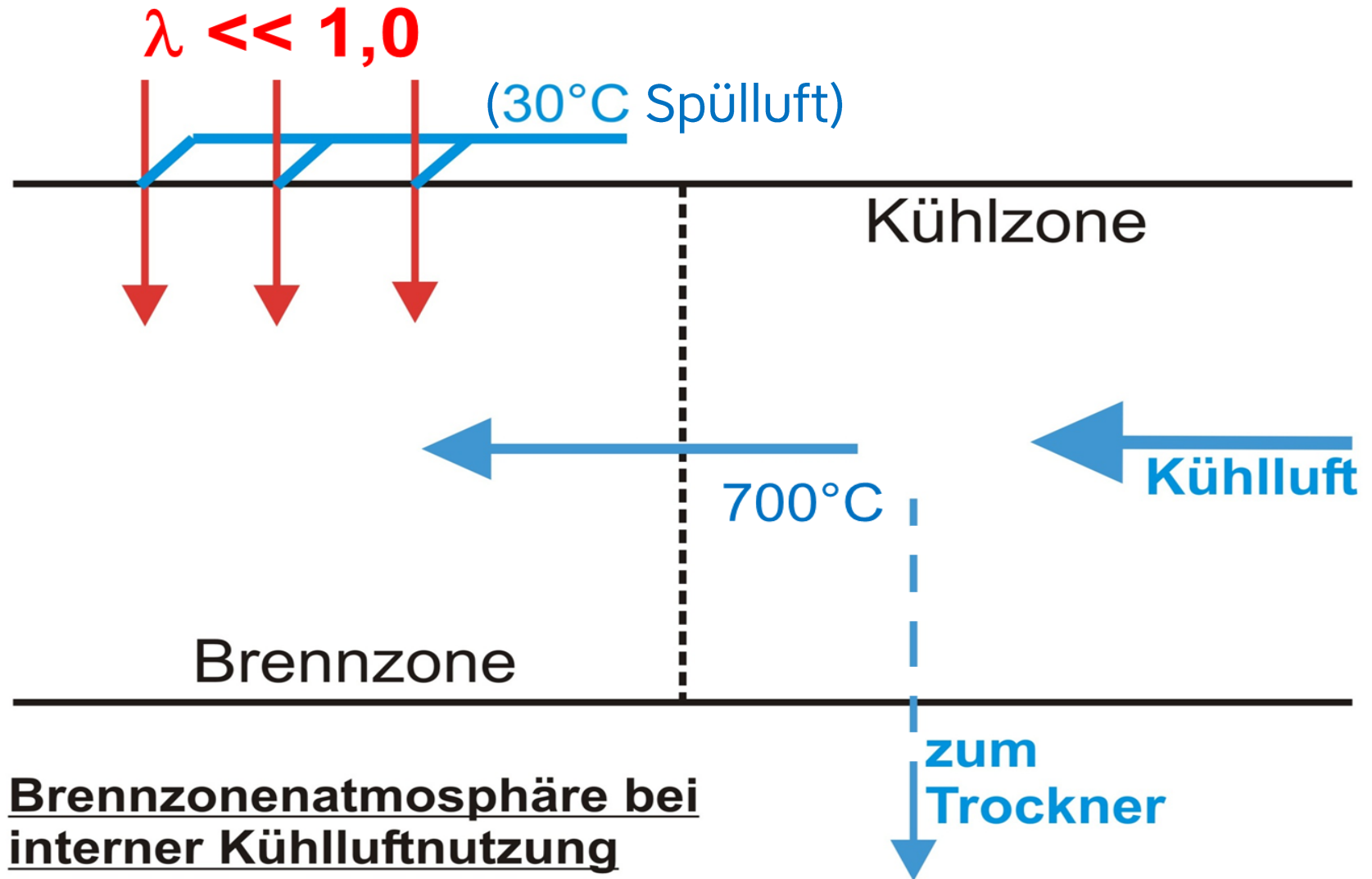
„moderner“ Tunnelofen



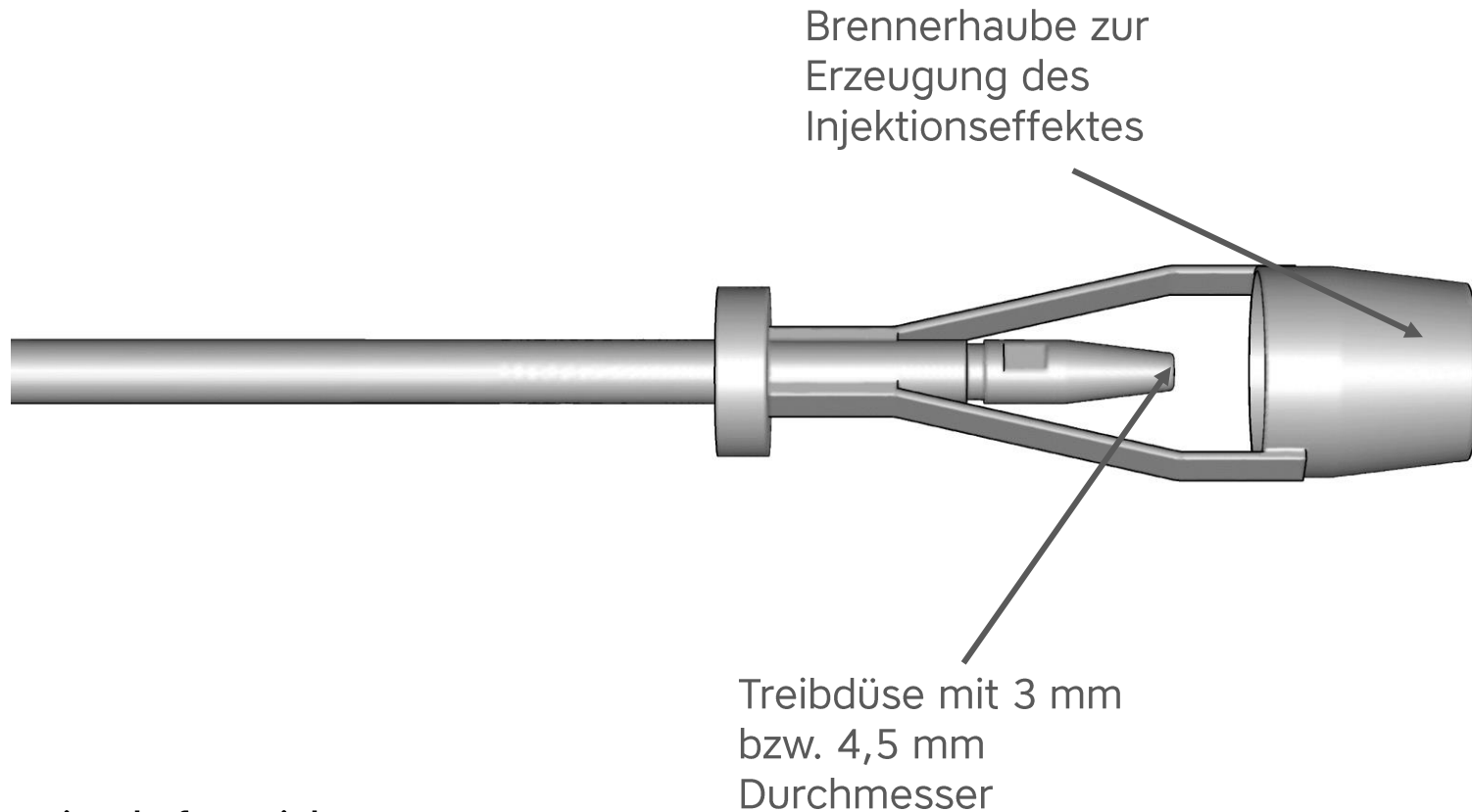
der (Tunnel)-ofen als Gegenstromwärmetauscher



Interne Kühlluftnutzung



Neuartiges Brennerkonzept mit Injektordüse



Gemeinschaftsprojekt



Neuartiges Brennerkonzept mit Injektordüse

Messung vom 09.-11.01.2018			
zugeführte Energie:	kJ/kg	kWh/kg	kcal/kg
Erdgas H (298 m _N ³ /h)	637	0,18	152

