



Foto: KRW Leipzig

Technisch-ökonomisches Potential flexibler Industrieprozesse im Kontext der Energiewende: Parameterstudie für ein Beispiel aus der Metallindustrie

Christian Schwotzer, Felix Kaiser, Herbert Pfeifer

4. Aachener Ofenbau- und Thermoprozess-Kolloquium

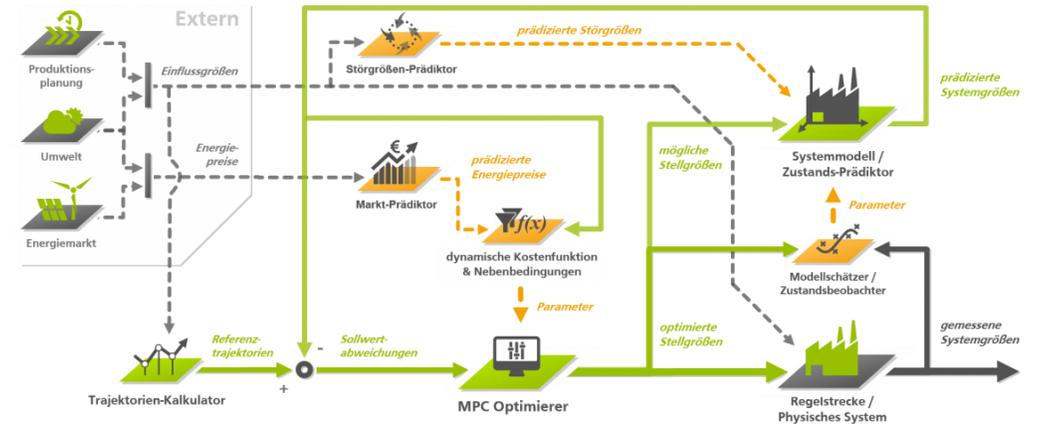
Aachen, 18.10.2023

Agenda

- Motivation und Zielsetzung
- Vorgehen
- Industrieprozesse
- Energiemarktszenarien
- Optimierungsmodell
- Ergebnisse
- Sensitivitätsanalysen
- Zusammenfassung und Ausblick

Motivation und Zielsetzung

- Grundlegender Wandel des Energiesystems findet statt durch:
 - Größer werdenden Anteil an erneuerbaren Energien, besonders Wind- und Solar,
 - zunehmende Digitalisierung auf Erzeuger- und Verbraucherseite,
 - Wandel zum dezentralen Energiesystem.
- Für eine CO₂ neutrale Produktion werden grüner Strom und Wasserstoff zunehmend zentrale Energieträger.
- Bereits heute nehmen Industriebetriebe am Strommarkt teil und bieten in kleinerem Umfang Flexibilität an.

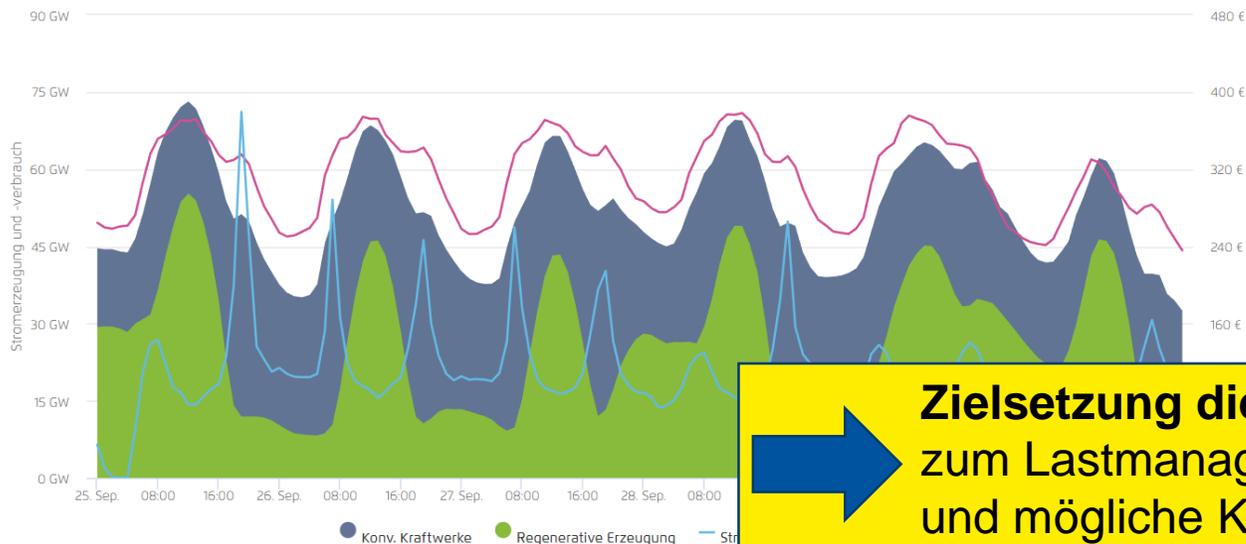


Quelle: ETA Fabrik

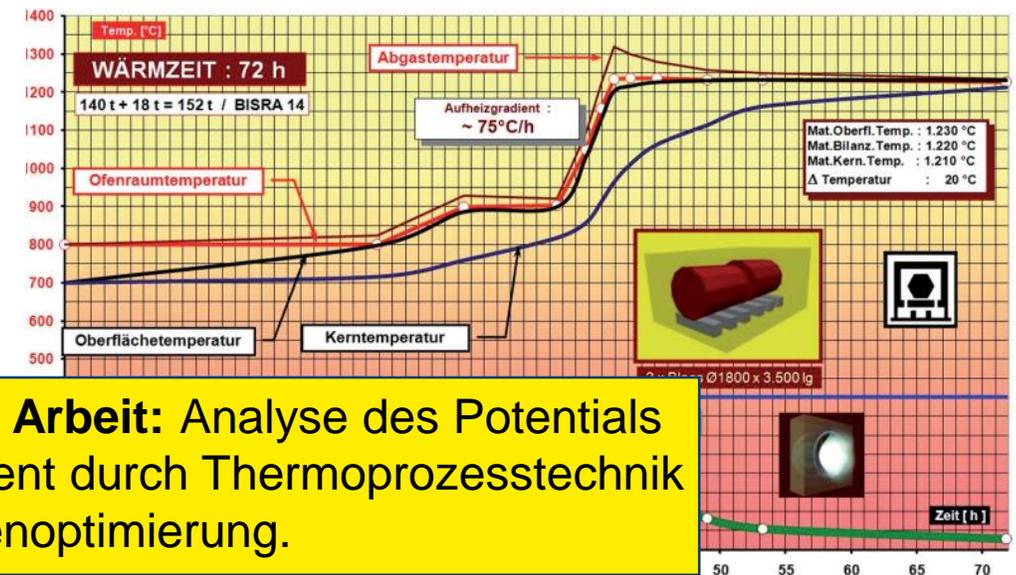
Motivation und Zielsetzung

- Umstellung deutscher Strommix auf mind. 80% EE bis 2030 (aktuell ca. 50%)
- Zunehmender Einfluss von EE-Stromerzeugung auf Preise, stärkere Fluktuation am Spotmarkt
- Zunehmender Fokus auf Möglichkeiten zur Elektrifizierung in der Industrie mit schwankenden Lastprofilen

Variation Strompreis mit Anteil EE



Beispiel: Lastprofil Schmeldeofen (fossil)