Messung vom 26.09.2019			
zugeführte Energie:	kJ/kg	kWh/kg	kcal/kg
Erdgas H (213 m _N ³ /h)	521	0,14	124

spez. Energieeinsparung ca. (14-18 %)

■ Gaseigenschaften

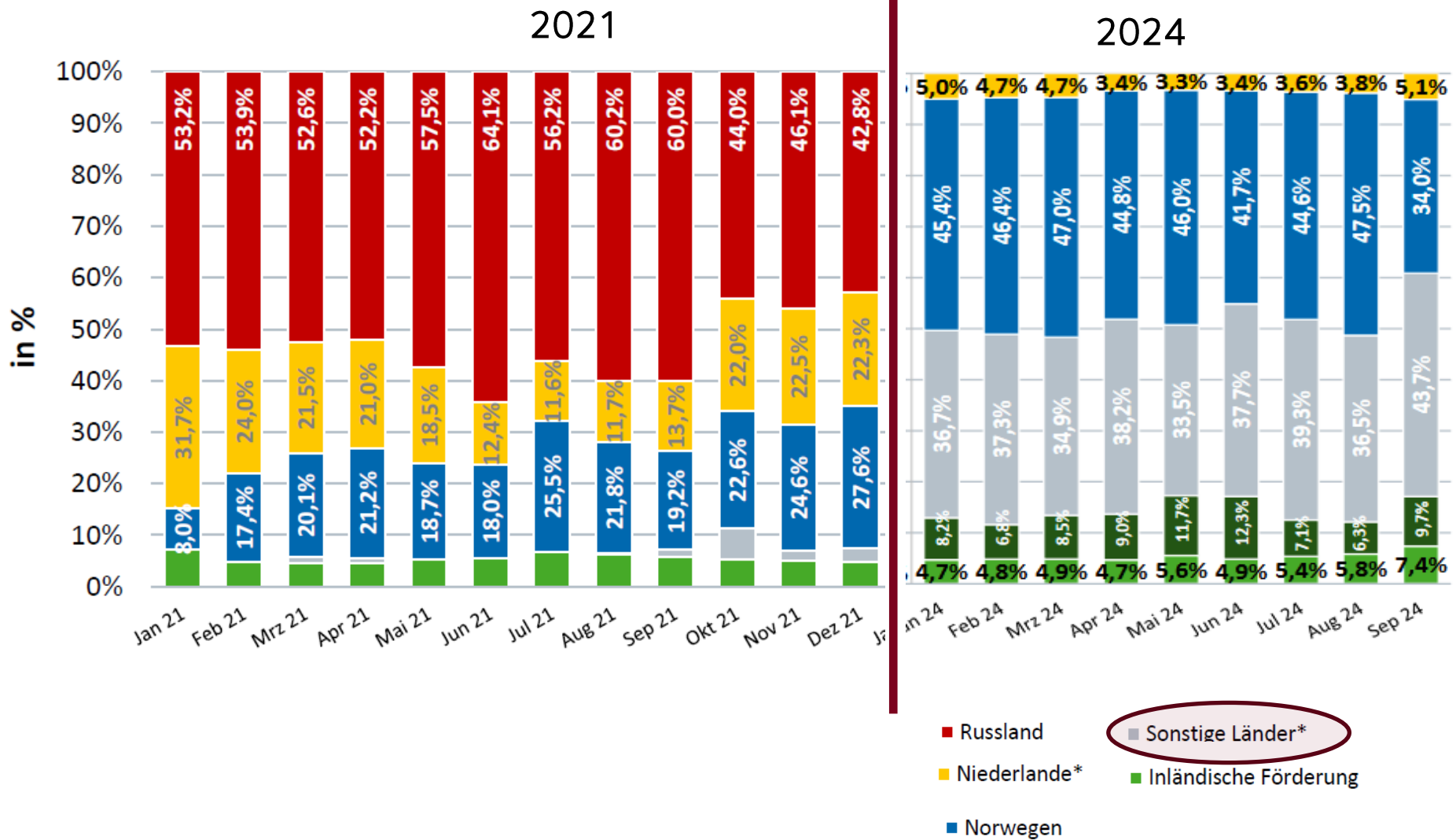
■ Aktuell:

- Gasqualitäten aus **unterschiedlichen Quellen** (LNG, Bio-Gas);
- **Einsatz von L-Gas** (L-H-Marktraumumstellung noch nicht abgeschlossen!)
- **Zumischung H₂** in stark begrenzter Menge
- Keine genaue Herkunftszuordnung, daher **verkürzte Reaktionszeiten** bei den Gasversorgern;



Erhöhte Schwankungen der Erdgasqualität!

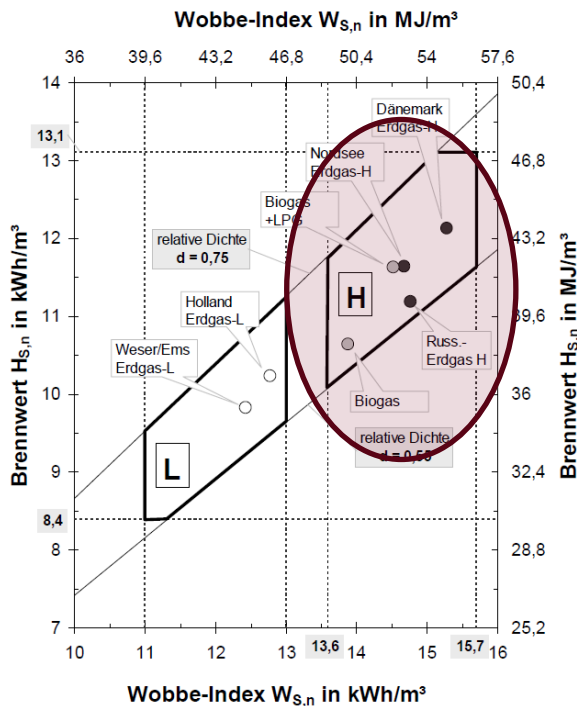
Herkunft des Erdgases in Deutschland



Quelle: Erdgasdaten aktuell, BDEW; 25.08.2022 / 24.10.24

Erdgasdaten unterschiedlicher Quellen

			Russland	Nordsee	Dänemark	Nigeria	Ägypten	Bio	Delta max.
			EG H	EG H	EG	LNG	LNG	EG	
Wobbe Index	$W_{S,N}$	kWh/m ³	14,83	14,58	15,30	15,50	15,00	13,90	10,3%
Brennwert	Hs	kWh/m ³	11,24	11,39	12,15	12,26	11,3	10,64	
Heizwert	Hu	kWh/m ³	10,14	10,28	10,99	11,09	10,19	9,59	13,5%
Dichte	ρ	kg/m ³	0,74	0,79	0,81	0,81	0,73	0,76	
Luftbedarf	VL min	m ³ /m ³	9,67	9,79	10,43	10,52	9,72	9,16	13,0%
adiabate Flammentemperatur	T ad	°C	1983	1984	1991	1993	1984	1976	