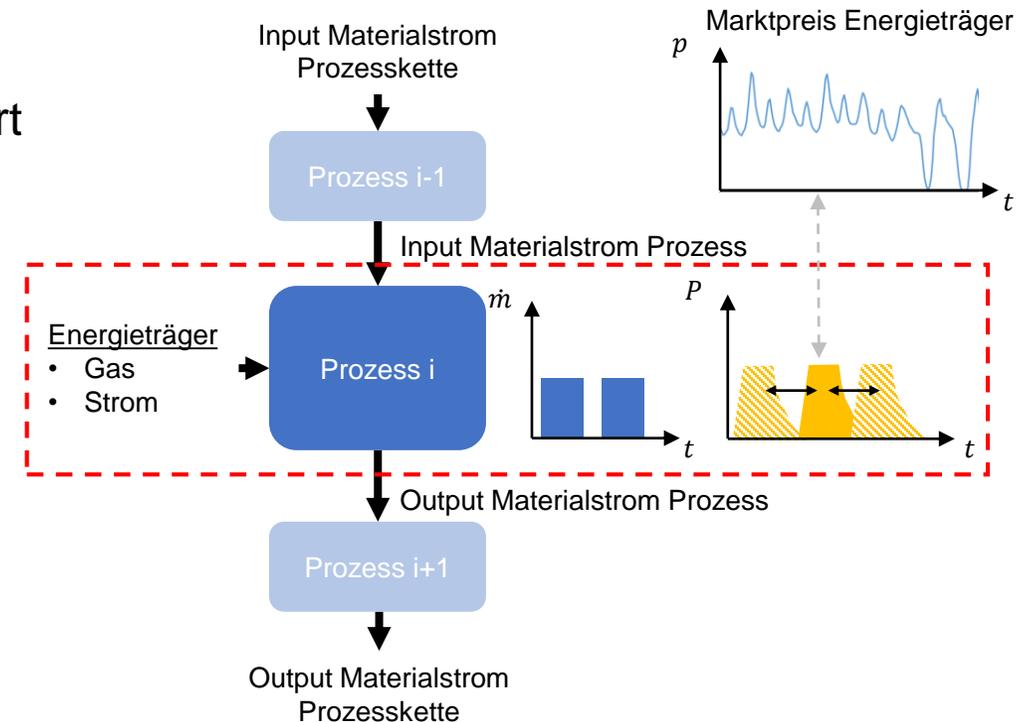


Zielsetzung dieser Arbeit: Analyse des Potentials zum Lastmanagement durch Thermoprozesstechnik und mögliche Kostenoptimierung.

Quellen: Agorameter, E. Tschapowetz (Praxishandbuch Thermoprozesstechnik Band 2)

Vorgehen

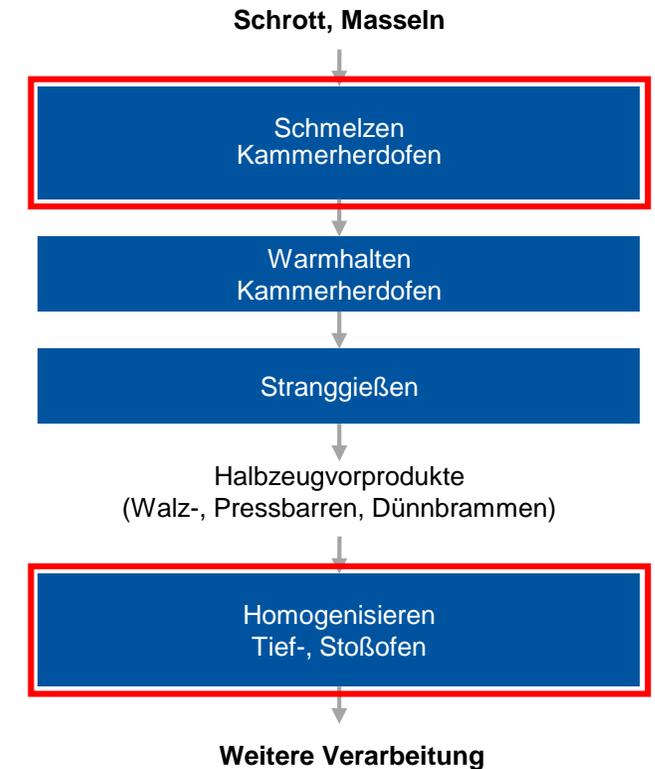
- Aufbau einer vereinfachten Prozesskette als exemplarisches Beispiel aus der Aluminiumindustrie
- Anlagenlastplan wird abhängig vom Energiemarkt optimiert
 - Kurzfristige Energieträgerbeschaffung am Spotmarkt
 - Preiskurven der Energieträger sind im Voraus bekannt
- Vergleich von
 - Energieträgerpreisverläufen aus unterschiedlichen Jahreszeiten (unterschiedliche Preisniveaus)
 - Berücksichtigung energieträgerbedingten Kosten (Einkaufspreis CO₂) in den einzelnen Szenarien
- Ausblick mit Variation des verwendeten Energieträgers



Betrachtete Industrieprozesse und Anlagentechnik

Übersicht Prozesskette

- Zwei Thermoprozessanlagen Schmelz- und Homogenisierungsöfen im Fokus der beispielhaften Prozesskette
- Annahmen:
 - Lastkurven vereinfacht auf stündliche Auflösung
 - Betrachtung der elektrischen Beheizung später mit den gleichen Lastkurven und gleicher Leistung



Betrachtete Industrieprozesse und Anlagentechnik

Übersicht Prozesskette

- Prozesskette als Auszug aus der Produktion von Knetlegierungen (Verarbeitung zu Walz- und Pressprodukten)
- Betrachtung eines Schmelzofens und eines Homogenisierungsofens
- Festgelegte Randbedingungen für den Betrieb zur späteren Berechnung
 - Betrachtungszeitraum von einer Woche (Mo. bis So.)
 - Fokus auf kumuliertem Leistungsprofil beider Anlagen
 - Stündliche Auflösung der abgenommenen Leistung
 - Batch-Betrieb, konstante Chargengröße
 - Vorgegebene Mindestauslastung der Aggregate
 - Variierung der Startzeitpunkte der Zyklen zur wirtschaftlichen Optimierung

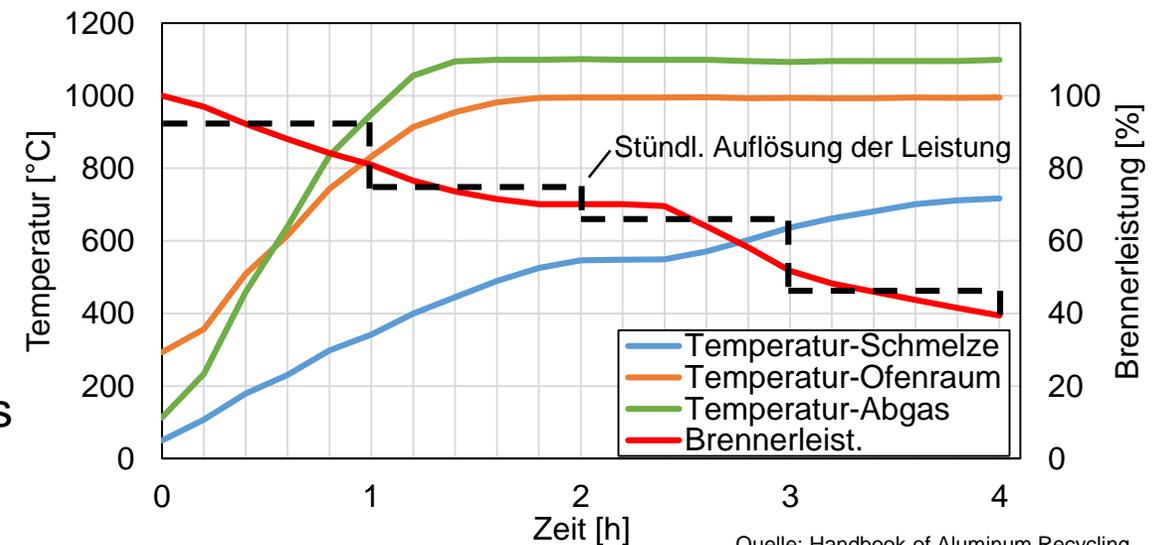


Quelle: Otto-Junker

Betrachtete Industrieprozesse und Anlagentechnik

Schmelzofen

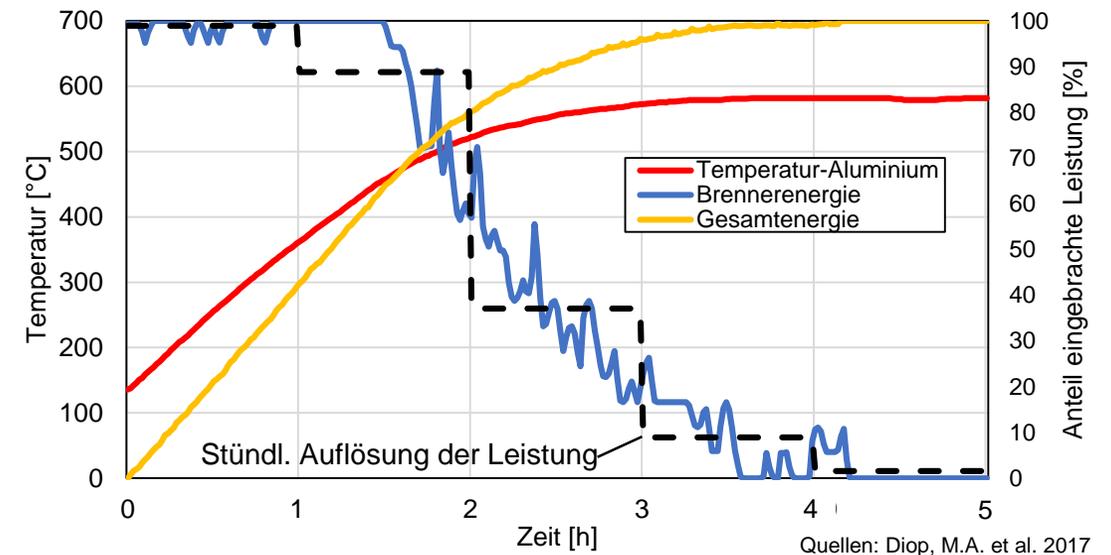
- Annahmen basieren auf erdgasbeheiztem Einkammerherdofen
- Beschickung mit Mischung aus Hüttenaluminium, neuen und alten Schrotten sowie erforderlichen Legierungszusätzen
- Erwärmung auf Temperaturen von 720 °C bis 750 °C
- Diskontinuierlicher Betrieb
- Angenommene Eckdaten:
 - Anschlussleistung: ca. 20 MW
 - Fassungsvermögen 25 t_{Input}
 - Prozessdauer 4 h
 - Spez. Energiebedarf: 813 kWh/t_{Output}
- Zusätzliche Annahme: Abschluss eines Schmelzzyklus vor erstem Homogenisierungszyklus



Quelle: Handbook of Aluminum Recycling

Homogenisierungsöfen

- Annahmen basieren auf erdgasbeheiztem Kammerofen
- Prozess in der Regel oberhalb der Walztemperatur (je nach Legierung bei 500 – 600 °C)
- Diskontinuierlicher Betrieb
- Angenommene Eckdaten:
 - Anschlussleistung: ca. 8 MW
 - Fassungsvermögen 40 t_{Input}
 - Prozessdauer 5 h
 - Spez. Energiebedarf: 200 kWh/t_{Output}

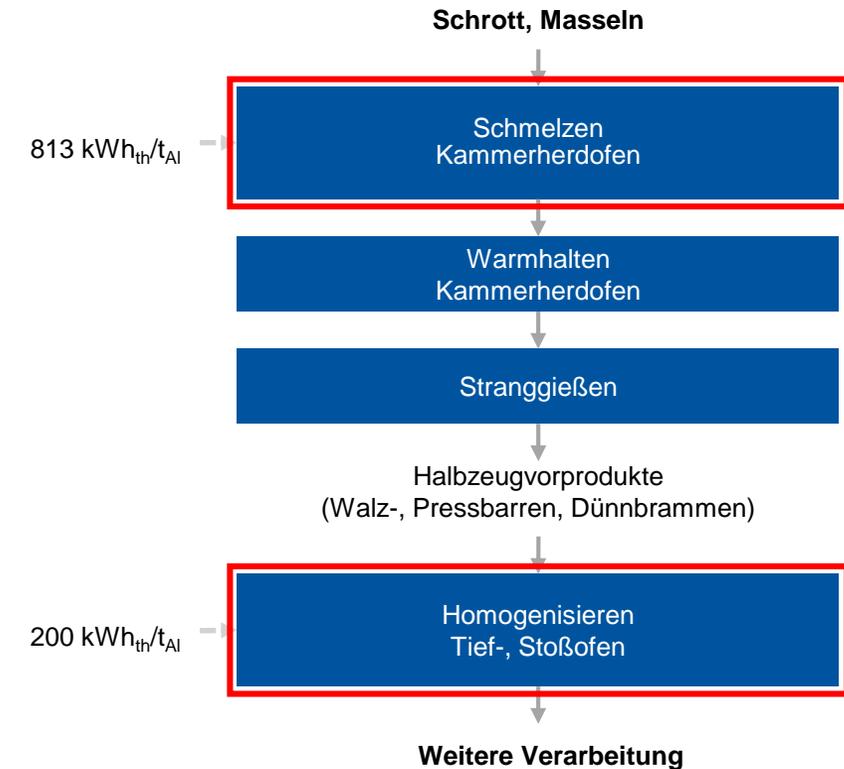


Betrachtete Industrieprozesse und Anlagentechnik

Übersicht Prozesskette

- Zwei Thermoprozessanlagen Schmelz- und Homogenisierungsöfen im Fokus der beispielhaften Prozesskette
- Annahmen:
 - Lastkurven vereinfacht auf stündliche Auflösung
 - Betrachtung der elektrischen Beheizung später mit den gleichen Lastkurven und gleicher Leistung

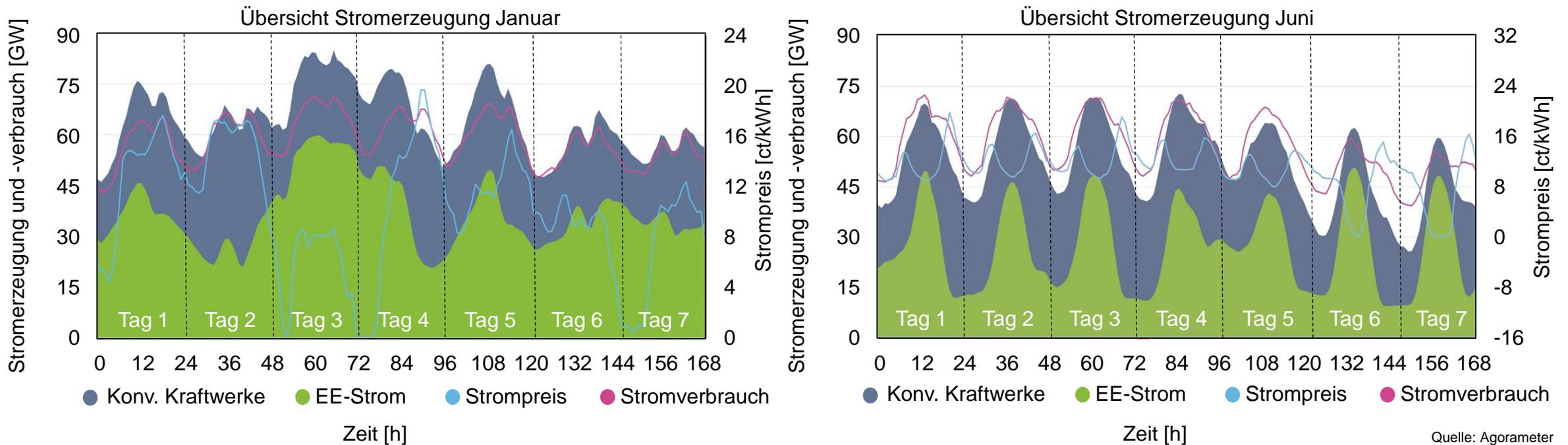
Zeitraum [h]	Leistungsabnahme Schmelzen [MW]	Leistungsabnahme Homogenisieren [MW]
t = 0 bis t = 1	5,88	3,36
t = 1 bis t = 2	4,75	3,01
t = 2 bis t = 3	4,23	1,26
t = 3 bis t = 4	2,95	0,3
t = 4 bis t = 5	2,52	0,05
t = 5 bis t = 6	-	0