Charakterisierung von Gasen:
 Relative Dichte d
 Brennwert H_s
 Wobbe-Index W_s

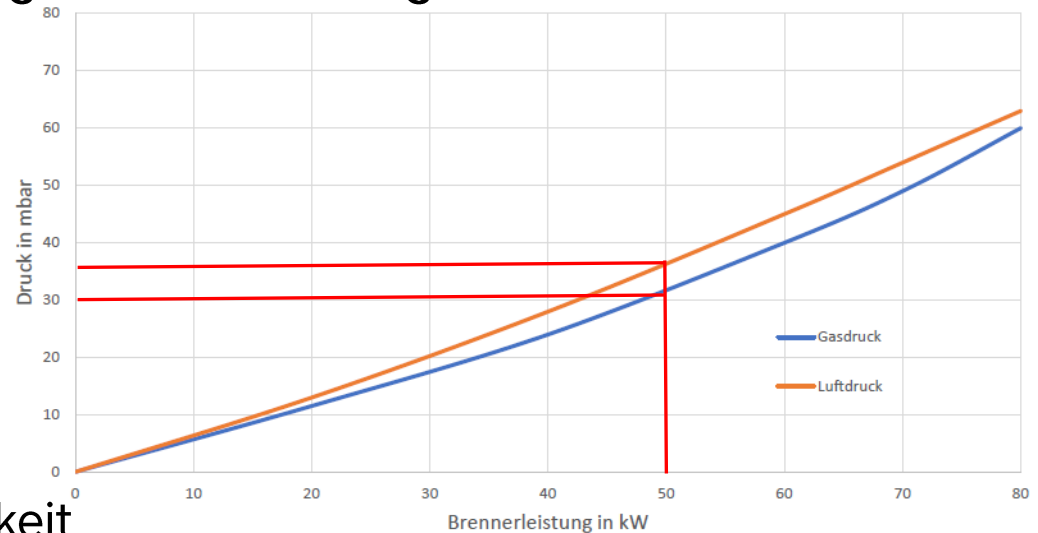
max. mögliche Schwankungsbreite
 Relative Dichte $d \rightarrow 36\%$
 Brennwert $H_s \rightarrow 30\%$
 Wobbe-Index $W_s \rightarrow 15\%$

Quelle: DVGW G 260 (A); September 2021

Auswirkungen

Auswirkungen auf die verbrennungstechnischen Eigenschaften:

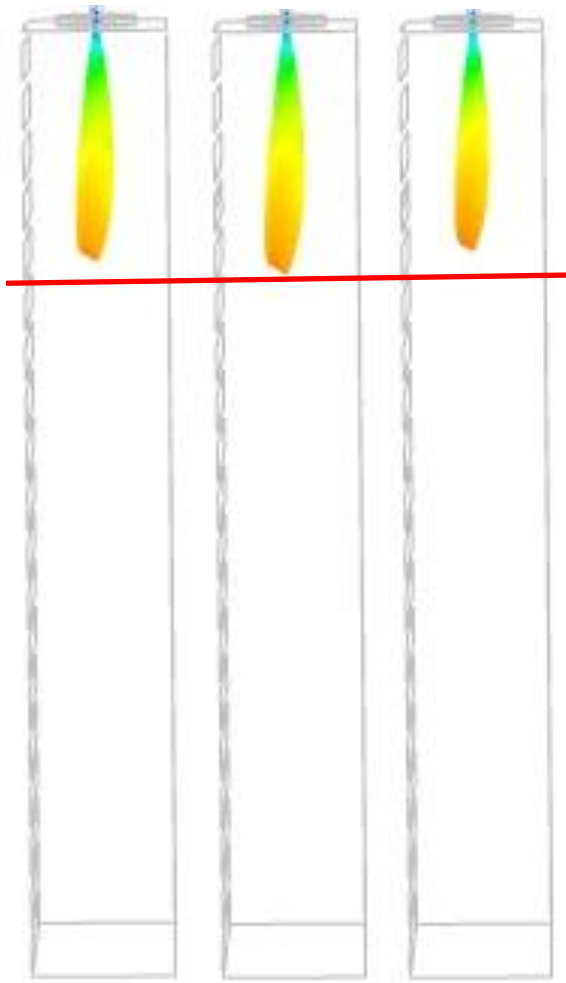
- Heizwert
- Luftbedarf
- Flammentemperatur
- Flammenlänge
- Brenneraustrittsgeschwindigkeit
- ...



- Gas- und Luftvolumenstrom wird in der Regel fest eingestellt für ein **bestimmtes Brenngas**; Einstelldiagramm immer abhängig vom Brenner, Vorgabe des Brennerherstellers!
- Eine Regelung erfolgt nicht!

Auswirkungen auf die Wärmeübertragung

Flammenlänge



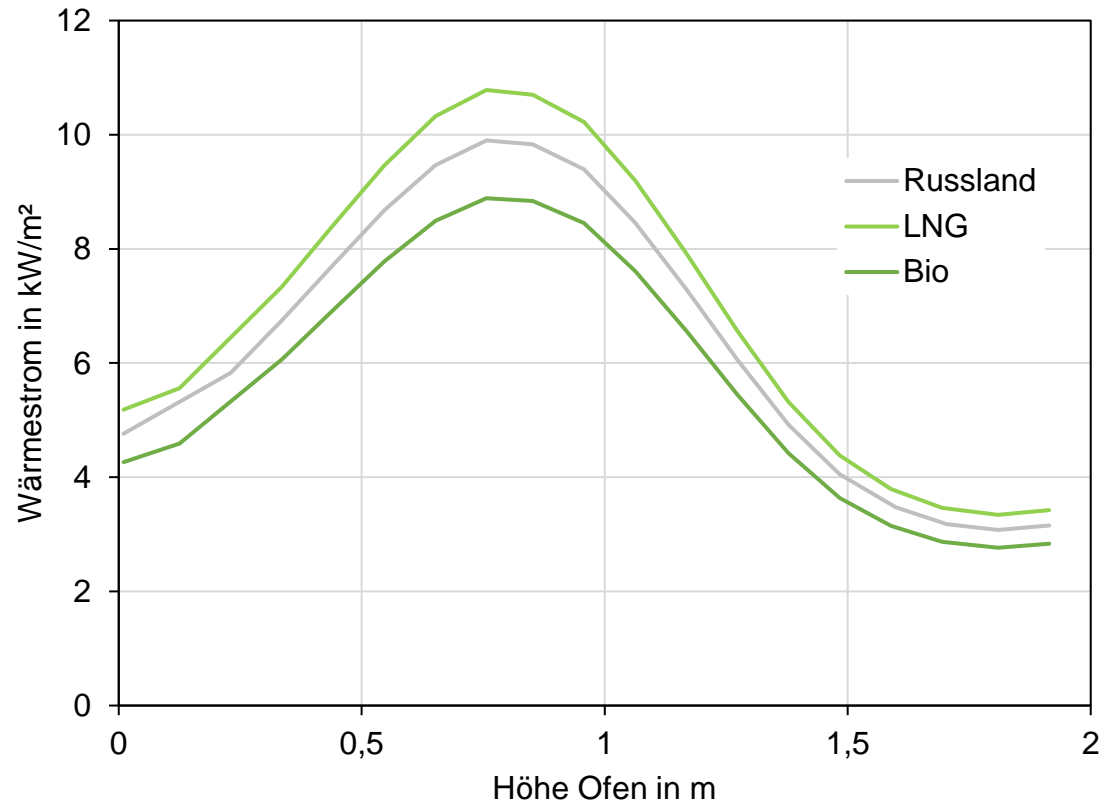
Russland

LNG Nigeria

Bio

Wärmestrom am Besatz

(vereinfachte Annahmen)



Leistung resultierend

Basis

			Russland	Russland	Nigeria	Bio
			EG H	EG H	LNG	EG
Wobbe Index	$W_{S,N}$	kWh/m ³	14,83		15,50	13,90
Brennwert	Hs	kWh/m ³	11,24		12,26	10,64
Heizwert	Hu	kWh/m ³	10,14		11,09	9,59
Dichte	ρ	kg/m ³	0,74		0,81	0,76
Luftbedarf	VL min	m ³ /m ³	9,67	10	10,52	9,16
adiabate Flammentemperatur	T ad	°C	1983		1993	1976

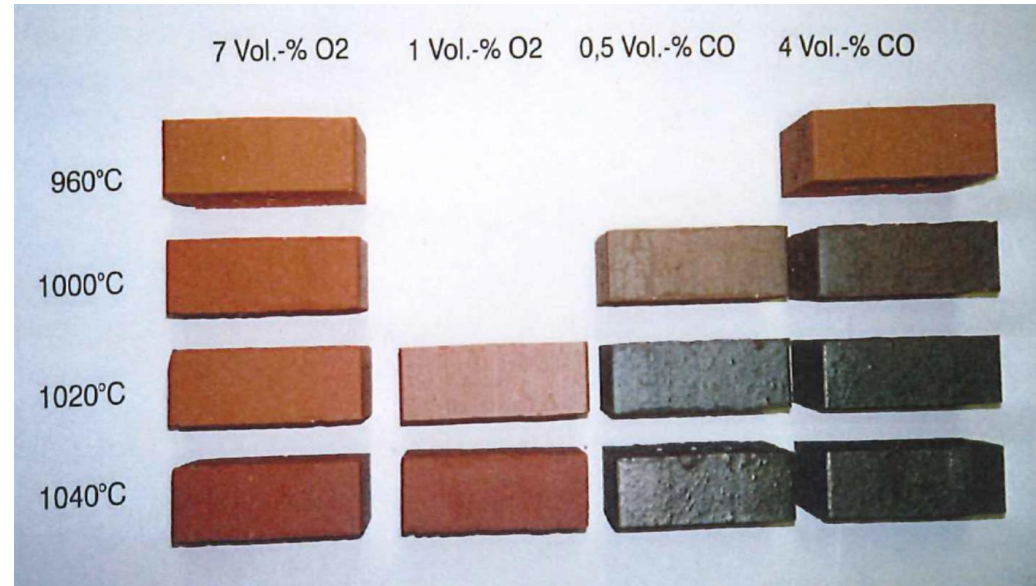
Gasdruck	p_{gas}	bar	konst.			
Volumenstrom Gas	V Gas	m ³ _N /h	2,7	2,7	3,1	2,8
Brennerleistung	Q	kW	27,3		34,2	26,8
Abweichung Soll		%	0		25	-2

Volumenstrom Luft	V Luft	m ³ _N /h	konst.			
Luftverhältnis real	λ	-	1	1,01	0,8	1,03
Abweichung Soll		%	0	1	-20	3

Auswirkungen Gasschwankung - Luftmangel



$O_2 \sim 2 \text{ Vol.-%}$ $\sim 10 \text{ Vol.-%}$



$O_2 \sim 4 \text{ Vol.-%}$



$O_2 \sim 2 \text{ Vol.-%}$

Maßnahmen

- Vorort Installation einer **Konditionierungsanlage** zur Einstellung eines **konst. Heizwertes**, erfordert zusätzlich Erfassung Gasbeschaffenheit (z. B. Gaschromatograph, korrelatives Messverfahren) und Zusatzgase (N_2 , O_2 , ...);



Installations- und Betriebskosten

- Installation eines **Gasbeschaffenheitsmessgerätes** mit **steuerbaren Ventilen** in Gas- und Luftversorgung;



Installationskosten

- Absprache mit dem Gasversorger zur Übermittlung der aktuellen Gasdaten (H_u , V_{Lmin}) bei entsprechender Vorlaufzeit und manueller Eingriff in die Brennereinstellung.



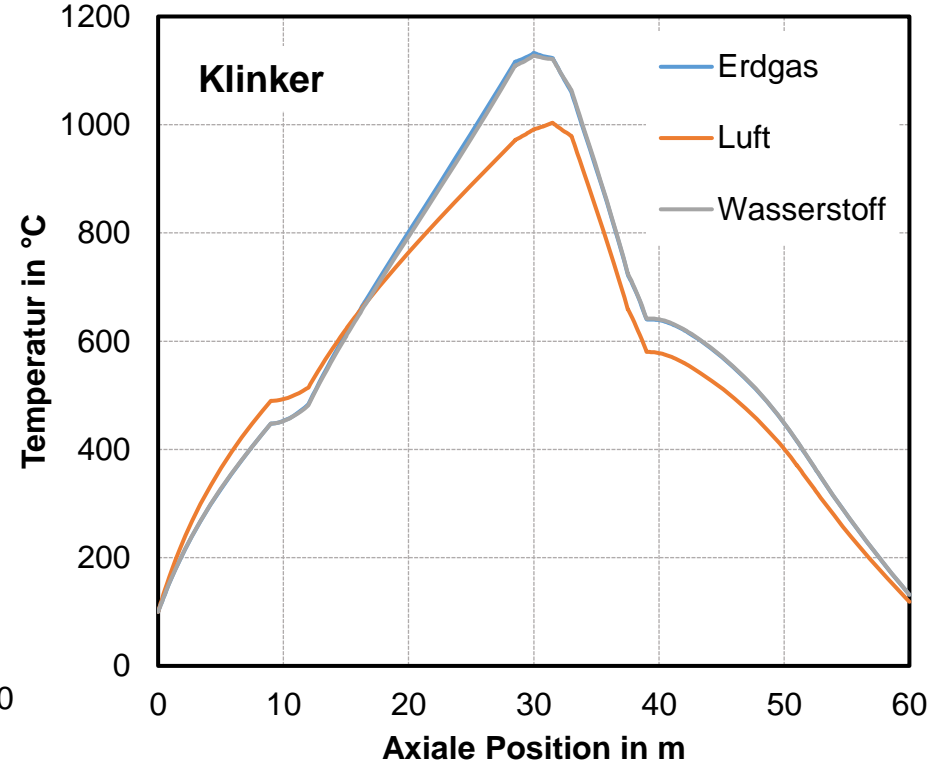
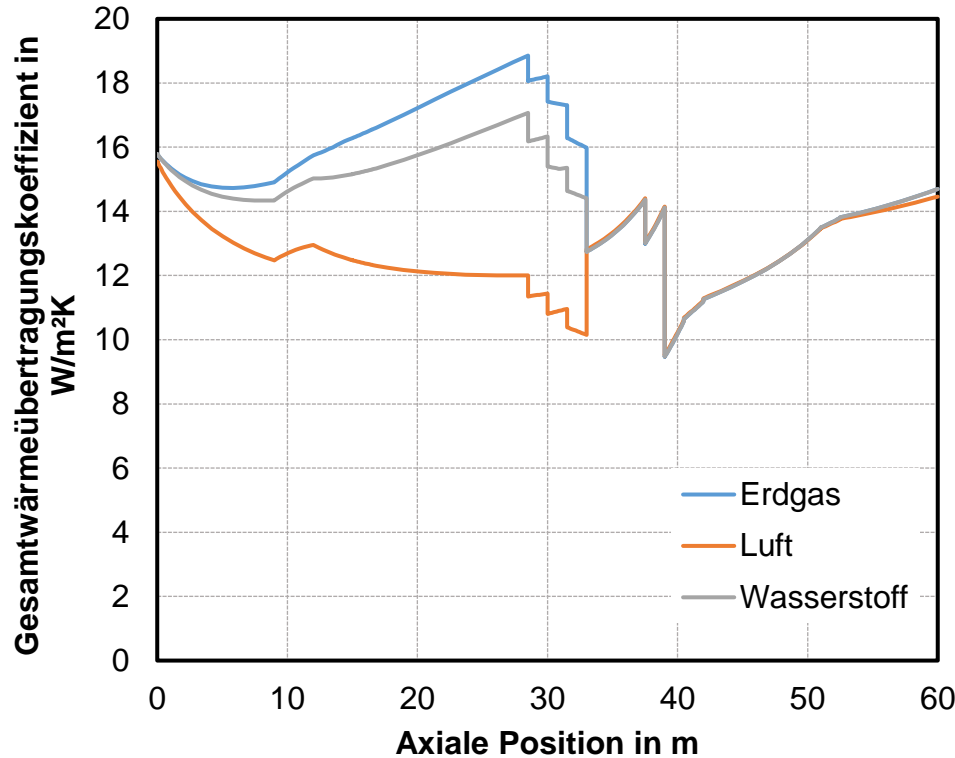
kurzfristig umsetzbar, Personalaufwand, Risiko behaftet!