Energiemarktszenarien (Annahmen und Vereinfachungen für die Parameterstudie)

Stromkosten

- Betrachtung von Spotmarktpreisen (Strombörse EPEX): stündliche Aktualisierung des Strompreises, kurzfristig beziehbare Mengen, entsprechen dem Großhandelspreis
- Deutliche Variation des Strompreises abhängig von Tageszeit und Anteil Erneuerbarer Energien
- Betrachtung einer Winterwoche und einer Sommerwoche aus diesem Jahr



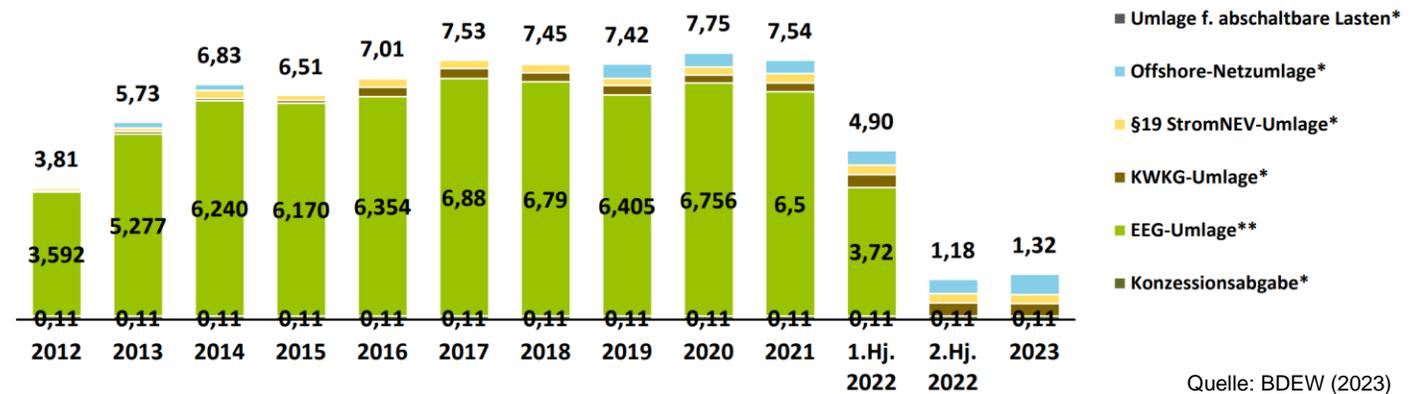
Energiemarktszenarien (Annahmen und Vereinfachungen für die Parameterstudie)

Unterschied Großhandelspreis - Verbraucherpreis

- Unterschied zwischen Großhandelspreis und Verbraucherpreis vor allem durch abnehmerbedingte Steuern und Abgaben bestimmt
- Seit Wegfall der EEG-Umlage Rückgang dieses Anteils auf durchschnittlich 1,3 ct/kWh – 3,7 ct/kWh (je nach jährlicher Abnahmemenge)
- Annahme:
Verbraucherpreis = Großhandelspreis

Steuern und Abgaben für die Industrie [ct/kWh]

Jahresverbrauch 160.000 bis 20 Mio. kWh (Mittelspannung)

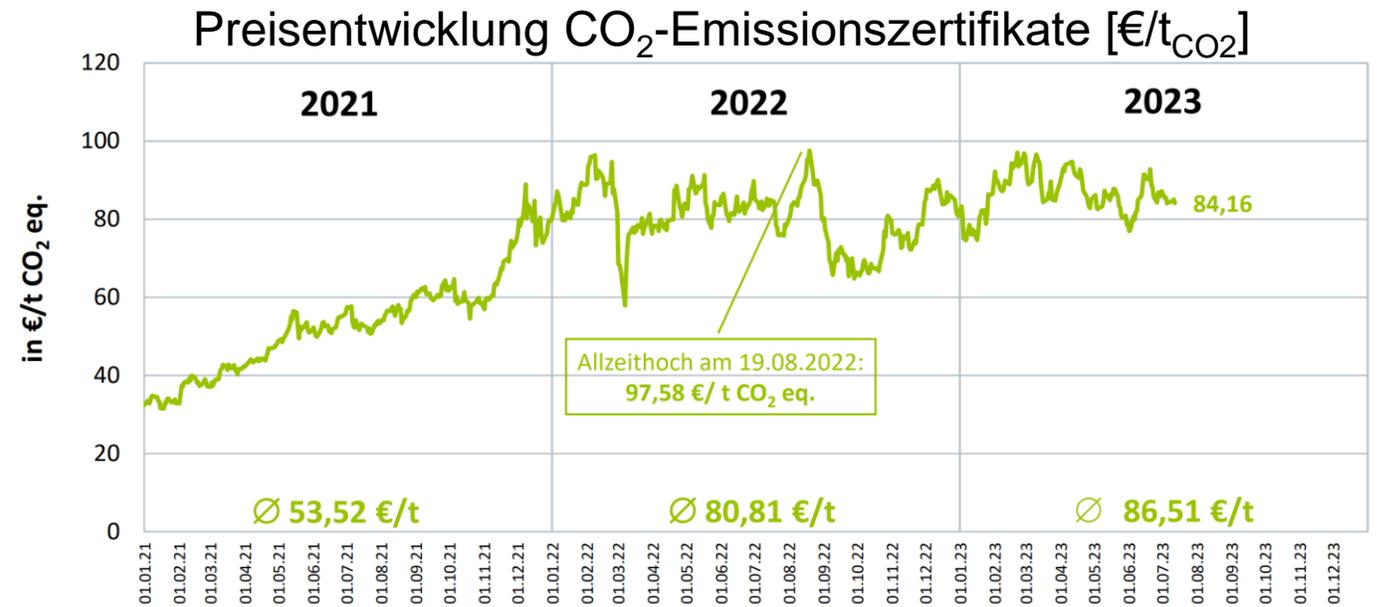


Quelle: BDEW (2023)

Energiemarktszenarien (Annahmen und Vereinfachungen für die Parameterstudie)

Erdgaskosten

- Annahme: Emissionshandelspflicht des Anlagenbetreibers
 - Kombination von Energieträgerkosten + Kosten für CO₂-Emissionszertifikate
- Annahme eines konstanten Preisniveaus von 86,51 €/t_{CO2}
- Verrechnung mit Erdgasemissionsfaktor von 200 g_{CO2}/kWh
- Variation des Emissionszertifikatspreis
Gegenstand von späteren Untersuchungen