Änderung Brennstoff - Eigenschaften Wasserstoff

Brennstoff			Erdgas (CH ₄)	Wasserstoff (H ₂)	Verhältnis H ₂ /CH ₄
Heizwert	Hu	MJ/m ³	35,89	10,79	0,3
Luftbedarf	VL min	m ³ /m ³	9,524	2,381	0,25
Dichte	ρ	kg/m ³	0,717	0,089	0,13
Wobbe-Index	Ws	MJ/m ³	53,37	48,24	0,9
Untere Zündgrenze	UEG	Vol.-%	5	4	0,8
Obere Zündgrenze	OEG	Vol.-%	15	74	4,95
Zündtemperatur in Luft	T	°C	645	530	0,82

Gesamtwärmeübertragungskoeffizient & Temperatur Profile

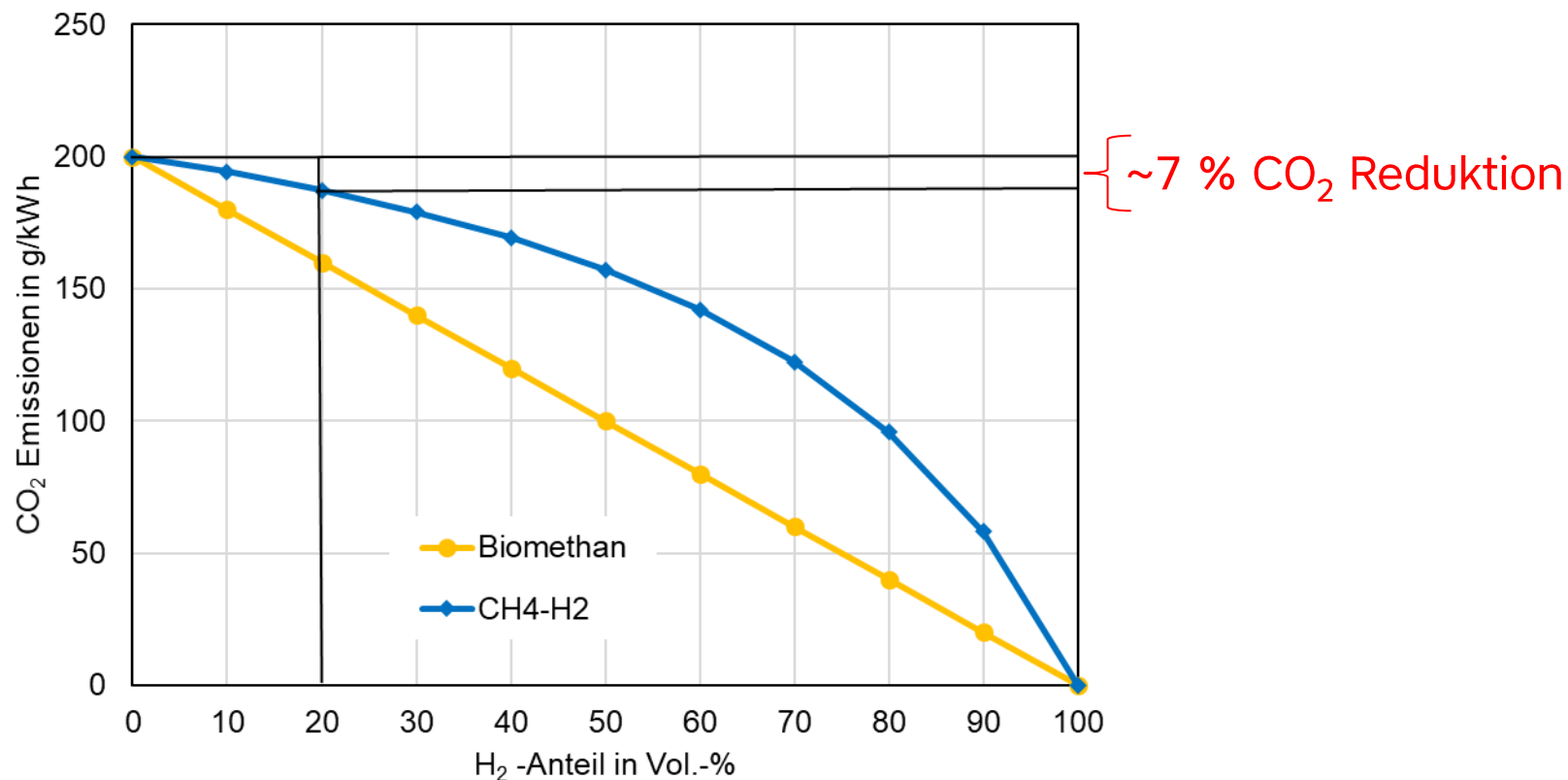
- Eingebraachte Gesamtleistung ist konstant;
- Änderung der Strahlungswärmeübertragung.



Höhere Leistung (Temperatur) bei Luft erforderlich!

CH₄-H₂ Mischung

Reduzierung CO₂-Emission pro kWh

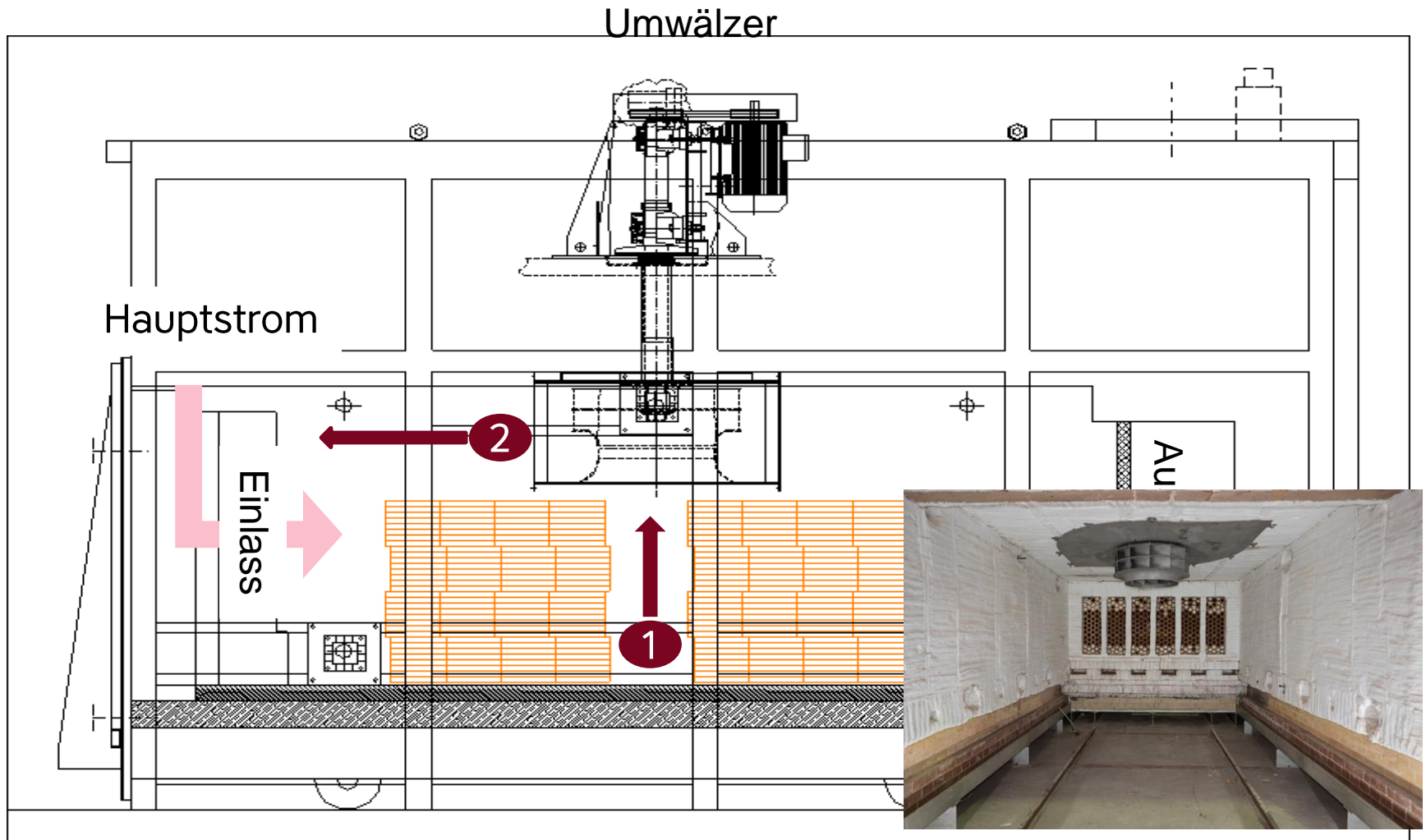


Zumischung von H₂ bietet in Bezug auf die G260 nur begrenzte CO₂-Reduktion

Ziel: 100 % Wasserstoffverbrennung → **Verfügbarkeit?**

■ Strömungsbedingungen

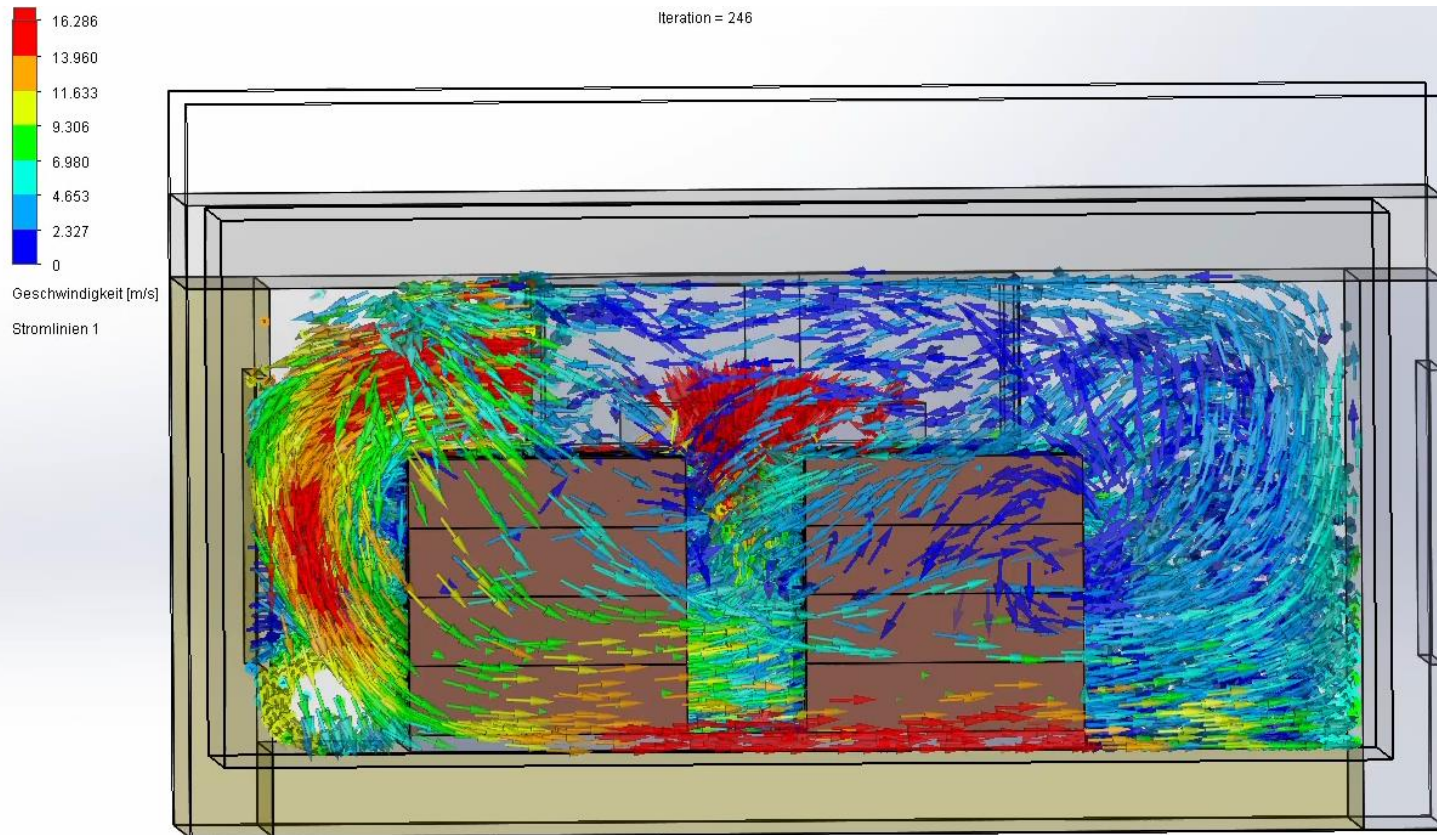
Versuchsaufbau



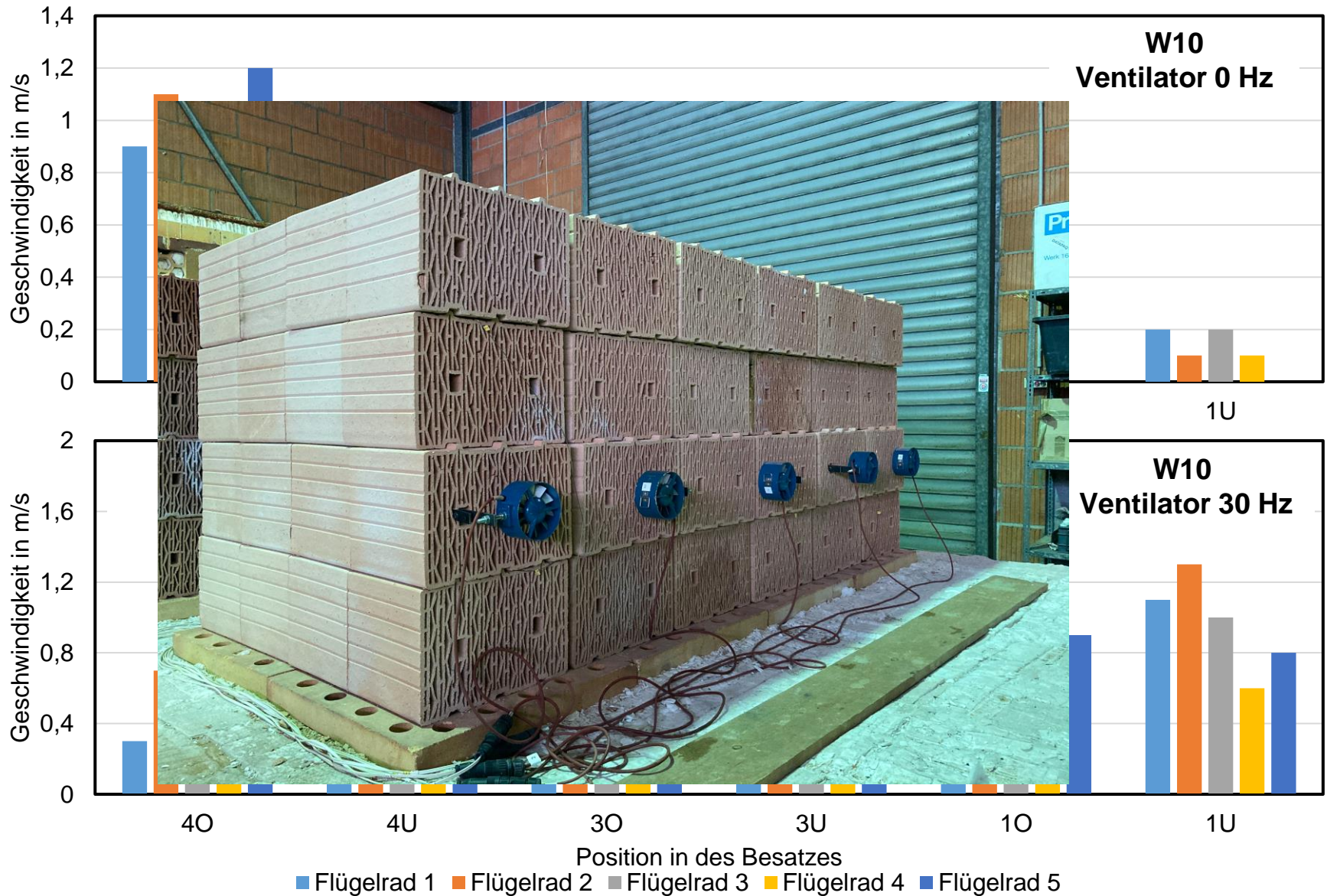
- 1 Einströmen von Gas in das Umwälzsystem
- 2 Ausströmen von Gas aus dem Umwälzsystem