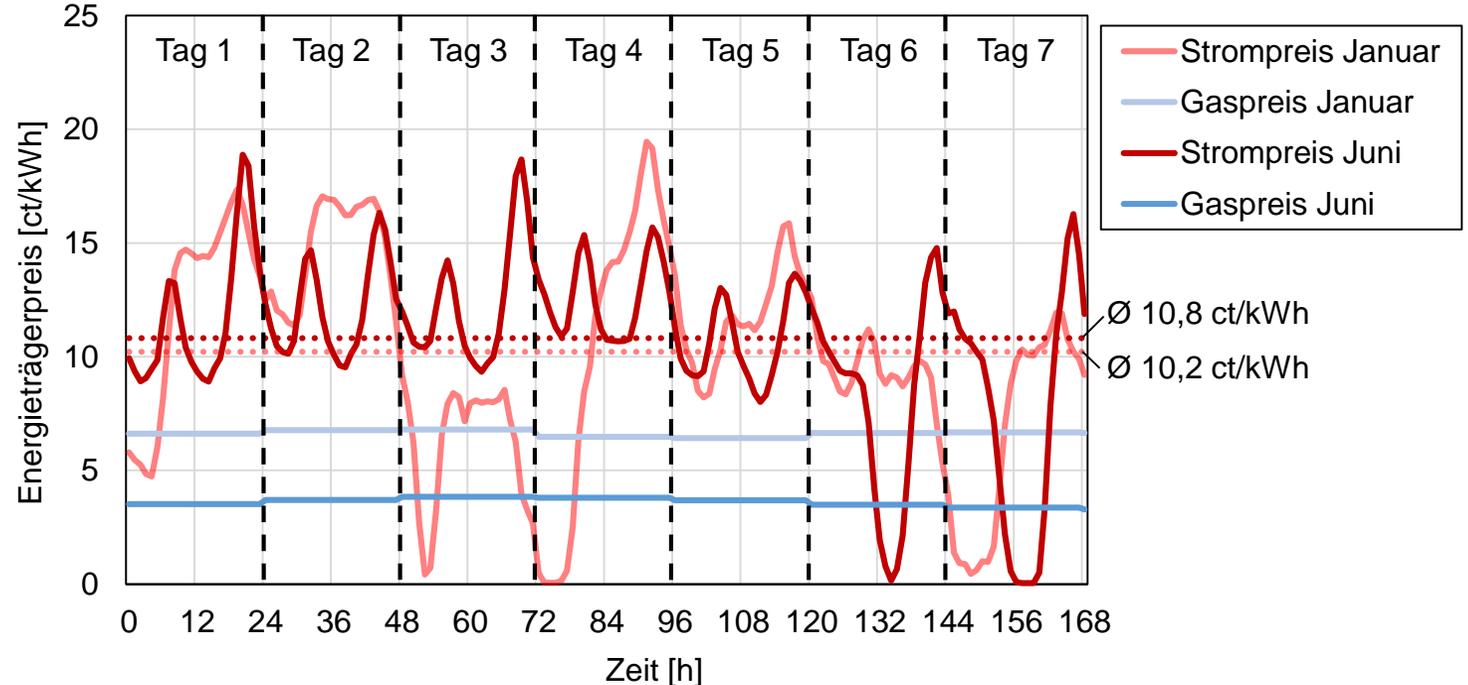


Quelle: EEX (2023)

Energiemarktszenarien (Annahmen und Vereinfachungen für die Parameterstudie)

Zusammenfassung Preisszenarien

- Erdgaspreise basieren ebenfalls auf Spotmarktpreise der Börse European Energy Exchange (EEX)
- Aktualisierung alle 24 Stunden, lediglich geringfügige Preisvariationen
- Zusammenfassung der beiden Preisszenarien:
 - Durchschnittstrompreise:
10,8 ct/kWh (Winter)
10,2 ct/kWh (Sommer)
 - Durchschnittserdgaspreise:
6,7 ct/kWh (Winter)
3,6 ct/kWh (Sommer)



Zielfunktion und Nebenbedingungen

- Erstellung eines Anlagenbelegungsplan, welcher die niedrigsten Gesamtenergiekosten für die betrachtete Woche aufweist

- Zu minimierende Zielfunktion:
$$\min \sum_{t=0}^{t=168} E_{Gas}(t) \cdot c_{Gas}(t) + E_{Strom}(t) \cdot c_{Strom}(t) + E_{Gas}(t) \cdot \gamma_{Gas} \cdot c_{\gamma}$$

- Optimierung über Wahl der Startzeitpunkte $s_{t,i}$ für einzelne Zyklen (welche mit $E_{Gas}(t)$ verknüpft sind)

- Nebenbedingungen:

- keine Überschneidung von Zyklen
- kein Zyklus wenn er nicht abgeschlossen werden kann
- Abschluss eines Schmelzzyklus vor erstem Homogenisieren

t :	Zeitschritt
$E_{Gas}(t)$:	Leistung pro Energieträger bei t
$c_{Gas/Strom}(t)$:	Energieträgerpreis bei t
γ_{Gas} :	Emissionsfaktor Erdgas
c_{γ} :	Emissionszertifikatpreis
$s_{t,i}$:	Start Zyklus Anlage i in t (binär)
d_i :	Prozessdauer an Anlage i



$$\sum_t^{t+d_i} s_{t,i} = 1; \quad \sum_{t=168-d_i}^{t=168} s_{t,i} = 0; \quad \sum_{t=0}^{t=0+d_1} s_{t,2} = 0$$

Optimierungsmodell

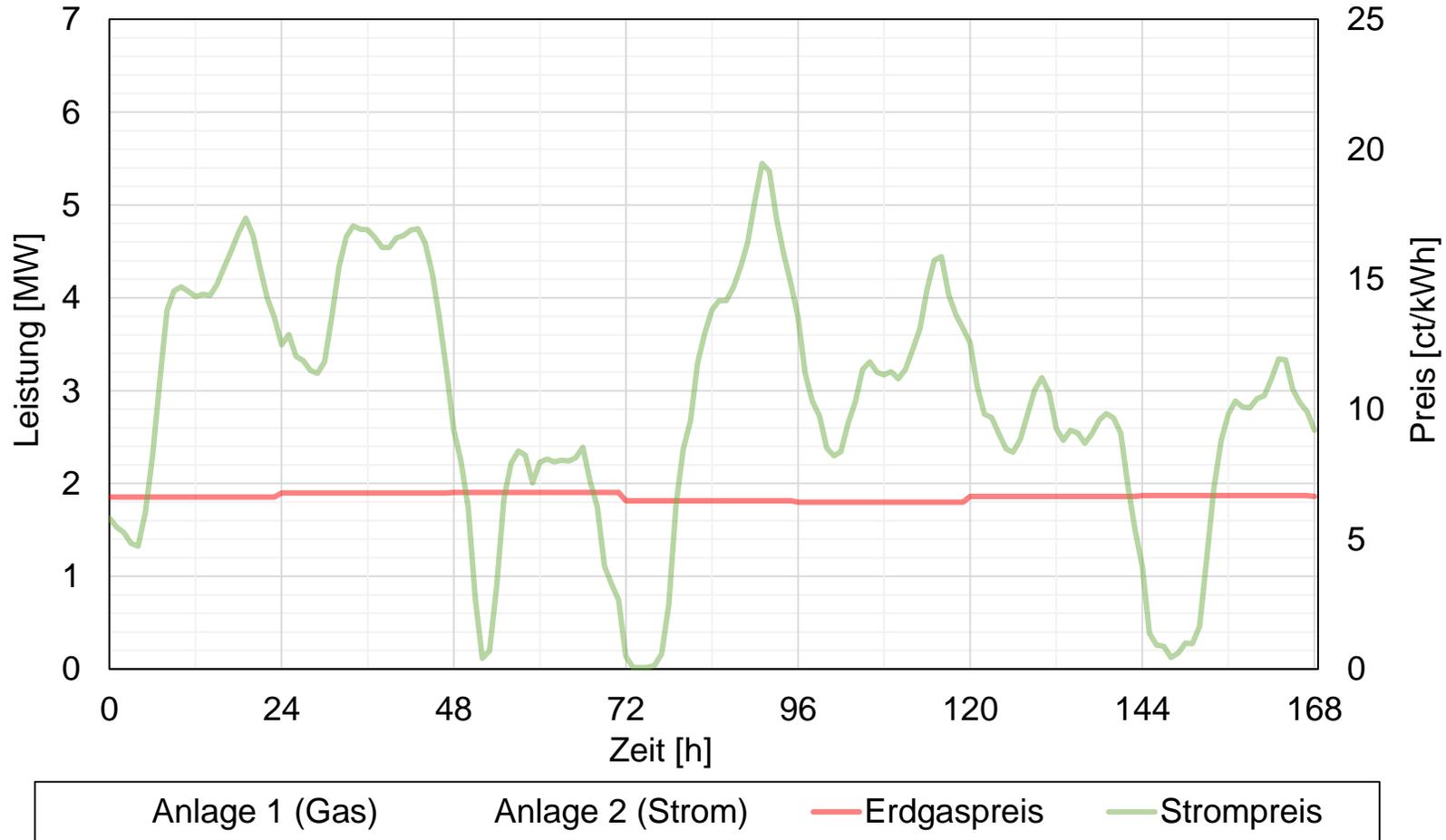
Berechnete Szenarien

- Vorgegebene Mindestauslastung des Schmelzprozesses von 90% im Betrachtungszeitraum
- Auslastung des Homogenisierungsofen so, dass gesamte Schmelztonnage verarbeitet wird
- Berechnung einer vollständig **erdgasbeheizten Prozesskette (fossil) als Base Case** in beiden Preisszenarien
- Anschließend Variierung des verwendeten Energieträgers zum Vergleich

Technologie-Preisszenario	1. Preisszenario Januar	2. Preisszenario Juni
<u>1. Schmelzen:</u> fossil / <u>Homogenisieren:</u> fossil	Szenario 1.1	Szenario 1.2
<u>2. Schmelzen:</u> fossil / <u>Homogenisieren:</u> elektr.	Szenario 2.1	Szenario 2.2
<u>3. Schmelzen:</u> elektr. / <u>Homogenisieren:</u> elektr.	Szenario 3.1	Szenario 3.2

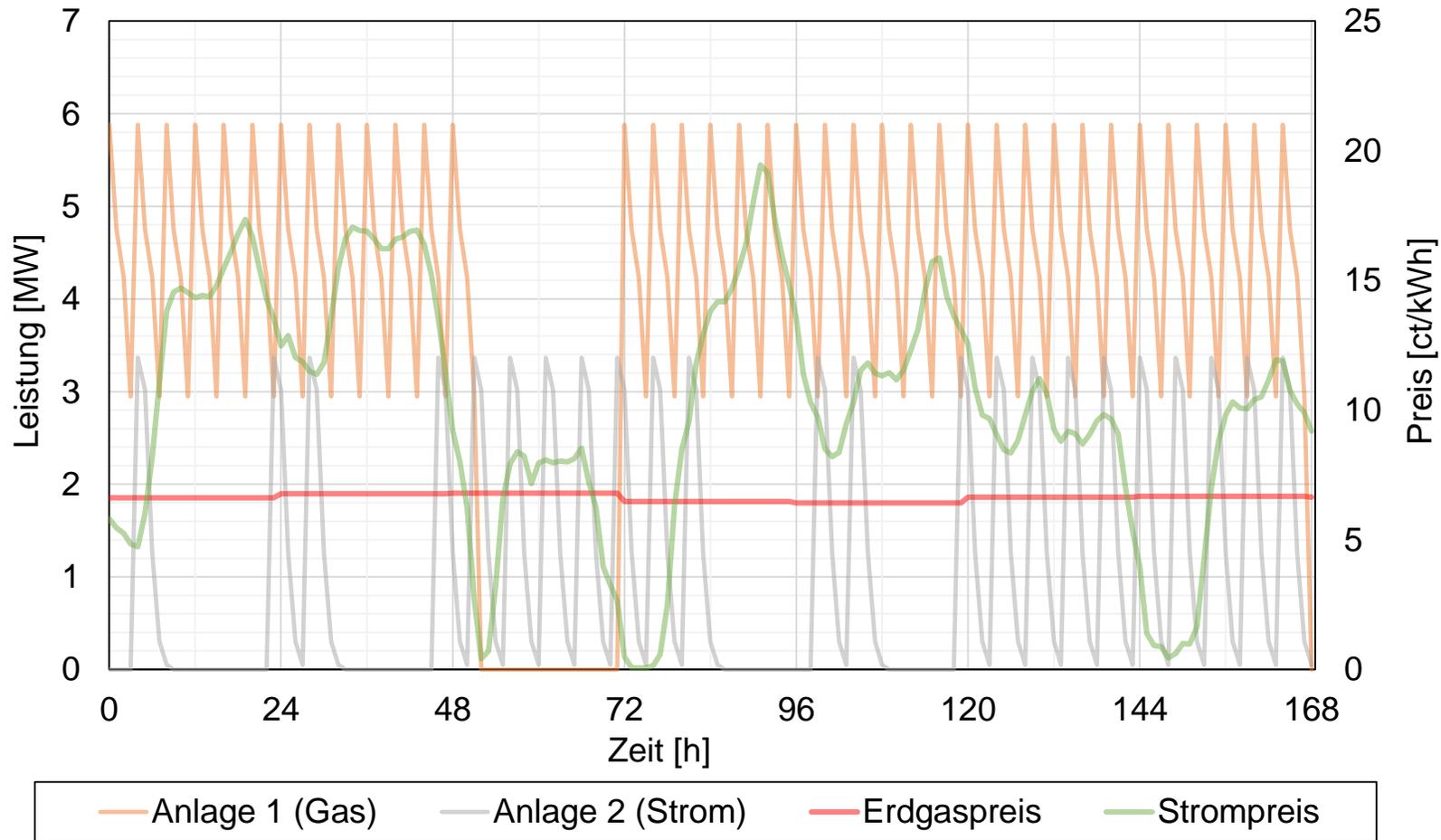
Ergebnisse (Beispiel 1)

Ergebnisse Szenario 2.1 (hybrid, Januar)



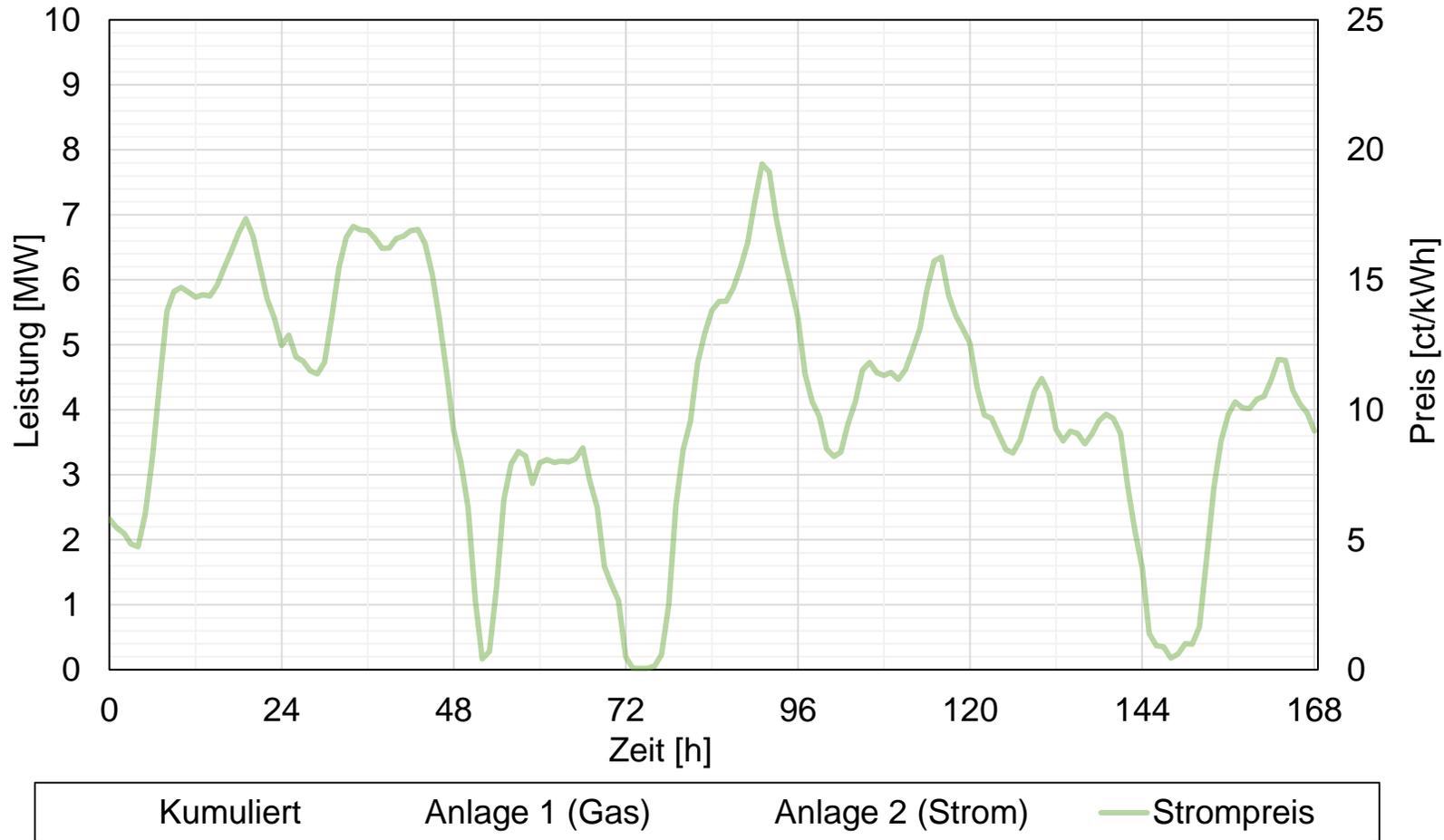
Ergebnisse (Beispiel 1)