Innenansicht der IZF-Pilotanlage

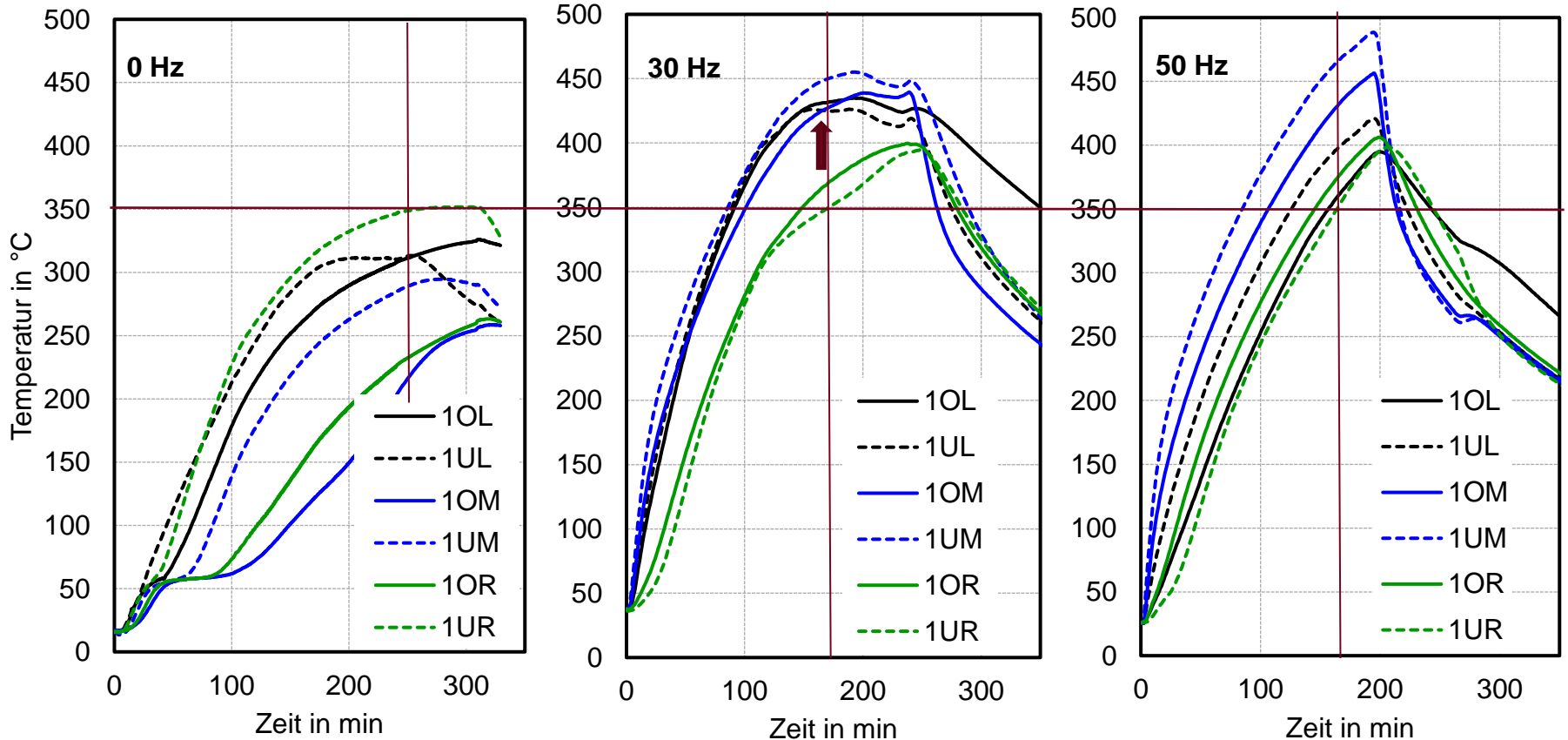
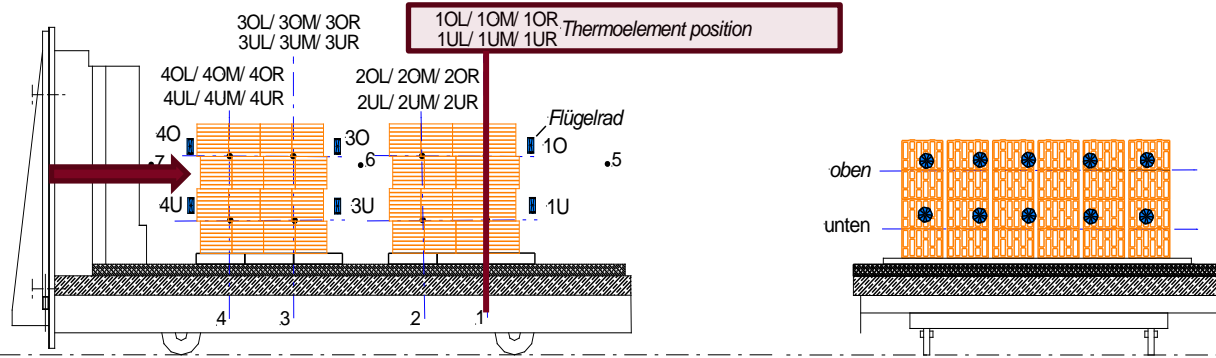
Versuchsergebnisse – Strömungssimulation