Ergebnisse Szenario 2.1 (hybrid, Januar)



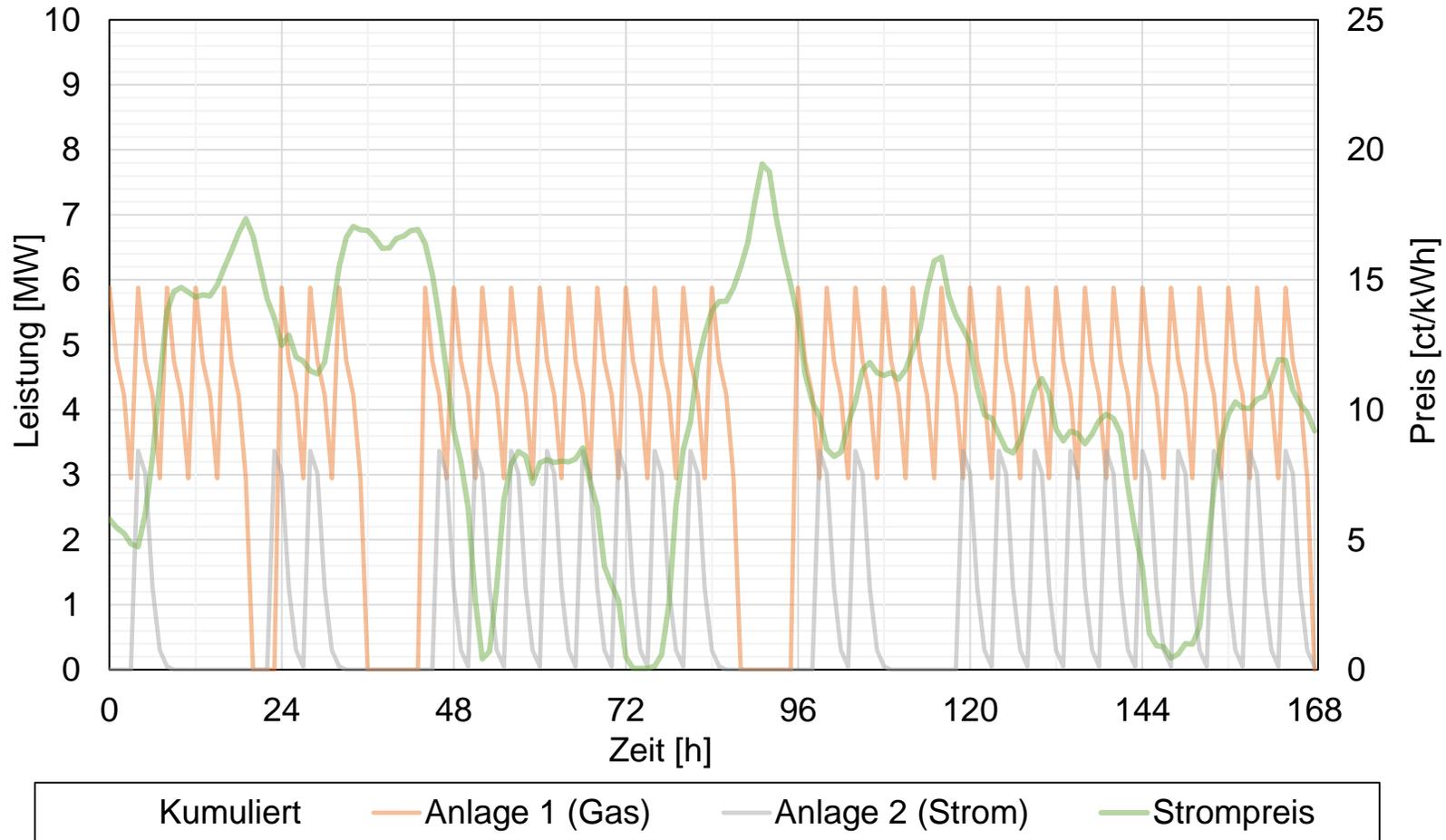
Ergebnisse (Beispiel 2)

Ergebnisse Szenario 3.1 (voll elektrisch, Januar)



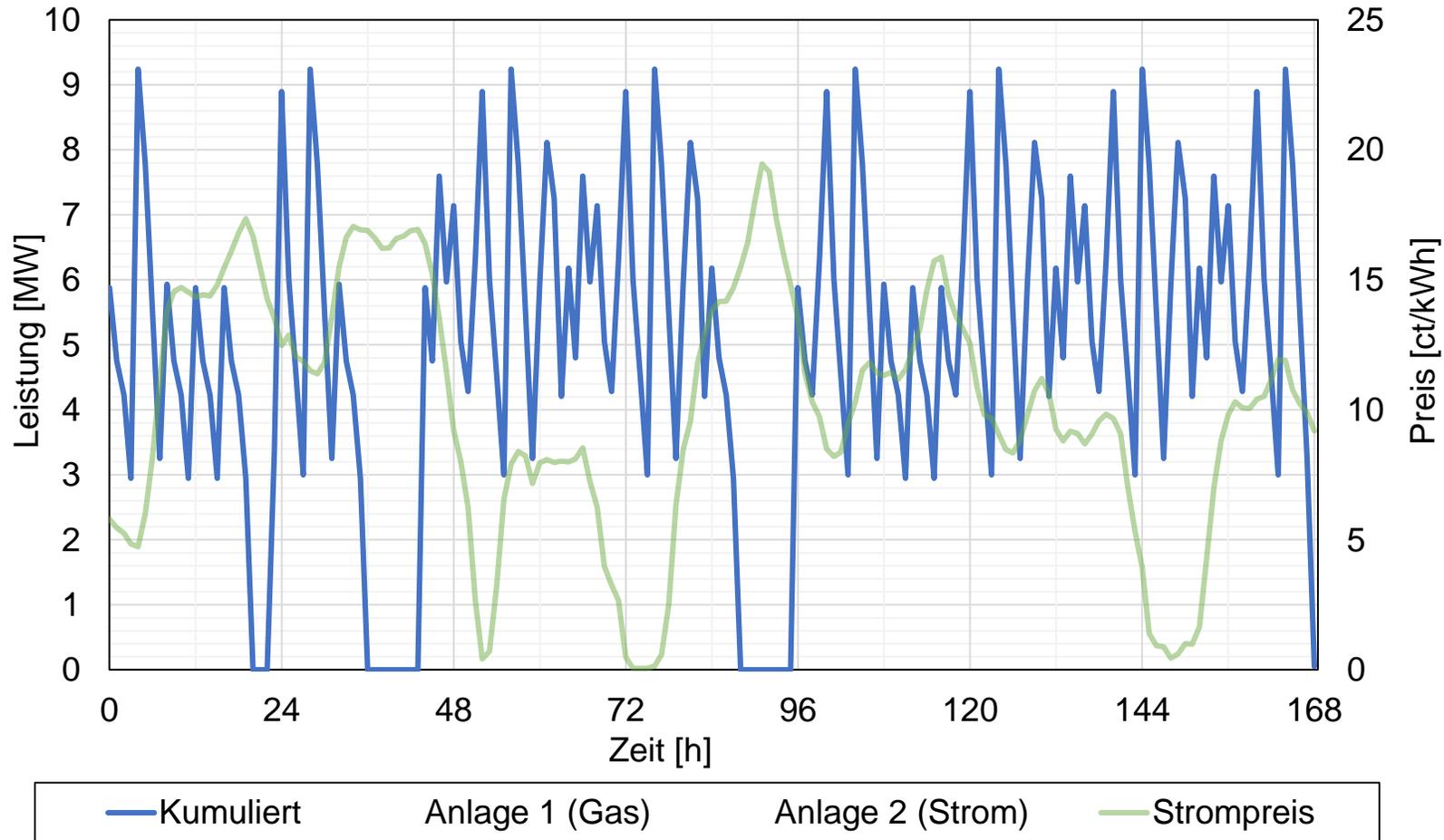
Ergebnisse (Beispiel 2)