V Versuchsergebnisse - Geschwindigkeit

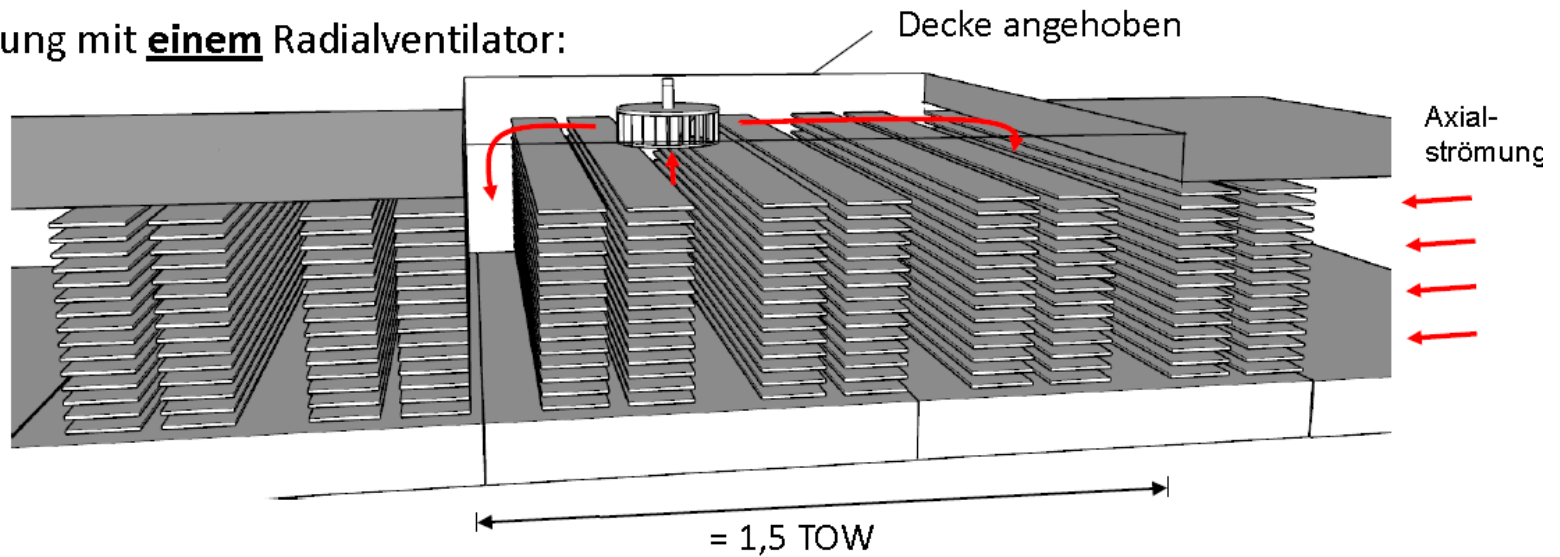


V Versuchsergebnisse – Temperatur

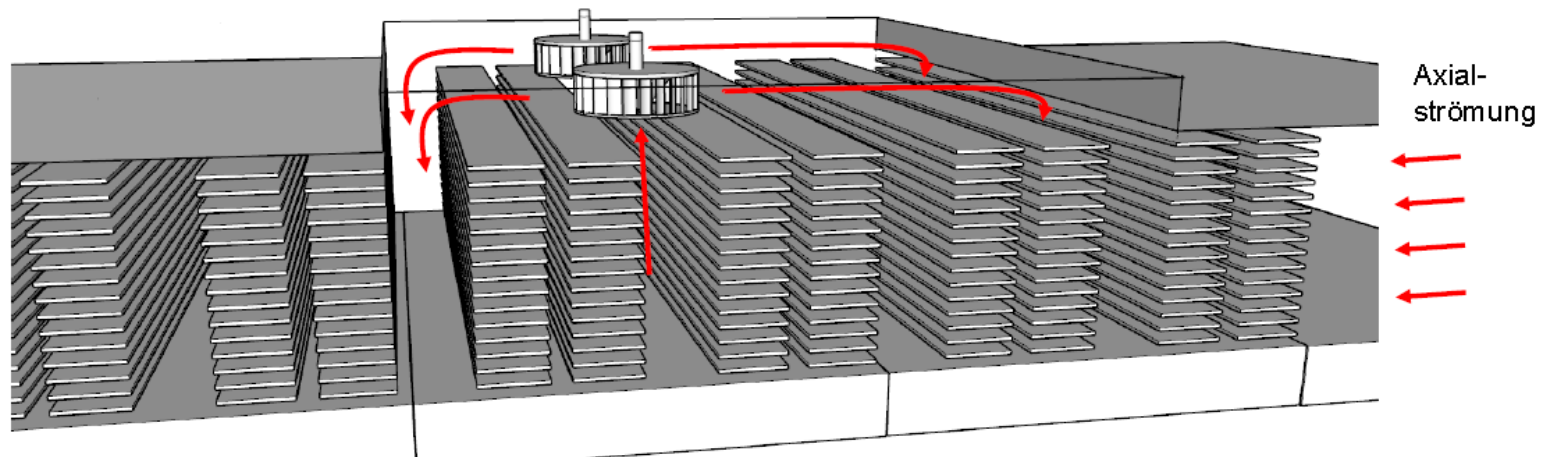


Möglichkeiten des Einbaus und Arbeitsweise

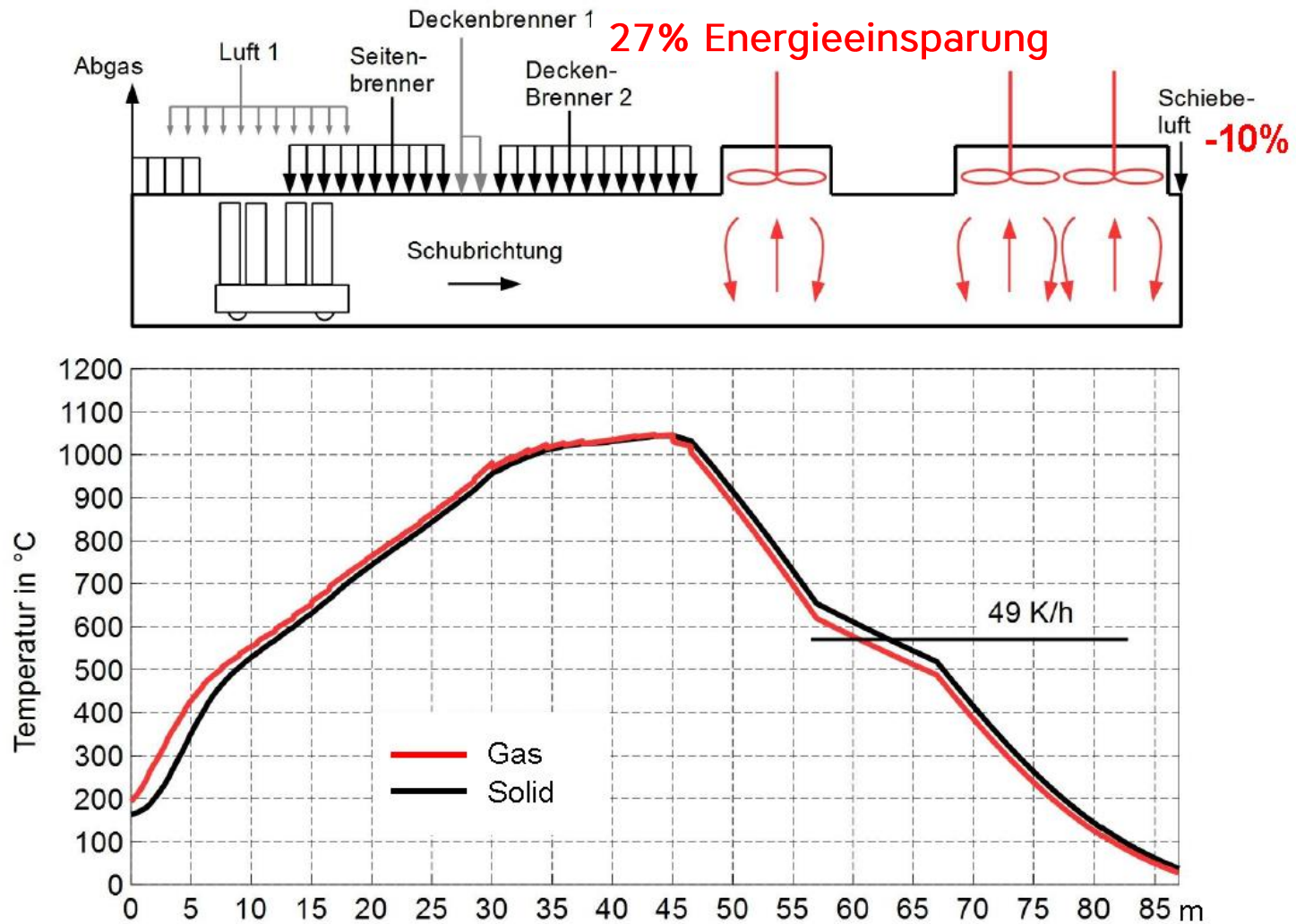
Umwälzung mit einem Radialventilator:



Umwälzung mit zwei Radialventilatoren:



ofeninterne Umwälzer



→ Erhöhung Strömungsgeschwindigkeit durch Umwälzer um Faktor 3

Quelle:



Zusammenfassung

- Ein ressourcenschonender und effizienter Umgang mit Energie ist zwingend erforderlich.
- Im Rahmen der Dekarbonisierung, Einsatz von **grünem** Wasserstoff, Ammoniak oder Strom, spielt die Effizienz eine wesentliche Rolle.
- Zusätzliche Regelgrößen, wie Sauerstoffmessungen und Brenngasbestimmung (Heizwert), sind erforderlich.
- Die Betrachtung von Wärmeübertragung und Strömungsbedingungen im Ofen tragen zur Energieeffizienz bei gleicher der Produktqualität bei.
- Technologieoffenheit ist die einzige Option, mögliche Lösungen zu finden
- In langen Zeiträumen denken
bereits heute Voraussetzungen schaffen auch wenn die Wirtschaftlichkeit noch nicht gegeben ist



Ansprechpartner:

Name Dr.-Ing. Rigo Giese / Eckhard Rimpel

Fon: +49 (0) 201 59 213 -22 / -48

Fax: +49 (0) 201 59 213 20

E-Mail: giese@izf.de / rimpel@izf.de