Ergebnisse Szenario 3.1 (voll elektrisch, Januar)



Ergebnisse (Beispiel 2)

Ergebnisse Szenario 3.1 (voll elektrisch, Januar)



Ergebnisse (Übersicht)

Zusammenfassung der Berechnungen

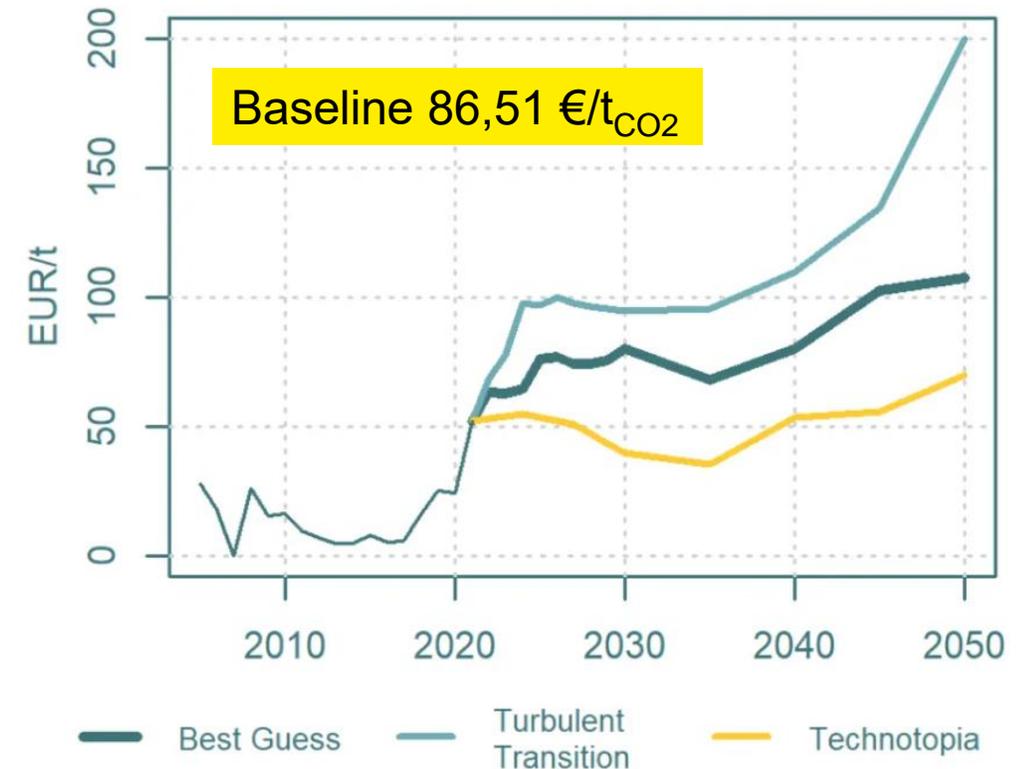
- Bei fossil beheiztem Basisszenario kein Optimierungspotential aufgrund geringer Preisschwankungen
 - Vergleich der Preisszenarien zeigt aber Einfluss der hohen Gaspreise im letzten Winter
- In hybriden Szenarien können Spitzenstrompreise vermieden werden
 - Gesamtkostensenkung im Januar-Szenario (begünstigt durch hohe Erdgaspreise)
- In restlichen Szenarien Steigerung der Gesamtkosten durch Variation

Technologie-Preisszenario	Energieträgerkosten Januar-Preisszenario (x.1)		Energieträgerkosten Juni-Preisszenario (x.2)	
1. <u>Schmelzen</u> : fossil / <u>Homogenisieren</u> : fossil	69,9 Tsd. € (75,6 €/t)	Baseline	44,9 Tsd. € (48,5 €/t)	Baseline
2. <u>Schmelzen</u> : fossil / <u>Homogenisieren</u> : elektr.	69,7 Tsd. € (75,3 €/t)	-0,3%	54,0 Tsd. € (58,4 €/t)	+20,3%
3. <u>Schmelzen</u> : elektr. / <u>Homogenisieren</u> : elektr.	76,0 Tsd. € (82,1 €/t)	+8,6%	85,3 Tsd. € (92,2 €/t)	+89,9%

Sensitivitätsanalysen

Variation Preis Emissionshandelszertifikate

- Welcher Zertifikatspreis ist notwendig, damit das Baseline Szenario (fossil) die gleichen Gesamtenergiekosten wie der hybride bzw. vollständig elektrische Fall aufweist?
- Gleiche Gesamtkosten Fossil --> Hybrid:
 - Januar-Preisszenario: 134 €/t_{CO2} (Erhöhung um 55%)
 - Juni-Preisszenario: 324 €/t_{CO2} (Erhöhung um 275%)
- Gleiche Gesamtkosten Fossil --> Elektrisch:
 - Januar-Preisszenario: 122,5 €/t_{CO2} (Erhöhung um 42%)
 - Juni-Preisszenario: 326,1 €/t_{CO2} (Erhöhung um 277%)
- Auch bei zukünftigen Zertifikatspreisentwicklungen keine Kostengleichheit zu erwarten (bei aktuellen Strom-/Gaspreisen)
- Preisstruktur für Energieträger allgemein entscheidend.



Quelle: THEMA (2023)

Zusammenfassung und Ausblick

- Im Fokus des Beitrags stand die Untersuchung der möglichen Kosteneinsparung durch eine an flexible Energieträgerpreise angepasste Produktionsplanung.
- Es wurde eine generische Prozesskette, bestehend aus zwei Prozessen betrachtet.
- Das durchschnittliche Verhältnis von Strom- und Erdgaspreisen ermöglicht unter den betrachteten Parametern keine oder nur geringe Kosteneinsparungen im Vergleich zum Status quo.
 - Eine Erhöhung der Emissionszertifikatpreise hat darauf in der aktuell absehbaren Entwicklung geringen Einfluss.
 - Das Design des Energiemarkts und der Energieträgerpreise allgemein ist entscheidend.
- Für die Parameterstudie wurde sowohl auf Seiten der Prozesskette als auch dem Energiemarkt eine Vielzahl von Vereinfachungen vorgenommen, die in weiteren Arbeiten schrittweise angepasst werden müssen.
- Technische Grenzen und notwendige Überkapazitäten sind bei der Ermittlung des Potentials zur Flexibilisierung von Industrieprozessen unbedingt zu beachten.
- Weitere Analysen zu energetischer Flexibilität in der Industrie finden aktuell u.a. im Projekt „FlexIPro“ statt.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Dr.-Ing. Christian Schwotzer

RWTH Aachen University
Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik
Kopernikusstraße 10
52074 Aachen

Tel.: +49 241 80 26068
schwotzer@iob.rwth-aachen.de
www.iob.rwth-aachen.de